粉粒状体の流動現象の可視化*

浦

環**

Visualization of Flow of Granular Materials

Tamaki URA

1. はじめに

気体や液体などの流体、金属などの固体は連続体である。固体を細かく分離し、集めたものが粉で、粒子の大きなものの集まりは粒状体と言われる。両者を総称して粉粒状体という言葉が使われる。液体はもちろん流れるが、固体も大きな力を加えて変形させるといわれる塑性流れが起こる。これに対して、粉粒状体の流れについてはあまり聞かないが、木曾の御嶽山の粉体流で有名になったように、工学の一分野として極めて重要である。まるで液体のような挙動をする粉体流から、サイロの中の穀物などの流れ、土を切り削るブルドーザの排土板の前の土の流れ、あるいはパイプ輸送されるスラリーの管内流れなど粉粒状体の流れ現象は様々な方面で見られる。粉粒状体の力学的な特徴は、粒子間の摩擦現象と間隙の流体の体積変化に代表され、体積変化が大きく、張力は伝えず、剪断力を伝え、粒子に作用する有効応力の直応力成分によって変形が大きい点である。

このような現象のための実験法として、実験槽の片面をガラス張りにし、粉粒状体の内部の変形を観察することが一般によくおこなわれる。適当なマーカーを置いたり(粒子が大きければ粒子そのものがマーカーになる)、格子を書いたりすることにより、二次元的な変形あるいは対称面上での変形を計測することができる。擁壁などの

ように二次元的な傾向の強いものでは、ガラス面での摩擦力を無視した上で、このような方法である程度の成果が得られる。しかし、排土板のように板幅が限られていて三次元的な影響を強く受けるものや、サイロや管内の流れのように壁の影響を強く受けるものに対してでは、不十分である。

2. ガラス浸透法

流体の流れの可視化において、流体が透明であるのとならないのでは話が全く違う。粉粒状体は透明ではない。粉粒状体の個々の粒子が透明であっても、その集合体は一般的に透明ではない。粒子と間隙流体の屈折率の差により粒子表面で乱反射が起こり、粉粒状体は濁ってしまう。すなわち粉粒状体の内部の粒子の変位を計測することは簡単ではない。そこで、屈折率の差より生じる反射・屈折を抑えるために、透明な粒子を粒子と同じ屈

図1 ガラス浸透法の原理

*原稿受付 昭和59年11月10日

**東京大学生産技術研究所

図2 強化ガラス粉の粒度分布

折率をもつ溶液の中に浸すことを考える(図1参照)。粒子表面の形状がどんなに凸凹でも、原理的に透明な粉粒状体を作ることができる。この透明な粉粒状体の中にマーカーを置けば、粉粒状体の流動現象を可視光の範囲で計測することが可能となる。これをガラス浸透法と名付けておく¹⁻⁷⁾。

実験の便を考慮して、強化ガラス(屈折率 $n \approx 1.474$)を粉碎し、洗浄・乾燥・分級して作製した粉粒状体(図2参照)を用いた。浸透液として屈折率が強化ガラスに近く、粘性の少ないテレビ

図4 α -ブロムナフタリンの濃度による可視化深さの変化

図3 ガラスの透明度を調べたテストパターン

ン油(屈折率 $n=1.46 \sim 1.47$)と α -ブロムナフタリン(屈折率 $n=1.657 \sim 1.660$)の混合液を用いた。図4は図3に示すパターンを試料中に入れて、 α -ブロムナフタリンの濃度を変えてパターンの線の識別できる深さを目視で調べた結果である。ここでわかるように、粒子内のキズなどの欠陥や粒子成分のばらつ

きなどにより粉粒状体を全く透明にすることはできず、若干の濁りが生じる。そのため、図4に示されるようにマーカーを識別できる限界がある。ここでの溶液の組み合わせでは α -ブロムナフタリン濃度が4.3%~4.5%の範囲が最適であり、粒子の約100個先が見通せることになる。屈折率は温度の影響も受けるので、温度管理を注意せねばならない。図5は3%、4.45%と5%の α -ブロムナフタリン濃度の浸透液に浸した場合のマーカーの識別深さを温度を横軸にとって示している。本論で示す実験では4.45%の浸透液を28°Cに保って用いた。また、 α -ブロムナフタリンの比重がテレピン油より重いので、時間の経過とともに浸透液の濃度分布が一様でなくなり、浸透液を循環させる必要がある。このようにして作られた「透明な」粉粒状体は間隙が液体で飽和した粘性の少ない粉粒状体の流動現象を研究するためのシミュレーション・モデルとなる。変位を計測す

図5 温度による可視化深さの変化

るためのマーカーの選択にも注意をはらう必要がある。粒径や比重が周囲の粉粒状体と異なると、流動中に周囲の粒子と異なる挙動をし、浮いたりあるいは沈んだりする。したがって、マーカーは対象とする粉粒状体と同質のものであることが望ましい。ここでは強化ガラス粉を高温焼き付けして、濃茶色に着色して、マーカーとした。

3. サイロ内の重力流れ

穀物・石炭・鉱石などの粒状物質を貯蔵する手段として、大型のサイロ等が建造される。これらの構造物の中で粉粒状体がどのように流動し、どのような力を構造物に及ぼすかを適確に理解することは、巨大化した構造物の安全面・機能面から重要である。これらへのアプローチとして、(1)構造物の損傷の直接の原因となる荷重特性から、(2)閉塞現象や流動する領域が一部にのみ限られてしまう現象などに関する流れのパターンから、の2つが考えられる。流れのパターンをガラス浸透法を用いて計測した結果を以下に示す^{1,5)}。

内径 104.8 mm の強化ガラス円筒中に、前記のガラス粒子を高さ 200 mm 間隙比 1.05 に詰め (図 6 参照)、角型の強化ガラス槽内のテレピン油混合

図6 円筒内の粉粒状体の重力流れに関する実験装置

液に浸し、円筒槽の底板中央に設けてある直径 60 mm の下降底を下げ、槽内のガラス粒子を流出させた。先に述べたマーカーを半径方向に 5 mm 間隔、上下方向に 10 mm 間隔、計 220 点置き、テレビカメラで撮影した映像を基にしてマ-

図7 円筒内の粒子の速度分布

カーの変位を計測した。映像の輝度・コントラスト・閾値などを変えることにより計測精度を上げることができる。

円筒内の粒子の移動速度を V 、下降底の速度を V_0 としたとき、無次元速度 $V=|V|/V_0$ のコンターを図 7 に示す。見やすくするために $V>1.0$ の部分にトーンを施した。各図は、下降底の変位 d が、3 mm から 6 mm, 9 mm から 12 mm, …, の平均速度を表わしている。これらの結果から歪増分が計算される。図 8 には歪増分テンソルの 1 次不変量 (体積歪増分) と偏差歪増分テンソルの 2 次不変量 (剪断歪増分) を示す。計測データは各マーカーの変位に関して Savitzky-Golay 法により Smoothing してあるが近接するマーカー間、すなわち空間では Smoothing されてなく、したがって歪には計測誤差が入りやすい。

図 9 は、図 6 の装置で、底板より高さ 90 mm の位置に直径 50 mm、厚さ 10 mm の円板の障害物を置いた場合の無次元速度の分布であり、図 10 は幅 5 mm 間隔 10 mm のスノコ状の障害物を同じ位置に設置したときの無次元速度分布である。

図 7 に示されるように、下降底の移動に伴い、粒子の移動領域が上方へと広がっていく様子が数値的に示されている。流動パターンは、粒子の移動が下降底の上部にのみ限られ、いわゆる Ratholing と呼ばれるものになっている。体積歪はアーチの上面近傍で起こる。図 8 には滑り面が明瞭に示されている。サイロの中間に円板状の障害物がある図 9 では、円板の下部に空隙ができ、そこで粒子が崩れている。円板周縁部での歪の集中が定量的に計測されている。スノコ状の障害物では Ratholing が乱されている。

4. 排土板による切削現象

粉粒状体の水平なベッドを一定の深さを保ちながら前進する平板状の排土板によって引き起こされる粉粒状体の変形について示す^{2-4,6,7)}。図 11 に実験装置の概観を示す。強化ガラスでできた長さ 800 mm 幅 250 mm 深さ 300 mm の槽に、2 重底を設け、仮底には直径 65 mm のガラス粒製のフィルターを 4 個配置し液の循環を可能にした。測定精度は測定点までの距離、拡大するレンズの種

図 8 円筒内の粉粒状体の歪分布

図9 円板状の障害物がある場合の速度分布

図10 スノコ状の障害物がある場合の速度分布

類などにより決まる。この実験では最大誤差が約 0.2 mm である。

ここでは最も単純な形状である幅 $B=20$ mm, 切削深さ $D=32$ mm の長方形の排土板が, 進行方向の左右に傾きを持たない対称状態で前進する場合について示す。図11に示すよう, 排土板とともに移動する座標系 0-XYZ を考える。排土板の影響のない十分前方で, 同一の Y 座標で深さ方向に14点のマーカを置き, 排土板前方の粉粒状体の盛り上がり状態が定常状態になるように

して計測した。排土板の傾き η を $\eta=90^\circ$ と 40° としたときの計測例をマーカの軌跡の XZ, XY, YZ 面への投影図として図12に示す。これは静止している排土板のまわりの粉粒体流の流線に対応する。粉粒状体に生じる歪を見やすくするために, XY面, XZ 面投影図には, 排土板の十分前方で同じ X 座標にある点を 5 mm おきに結んでおく。マーカの変位をフェアリングして粒子の変位が顕著になる点を求め, すべり面の形状が求められる。その結果を図12中表示する。図

13は空間に固定された座標系から見たマーカの変位速度ベクトルを表わしている。粒子は一般に右下から左上へとすべり面に沿って移動する。

これらの結果より, (1)排土板前方の粉粒状体の変形は排土板のアスペクト比に大きく影響を受ける。(2)アスペクト比 D/B が小さい場合には, すべり面は急な角度を持つようになる。これは, 排土板が前方に盛り上げた粉粒状体の影響と, 板の側方の変形の少ない部分から受ける剪断力の影響とによると考えられる。(3)板の下縁から発生

図11 排土板前方の粉粒状体の流れの可視化装置

図12 排土板前方の流線

するすべり面は、板幅内ではほぼ同一の形状をしており、平面で近似できる。(4)板の傾きが $\eta=40^\circ$ の場合にはすべり面は板の下縁から伸びる。(5) $\eta=90^\circ$ の場合には下縁先端ではなく、前方から伸びているが、この場合板の下方で粉粒状態が大き

く圧縮されることを示している。(6)すべり面の内側の粒子はおおむねすべり面に平行に変位する、などの諸現象が明らかになった^{3,7)}。サイロの例のように変位から歪を計算することもできることを付記しておく。

図13 空間固定の座標系で見た粉粒状体の速度ベクトル

ガラス浸透法により、粉粒状体の変形を計測し、その変形あるいは変形パターンよりサイロや排土板に作用する力の性質を知ることができる。ここでは形状が簡単なものについての例を示したが、強化ガラスを加工して任意の形を作ることができるので、より複雑な粉粒状体の流動現象や、複雑な形状の容器や排土板についての研究をおこなうことが可能である。

1) 浦・吉田：“粒状体の重力流れに関する実験的研究”，日本

- 機械学会講演集, Vol. 830-12 (1983), pp. 246-248
- 2) 浦・坂巻: “排土板による粉粒体の3次元変形”, 日本機械学会講演集, Vol. 840-6 (1984), pp. 16-18
- 3) 浦・坂巻: “粉粒状体の3次元切削に関する研究”, 日本機械学会論文集, 近刊
- 4) 浦・坂巻: “粉粒体の3次元流れの計測(Ⅰ)—排土板まわりの流れ—”, 生産研究, Vol. 35-2(1983. 2), pp. 105-107
- 5) 浦・吉田: “粉粒体の3次元流れの計測(Ⅱ)—円筒容器内の重力流れ—”, 生産研究, Vol. 35-4 (1983. 4), pp. 190-193
- 6) 浦・坂巻: “粉粒体の3次元流れの計測(Ⅲ)—排土板前方のすべり面内の流れ—”, 生産研究, Vol. 36-4 (1984. 4), pp. 195-198
- 7) 浦・坂巻: “排土板に作用する力の解析(その2)”, 生産研究, Vol. 36-9(1984), pp. 433-436

皆様の御意見・御希望をお待ちしています。