

粉粒体の 3 次元流れの計測 (II) — 円筒容器内の重力流れ —

Measurement of Three Dimensional Flow of Granular Media (II)

浦 環*・吉 田 傑*

Tamaki URA and Suguru YOSHIDA

1. 緒 言

現在、穀物・石炭・鉱石などの種々の粉粒体 (Bulk Solids) を貯蔵する目的で、サイロ・ビン等の構造物が数多く建造されている。しかし、これらの構造物に充填されている粒状体が側壁等に及ぼす荷重特性に関しては明確なことは十分解明されていない。現状ではサイロ等の設計に関しては、静的な土圧論の延長で行われているのが一般的な傾向である。そのため排出口から粒状体が流れ落ちるときのような動的挙動が起こるときに、静的な手法では評価しきれない動的荷重が作用し、構造物の破壊を引き起こすことがしばしば報告されている。¹⁾ こうした現象に対応して、容器内の粒状体の重力流れの挙動についてのいくつかの実験、研究も行われているが、実験については挙動の定性的な評価にとどまっており、荷重特性に直接結びつけることのできる定量的な実験方法は確立していない。

本研究はここで粉粒体の流れの定量的な観察を行うため、浸透法を用い、円筒容器内の粒状体の移動量を測定する方法を検討し、実験を行った。

2. 実 験

2.1 浸透法

透明な材質でできた物質も、細い粒子の集まりになると外部媒体 (空気など) との屈折率の相違によって光の反射、屈折が起こり、透明とはならない。しかし外部媒体を粒状体と同じ屈折率を持つものにすることによって光は直進し、粒状体の集まりを透明とすることができる。これが今回の実験の基本となる浸透法の原理である。²⁾

実験に用いた材質はパイレックスガラス粉 (屈折率 $n = 1.47$, 粒度 $0.40 \text{ mm} < D < 1.00 \text{ mm}$, 真比重 $\gamma = 2.23 \text{ g/cm}^3$) であり、媒体としてテレピン油 ($n = 1.46 \sim 1.47$)

と α -ブロムナフタリン ($n = 1.657 \sim 1.660$) の混合液を用いた。混合液の混合比は液中の α -ブロムナフタリンの体積比率を 4.45% とする。移動量を測定する点に使用するマーカーについては同じパイレックスガラス粉を高温焼き付けによって濃茶色に着色したものを用いる。

2.2 実験装置

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。パイレックスガラスの槽の中に同じ材質で出来た円筒を立ててある。円筒の下部には中央に穴の空いたパイレックスガラスの円盤がはめ込まれており、その穴径と同じ径を持つピストンが

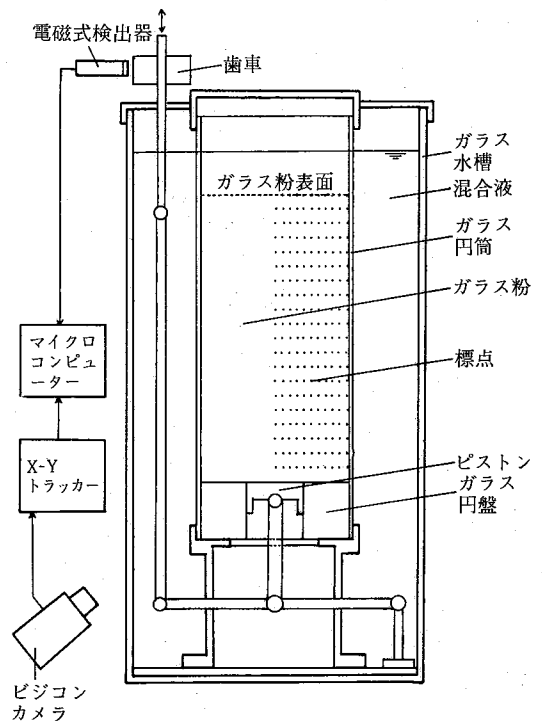


Fig. 1 実験装置の概略図

* 東京大学生産技術研究所 第 2 部

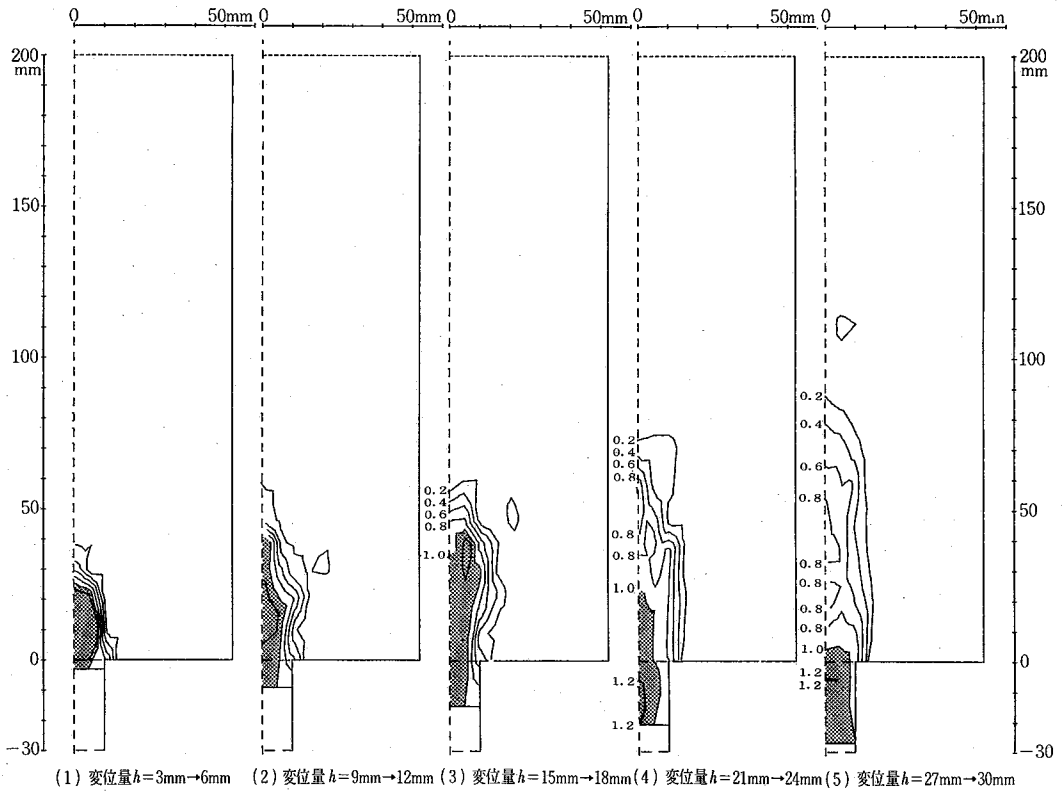


Fig. 2 粉体流れの速度成分の等高線 (移動底の直径 $\phi=20$ mm)

垂直に上下 (実験中は下降のみ) できるようになっている。ピストンの上下は上蓋に取り付けられたギア・ボックスを通して手動で行われる。変位量は磁電式検出器を通してマイクロコンピュータにより制御する。

円筒容器の下部中央に移動底を設けたときの、その下降による粒状体の重力流れのパターンは軸対称問題として考えることができる。よって円柱の半径方向で垂直に切った平面内の流れの様子を観測すればよい。円筒の中心線を z 軸、充填された試料の最下部、円盤の上面に r 軸を取り、座標を定義する。原点は初期ピストンの上面中心点となる。

標点を、半径方向、高さ方向に適当な間隔でおきそれを正面からビジコンカメラで観測できるようにする。ビジコンカメラは測定できる標点の位置に合わせて高さを調節できるようになっている。カメラから出力される画像は X - Y トラッカーに送られ、そこでマーカーの逐次位置をモニターテレビの画面上で手動で追跡する。観測されたマーカーの位置はマイクロコンピュータに送ら

れ、絶対座標に変換した後、外部記憶装置 (ミニ・フロッピディスク) に記録する。

2.3 実験

用いられたガラス円筒の直径は外径 110 mm、内径で 104.8 mm である。これはガラス浸透法により透明になる程度にも限界があり (粒子内のひびなどの欠陥、成分の微妙なばらつきなどによるものと考えられる)、合理的な観測可能な距離が 50 mm 程度であると判断したためにこの大きさとした。

標点は前述したように中心から半径方向に 5 mm おきに 10 点、壁際に 1 点の 11 点、これを高さ方向に 10 mm おきに 20 段おくことにする。壁際に標点を置いたのは壁面摩擦の影響を見るためである。

実験は移動底の直径を 20 mm, 40 mm, 60 mm の 3 ケースについて行った。移動底の下降速度は約 0.2 mm/sec で 3 mm ごとに静止させ、その状態で標点の座標を計測する。最大ストロークは 30 mm, 10 ステップとする。

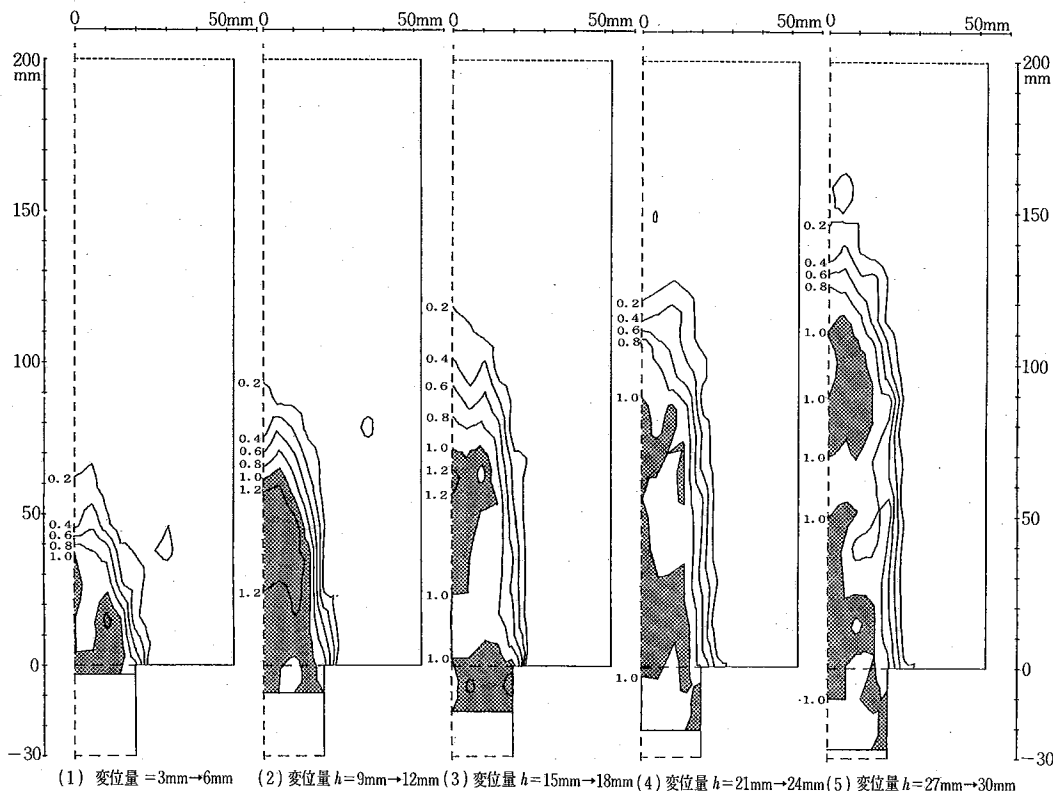


Fig. 3 粉体流れの速度成分の等高線 (移動底の直径 $\phi=40$ mm)

測定結果を Fig.2-(1)~Fig.4-(5)までに示す。各ステップごとにステップ数を i と置き、 (r_i, z_i) を各ステップにおける座標とする。移動底の変位量の増分を Δh ($=3$ mm) と置いたときの、各ステップにおける移動底の単位変位当たりの、標点の変位の速度成分、

$$\bar{v}_i = (\sqrt{(r_{i+1} - r_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}) / \Delta h$$

ただし、 $i=0\sim 9$

の値について等高線を書いたものである。等高線の値は 0.2, 0.4, …1.0, 1.2 と取り、1.0 以上の部分に対してはトーンを施した。粒子の移動する領域が上方へ移動して行く様子がよく表れている。

3. 考 察

本実験における最小識別長さはモニターの画面に映る大きさとマイクロコンピューターの A/D 変換の関係により 0.27 mm 程度である。これは十分な精度であると考えられるが、追跡する標点の大きさが 0.4 mm~0.8 mm であることや追跡方法が手動であることなどによ

って 0.5 mm 程度の誤差は発生し得るものと思われる。

粒子の流れが起きている領域は各ステップごとにある大きになると平衡状態となり、すぐには上方まで進展しない。粒子の流れが起きている領域では単位体積当たりの粒子密度は初期充填密度よりも小さくなっているはずであり、間隙比が最大間隙比を越えるときに新しい流れの領域が発生すると考えられる。

また、移動底の直径 $20\phi, 40\phi, 60\phi$ のいずれに対しても流れは移動底の上方のみに起こり、その周辺では粒子の移動が起これないという現象が観察される。こうした現象が実際のサイロ等の貯蔵構造物で起きたときには、多大の Dead Mass を生じ、不都合である。これについては Johanson ら³⁾の研究が報告されており、rathoring と呼ばれるこうした現象は粒状体の物性値と底の開口部の直径が要因となって起こると考えられている。移動底の直径をさらに大きくすることができれば移動底の上部より外に広がった領域にも流れの起こる現象が観察できるかと考えられる。

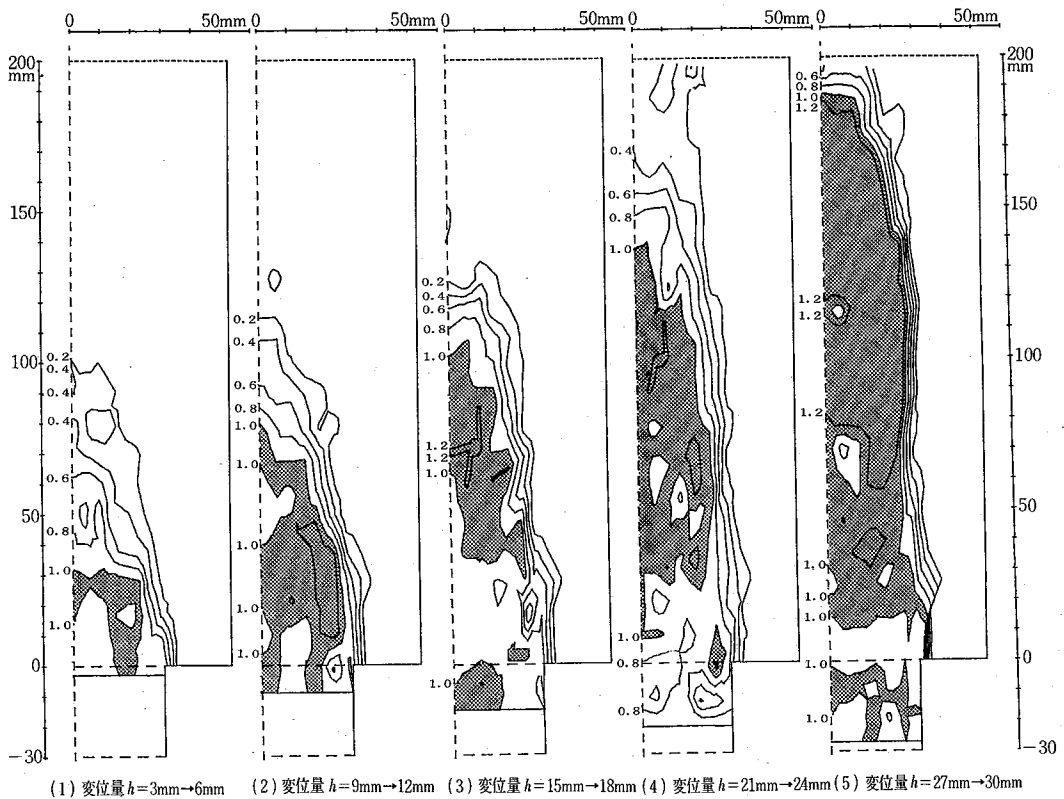


Fig. 4 粉体流れの速度成分の等高線 (移動底の直径 $\phi=60\text{mm}$)

4. 結 言

本研究実験において粉粒体の重力流れのパターンについての定量的解析が可能になった。今回は移動底の外径を変化させ、最も単純なパターンについて実験を行ったわけであるが、さらに異なる条件を付加したときの実験についても検討する方針である。

(1982年12月28日受理)

参 考 文 献

- 1) O.F. THEIMER, "Failures of Reinforced Concrete Grain Silos", ASME, May 1960
- 2) 浦 環, 坂巻 隆, "粉粒体の3次元流れの計測(1)", 生産研究, 401号
- 3) J.R. JOHANSON, H. COLIJN, "New Design Criteria for Hopper and Bins", Iron Steel Engineer, October 1964