末広がり移動層内における粒体の流れ*

Flow of Particles in a Two-Dimensional Fan Shaped Moving Bed

外山茂樹** 広末英晴***
Shigeki Toyama Hideharu Hirotsue
内田邦夫**
Kunio Uchida

1. はじめに

単一円筒型移動層内の粒体の流れについては、すでに多数の研究者によって、実験的¹⁻³⁾、理論的^{4,5)}に検討が行なわれ、層中央部におけるプラグフロー領域および周辺部における粒体相互間の変形をとまなう変形領域の存在することが知られている。

しかし、移動層壁が垂直線に対して、若干の傾きを有する末広がり移動層についての研究は少なく、最近、Khodak ら⁶⁾によって、層内における粒体の応力、速度分布（特に粒体の排出孔がこれらにおよぼす影響を中心

に）についての研究結果が報告されているにすぎない。そこで、著者らは本装置を人工軽量骨材製造装策として使用することを目的として、二次元末広がり移動層を用いて、粒体の流れ状態、特に粒子の流線、変形域の存在

図1 実験装置

	A	B*)	C	D*)
<i>l</i>	9.97cm	10.28cm	9.99cm	10.10cm
<i>m</i>	16.50cm	16.85cm	30.85cm	30.7cm
<i>n</i>	59.9cm	59.8cm	59.2cm	59.3cm
<i>o</i>	5.23cm	5.31cm	5.22cm	5.32cm
θ_w	3°7'	3°9'	9°59'	9°52'
けい石層	無	有	無	有

*) 使用粒体のけい石をエポキシ系樹脂を用いて、壁へ塗付したもの。
ここでの寸法は、このけい石層（約1層）を除いた部分の寸法である。

図2 末広がり移動層の大きさ

昭和48年1月12日受理
* 粉体工学研究会秋季例会にて講演 (1972.11.10 名古屋)
** 東京工業試験所 (〒151 東京都渋谷区本町1-1-5) TEL 03-377-5211
*** 九州工業技術試験所 (〒841 鳥栖市宿町) TEL 09248-2-5161

表 1 使用粒体の性質

使用 粒体	粒 径	真密度	疎充てん かさ密度	密充てん かさ密度	内 部 摩擦角	壁 摩 擦 角 ^{*)}
けい石	1~3 mm	2.64 g/cm ³	1.31 g/cm ³	1.53 g/cm ³	35°	26.4°

*) 塩ビ板-けい石層の摩擦角

の有無および変形域の軸方向における変化について実験的に検討を加えた。

2. 実験装置および実験方法

使用した実験装置を図 1 に示す。実験装置は、すべて厚さ 10mm の透明塩化ビニールでつくられている。このうち、末広がり移動層部の大きさを図 2 に示す。同図に示しているように、壁-粒体間の摩擦を変える目的で、壁に何も塗付していない場合と使用粒体のけい石をエポキシ系樹脂を用いておそ一層塗付した場合の 2 種類を用いた。また、垂線となす壁の傾きの影響、すなわち末広がり角の影響を調べるために、 $\theta_w=3^\circ$ と 10° を使用した。

使用した粒体の性質を表 1 に示す。同表中、内部摩擦角、壁-粒体間の摩擦角は、一軸剪断試験によってえられた値である。また、粗充てんかさ密度は二重管引き上げ法⁷⁾、密充てんかさ密度はタップ充てん (約 50 回) して、粒体を十分に充てんした後、測定した値である。

層内における粒体の流れ状態を決定する実験をつぎのようにして行なった。まず、図 1 中の B、C) 移動層部と A) ホッパーへ粒体を充てんした後、 $\theta_w=3^\circ$ の場合はテーブルフィールド、 $\theta_w=10^\circ$ の場合は、図 1 中の底部の絞り部を拡大し、ベルト式排出法 (手動) によって、末広がり移動層部の粒体を一通り抜き去ることによって粒体の流れ状態を整えた。つぎに、移動層頂部へトレーサ (けい石を着色したもの) を縞状または分散状に挿入し、実験を再開して、これらのトレーサの動きを写真撮影によって追跡した。そして、この写真から粒子流線、変形域の存在の有無および変形域の大きさの軸方向における変化を求めた。各実験終了後、末広がり移動層中の粒体を吸引して取り出し、層内平均かさ密度 ρ_{bs} を求めた。

表 2 移動層内の平均かさ密度 [流動時] [g/cm³]

	W=330~340	W=190~195
壁へけい石層を塗付していない時	1.37	1.38
壁へけい石層を塗付した時	W=310~330	W=175~180
けい石層を一層のみ考慮した時	1.38	1.37
けい石層を無視した時	1.32	1.31

W: 供給速度 [g/min]

$\theta_w=3^\circ$

3. 実験結果と考察まとめ

3.1 流動時における層内平均かさ密度

前章の手法によって求められた ρ_{bs} を表 2 に示す。

表中で壁へけい石を塗付した場合には、その層の正確な容積を算出することが困難なために、壁面へ塗付したけい石層の厚さが 3 mm 存在しているとした場合と全く存在しないとした場合において、それぞれ容積を算出し、これと層外へ吸引して測定した層内重量より ρ_{bs} を求めた。よって、真の ρ_{bs} は両値の間にあると考えられる。

表 1、2 より、 ρ_{bs} は粗充てんの ρ_b より大きく、密充てんの ρ_b より小さいこと、したがって流動時における粒体は粗充てんほどではないが、かなりゆるい状態で接触しながら流れていると思われる。

3.2 層内における粒体の流れ

壁摩擦が小さい場合 (層壁へけい石を塗付していない場合) と大きい場合 (層壁へけい石を塗付した場合) のそれぞれについて、写真撮影により層頂部へ挿入された横溝状の着色トレーサの変形を追跡して、壁面近くで粒子層が変形する範囲を求め、また粒子層中へ分散させた着色トレーサの移動を写真撮影およびフィルム解析機で追跡して、これから粒子の流れ線を求めた。

3.2.1 壁摩擦が小さい場合

この場合の実験結果を図 3、4 に示す。壁摩擦が大きい場合とは異なり、壁へ接している 1~2 層のみが他の

図 3 壁摩擦が小さい場合の粒子流線 ($\theta_w=10^\circ$)

図4 壁摩擦が小さい場合の粒子流線
($\theta_w \approx 3^\circ$, $W = 296 \text{ g/min}$)

粒子より若干遅れるのみで、内部の粒子は垂直方向におおよそ等速度を保ちながら下降することが観察された。また、両図に示している実線は、末広がり移動層の両壁の延長線の交点を原点として、放射線状に引かれた直線であるが、これと実測値との比較をみると、実測値は、およそこの原点を通る放射線に沿って下降しているといえる。

これらの実験結果を、末広がり移動層を逆さまにしたホッパーからの流出部近傍に関する研究と対比してみると（両装置内における粒体の空隙率は著しく異なっているが、一応粒体の流れという見地から比較してみる）、まず、粒子の流線については、Brown⁹⁾が、粒子は円錐の頂点に向かって、直線的な軌跡をたどるという仮説をもうけており、本実験結果と類似の取り扱いである。また、ホッパー内における粒体の速度分布については、中心部が周辺部に比べて、より速いという実験的⁹⁾、理論的¹⁰⁾研究があるが、これについては、今回の実験結果と逆の傾向にある。

さて、壁摩擦が小さい場合の層内におけるトレーサの軸方向における下降時間と距離との関係は

$$W = \rho_{os} \times A \times \bar{u} \quad \dots\dots(1)$$

$$L = \int_0^t \bar{u} dt \quad \dots\dots(2)$$

図5 粒体の移動距離対時間の関係

図6 壁摩擦が大きい場合の粒体の流れ ($\theta_w \approx 10^\circ$)

図7 放射状降下域の大きさの軸方向における変化($\theta_w \approx 3^\circ$)

図 8 放射状降下域の大きさの軸方向における変化($\theta_w \approx 10^\circ$)より求められる。ただし、 W : 質量速度 [g/min], A : 層の断面積 [cm²], $\bar{u}$: 粒体の断面平均下降速度 [cm/min], ρ_{bs} : 層内平均かさ密度 [g/cm³] (3・1 節参照)

以上のようにして求められた計算値と実験値とを比較したのが図 5 である。両者はおおよそ一致していることが分る。

3.2.2 壁摩擦が大きい場合

この場合には、図 6 に示しているように、トレーサがほぼ水平を保ちつつ降下する粒体層内部における放射状降下域と、トレーサが軸方向にずれを生じながら降下する壁近傍における変形域の二領域が存在することが認められる。ここでは、この両域の境界が、単一円筒型移動層についてえられているプラグフロー域と変形域の境界に類似していると考えて、降伏点と呼ぶことにす。この降伏点の位置を点綴したのが図 7、8 である。降伏点の大きさも末広がり状に直線的に拡大していること、また、粒体の排出速度が大きい場合には、単一円筒型移動層と同様に、降伏点はより小さい半径位置から発生する傾向にあることが認められる。

4. ま と め

以上、二次元末広がり移動層を用いて、粒体の流れを実験的に検討した結果

- 1) 壁-粒体間の摩擦の大小によって、変形域が現われたり、現われなかったりする。
- 2) 変形域が存在しない場合には、粒体は、層壁の延長線の交点を通る放射線に沿って下降し、時間的な変位は(1)、(2)式によって求められる。
- 3) 変形域が存在する場合は、変形域と放射状降下域との境界の半径方向の大きさは、下降するにつれて直線的に末広がり状に拡大する。

引 用 文 献

- 1) 矢木 栄, 国井大蔵, 長原勝美, 内藤 宏 : 化学工学, 25, 469 (1961)
- 2) Brimn, M. S., Friedman, S. J. and Gluckert, F. A. : *Ind. Eng. Chem.*, 40, 1050 (1948)
- 3) Morris, D. R., Grubbins, K. E. and Watkins, S. B. : *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, 42, 323 (1964)
- 4) 高橋洋志, 柳井 弘 : 化学工学, 35, 357 (1971)
- 5) 高橋洋志, 柳井 弘 : 化学工学, 35, 1372 (1971)
- 6) Khodak, L. Z. and Borisov, Yu. I. : *Powder Tech.*, 4, 187 (1971)
- 7) 三輪茂雄 : 粉体工学ハンドブック, p. 103 朝倉書店 (1965)
- 8) Brown, R. L. : *Nature (London)*, 191, 458 (1961)
- 6) Laforge, R. M. and Boruff, B. K. : *Ind. Eng. Chem.*, 56, 42 (1964)
- 10) Suzuki, A. and Tanaka, T. : *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 10, 84 (1971)

Author's Abstract

Flow of Particles in a Two-Dimensional Fan Shaped Moving Bed

by

Shigeki TOYAMA*, Hideharu HIROSUE** and Kunio UCHIDA*

(*National Chemical Laboratory for Industry
(**Government Industrial Research Institute, Kyūshū)

Thin layers or tracing points were marked in a two dimensional fan shaped moving bed by using coloured particles. Then, movement of them was observed through the front plate made of perspex and recorded by photographing.

The experiment revealed following flow properties.

1. Particles in the bed flowed down along the line drawn from the origin of the fan shape.
2. Boundary layers were formed near the walls if the surface of the wall would be rough.
3. When the boundary layer was formed, the width of it enlarged linearly according to the moving down of the bed.

〔書 評〕

“Fine Powders-Preparation, Properties and Uses”

C. R. Veale 著, 147頁, APPLIED SCIENCE PUBLISHERS LTD., London, 1972年 発行

表題をながめ、目次を見ると、この150頁足らずの本によくまあこれだけ欲張った内容を盛込もうとしたものだと感心し、少々呆れかえる。各章のタイトルをあげてみると、1. 緒言、2. 微粉体の製法、3. 微粉体特性、4. 表面の性質、5. 補強剤としての微粉体、6. 微粉体の表面処理、7. 微粉体の焼結、ホットプレス、およびその微細構造、8. その他の性質、となっており、粉体化学のほとんどを網羅しているようにみえる。たとえば第3章 微粉体特性中の粒度のサブタイトルはSedimentation, Electron Image Formation, 光散乱, X線回折線ブロードニング, ガス吸着, めくれ熱と、まず一通り含まれているが、その当然の結果として原理の原理を軽く一撫でしているにすぎない。他の章も大体ご同様であるが、それでは何故、このような本が出たのかその意義はというと、実はこの Fine Powder というのがプラズマを応用して

分解, 熔融, 蒸発凝縮, 反応生成 etc により製造されたものを集めているというところにある。

著者は英国の National Physical Lab. においてプラズマを用いて微粉体を製造し、またその利用法について研究を積んだ人である。多種多様の金属, 金属酸化物, カーバイド, 水酸化物, カルボニルその他の化合物のプラズマを用いて得た微粉体に関する文献が豊富に収録されており、その方面の資料としての価値は高い。さらにこの方法により得られた粉体の工業的利用として5~7章にまとめられている。表題のような微粉体に関する一般的な解説書としては決して満足すべきものではないが、プラズマの利用による粉体の製法と、それによる粉体に関する一般的な知識をもつために、また、この分野に特に興味のある方々には有益な手引書であろう。

(M. A)