

# 画像によるホッパの流動状態の観察 およびレベル制御に関する研究

和田憲造\*・岡均\*\*・生田強史\*\*\*・早野延男\*

## Observation of the Flow Pattern and Level Control of a Hopper by Using the Image Processing

Kenzou WADA, Hitoshi OKA, Tsuyosi SYOUDA and Nobuo HAYANO

### Abstract

Recently, the technique of image processing has been used for inspection of industrial products, remote sensing, character recognition, and as a visual sensor for robots, etc.. This report is concerned with level control of hopper by using an image processing apparatus.

The experimental system consists mainly of the following elements :

- a) The controlled object is an asymmetrical hopper with a rectangular cross section.
- b) The detecting element is an ordinary video camera.
- c) The actuating element is a slide valve which is made in our laboratory.
- d) The controller is a PC-9801 personal computer.
- e) SYSTEM9512 is used as the image processing apparatus.
- f) For the test material, sand is used (mean diameter  $355 \mu\text{m}$ ).

The flow pattern of granules inside the hopper changes at the transitional bed height ( $H_{tr}$ ).  $H_{tr}$  is the bed height at which flow pattern of granules changes from mass flow to core flow or vice versa. The flow pattern of granules is uniform in the upper part of  $H_{tr}$ . In this sense, it is easy to control the level of the hopper, because the surface of granules in the hopper is kept constant (features of mass flow). We measured  $H_{tr}$  by video camera and the data of  $H_{tr}$  is treated by the image processing unit (SYSTEM 9512). In this case, it is desired that the level control of granules is performed at the upper part of  $H_{tr}$ . The time to transmit the image data to PC-9801, and which is necessary for the image processing, was reduced to maintain good response wave shapes. In order to do so, the area used for data processing of the flow pattern is decreased, and the method of extracting the useful information from the image data is discussed.

The following results were obtained through this experiment.

- 1) By using the level control system with an image processing unit as a detecting element, the control of level becomes easier.
- 2) There is a problem of relative position between video camera and hopper, so, to get good responses, we treated the problem of relative position by dividing the hopper into three visual areas.
- 3) It is observed that when inflow rate of granules and width of the hopper are kept constant,  $H_{tr}$  is

almost constant. This means that the flow pattern is a mass flow state. Thus,  $H_{tr}$  becomes the index of control.

- 4) When inflow rate is constant and width of the hopper becomes wider,  $H_{tr}$  becomes greater and the area of uniform flow becomes narrower. Then controlling the level of the hopper is rather difficult in this case.
- 5) When  $Q_{in} = Q_{out}$ ,  $H_{tr}$  becomes lower than in the case of  $Q_{in} = 0$ , and the region of uniform flow becomes wider. Controlling the level is rather easy in this case.

### 1. 序 論

近代工業の分野で、画像処理装置は生産ラインにおける製品の検査、計測、リモートセンシング (remote sensing), 計算機断層撮影および文字認識など、またロボットの視覚センサとして視覚的、感覚的の判断を要する産業界の多くの分野で用いられている。また、粉体工業の分野においても粉粒体の自動粒度測定器などに使用されている。しかし、制御システムの検出端として画像処理装置を用いている例はほとんどない。

画像処理装置を検出端とした制御システムの利点としては、制御量として直接物理量が測定できない場合でも、視覚的に制御量の変化をとらえることができれば、制御を行うことが可能なことである。しかし、問題点として、対象物の抽出方法の難しさ、処理時間が長いことなどがあげられる。さらに、制御を行う上で画像処理に要する時間は、ある種のむだ時間と考えられることから、この処理時間はシステムの制御性能を大きく左右することになる。

本報では、粉粒体プロセスの一環として多用されているホッパを例にとり、まず最初に画像処理装置を用いてホッパ内の粉粒体の流動状態について調べ、またホッパのレベル制御において、画像処理装置を検出端、マイコンをコントローラ、ホッパを制御対象とした制御システムを構成し、画像処理時間の短縮方法、制御量の抽出方法、さらに画像処理装置を検出端とした制御システムの問題点などについて検討を行った。

### 2. 実験装置

実験装置の概略図をFig. 1に示す。粉粒体はサブホッ

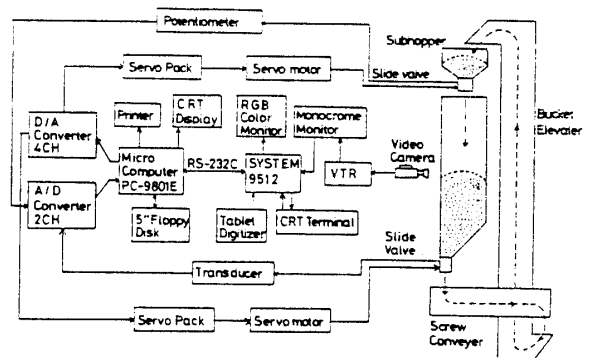


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

パ下部に設けられているスライドバルブを通して実験用ホッパに流入し、ホッパ下部に設けられたスライドバルブから排出される。排出された粉粒体はスクリーコンベア、バケットエレベータによりサブホッパに送られ、連続運転が可能となっている。サブホッパのスライドバルブの開度は0~40deg (排出量0~800g/sec)の間で連続的に変化させることができる。粉粒体として砂を用いた。この砂の物性をTable. 1に示す。

Table 1 Physical properties

Material	Sand
Mean diameter	335 $\mu$ m
Bulk density	1.53g/cm <sup>3</sup>
Angle of repose	39.0deg

実験用ホッパは非対称垂直壁型ホッパで、内のり寸法は、奥行200mm、高さ1000mm、また幅は80~240mmの間で40mmおきに可変できるようになっている。実験用ホッパのスカート部の角度は60degであり、砂の安息角より十分大きく、粉粒体の排出を容易に行うことができるようになっている。ホッパ前面はビデオカメラで

\*生産機械工学科

\*\*大学院生産機械工学専攻

\*\*\*大学院生産機械工学専攻 (現島津製作所)

内部の状態が見えるようにガラスで作られている。ホップ下部に取り付けられている排出用スライドバルブの可動範囲は0~20mm排出量(0~2000g/sec)である。Fig. 2にバルブ開度と流出量の関係を示す。バルブ開度と流出量はほぼ良好な直線関係を有していることがわかる。

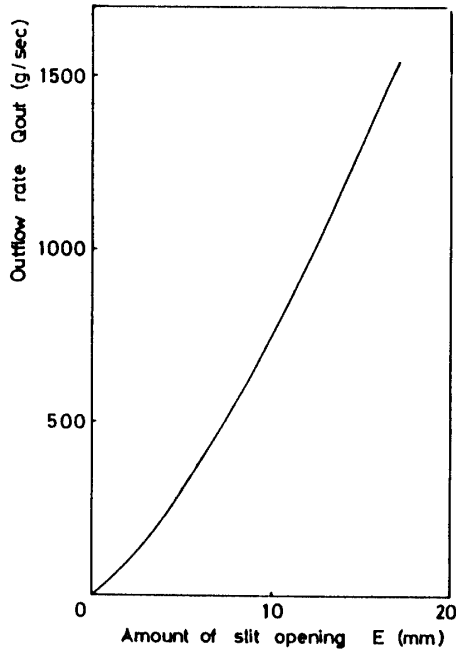


Fig. 2 Relation between outflow rate and amount of slit opening

画像処理装置は画像処理装置本体、キーボード、CRTターミナル、カラーモニタ、白黒モニタ、タブレットディジタイザなどから構成されている。ビデオカメラによってとらえられた映像は画像処理装置に1画面/30秒の速さで取り込まれ、その画像は16段階の輝度レベルを有する横512×縦480画素のデータとして画素メモリに記憶される。そして、この取り込まれた画像(原画像)に種々の処理を施すことにより必要なデータの抽出を行うことができる。また、画像処理プログラムは処理時間の短縮のためアセンブラを用いて記述した。

ビデオカメラによりとらえられた映像(ホップ内に流入された粉粒体の流動状態)はビデオテープレコーダ(VTR)を通して画像処理装置に取り込まれる。ここで、種々の処理を施された後、必要なデータはRS-232Cインターフェイスを通して、制御用コントローラであるマイコンに転送される。そこで、あらかじめ定められた制御式により操作量が決定され、D/Aコンバータを通してサーボモータを駆動し、スライドバルブを開閉することによりレベル制御を行っている。

### 3. 画像処理法

画像処理の方法<sup>1),2)</sup>としては平滑化操作、二値化操作、ラプラシアン操作などがある。平滑化操作は雑音を除去するために用いられる、ある種の平均化操作である。しかし、このために画像がぼかされエッジや線のような微細な部分を劣化させるという欠点がある。

二値化操作は画像から対象物を抽出するのに最も多く用いられる方法で、画像に閾値処理を施すことにより行われる。例えば、原画像の画素  $f$  の輝度レベルを  $Z_i$  ( $0 \leq Z_i \leq F$ ;  $0 \sim F$ は16段階の輝度レベルを表す) とし、 $t$  を  $0 \sim F$  の間の輝度レベルとすると、画素  $f$  を輝度レベル  $t$  で閾値処理した結果は

$$f_t = \begin{cases} Z_i = F & (f \geq t \text{ のとき}) \\ Z_i = 0 & (f < t \text{ のとき}) \end{cases} \quad (1)$$

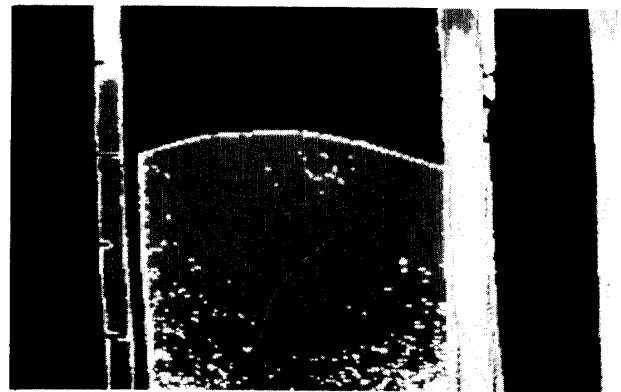


Photo. 1 Original image

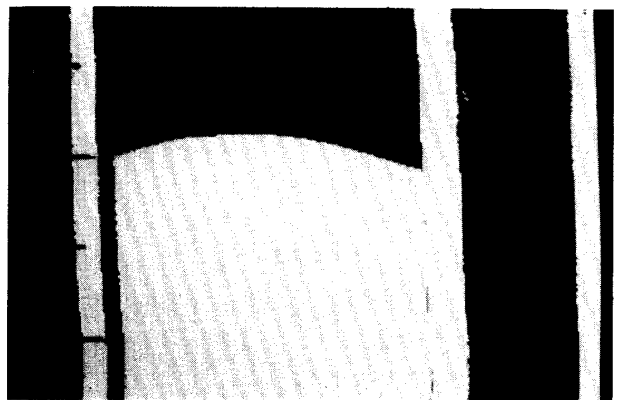


Photo. 2 Effect of threshold operation

となる。Photo. 1に原画像、Photo. 2に原画像に二値化操作を施した画像を示す。二値化操作後の画像はホップ壁と粉粒体の部分が白、他の部分が黒で表されている。

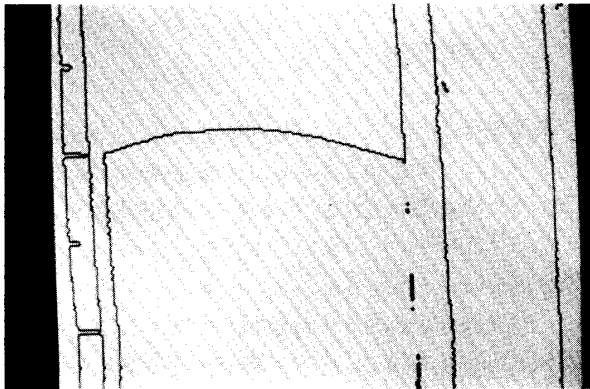


Photo. 3 Effect of laplacian operation

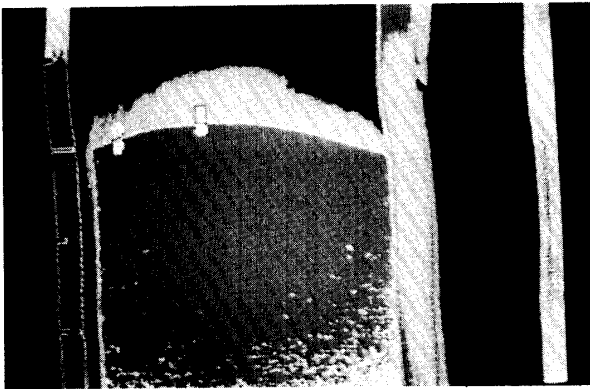


Photo. 4 Detection of level

ラプラシアン操作とは領域と領域の間の境界を線で表現するものであり、この操作を施すことにより急激な輝度レベルの変化を生じている部分が抽出され、領域と領域の境界を明確に表すことができる。Photo. 3に二値化操作を行った画像に、さらにラプラシアン操作を行った結果を示す。二値化操作を行った画像における白と黒の境界のみが黒い線で表されているのがわかる。

本実験では上記の処理をソフトウェアで行っているため、全画素に対しこの3操作を施すと約3分30秒を要し、このため画像処理装置を用いた制御システムを構成することが困難となる。そこで、以下のような方法で画像処理時間の短縮を図った。

まず、平滑化操作については雑音を取り除くというメリットがあるが、粉面を線で表現するうえで、ほとんど影響を及ぼさないので省略することにした。二値化操作については、輝度レベル4以上は輝度レベルFの白、輝度レベル4未満は輝度レベル0の黒とした。また、この操作を全画素に対して行うのではなく、Fig. 3(a)のようにx=1, y=1を基点としたa<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub>の

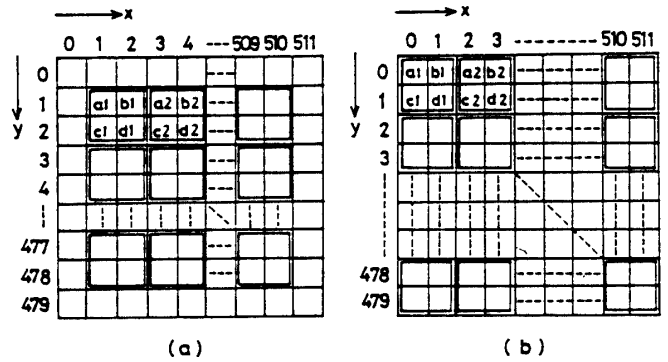


Fig. 3 Threshold and laplacian operation

4画素を1ブロックと考え、a<sub>1</sub>に対して二値化操作を行い、その処理結果を1ブロック(a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub>)に格納する方法をとった。以下同様につきのブロック(a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>, d<sub>2</sub>)についても行い、順次、全画素に処理を施した。また、ラプラシアン操作としては二値化操作と同様にFig. 3(b)に示すようにx=0, y=0を基準とした4画素(a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub>)を1ブロックと考え、次式で示される処理を行い、その結果をブロックの全画素に格納した。

$$|a-d| + |b-c| \tag{2}$$

この操作を二値化操作と同様に全画素に施した。以上の操作を1画面(512×480画素)に施すことにより、処理時間を約6.6秒にまで短縮することができた。

ここで、さらに処理時間の短縮を図るために画像処理を施す面積をある一部分に限定した。まず、視野の

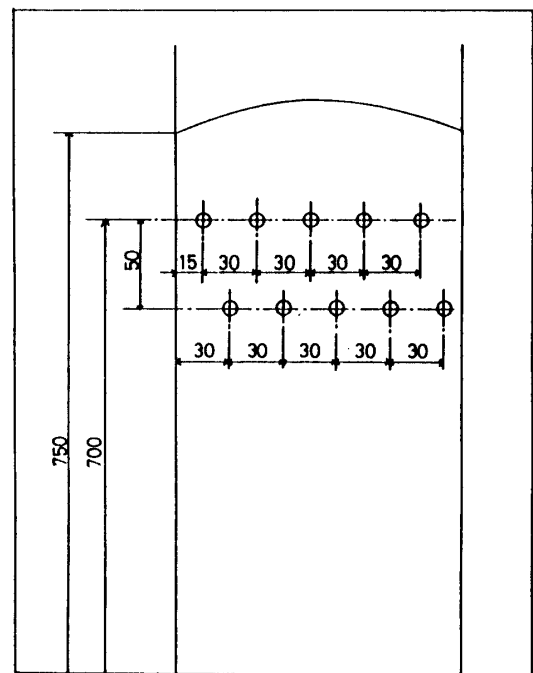


Fig. 4 The disposition of tracers

最上部から下方に向かって順次輝度レベルを比較し、その差が4以上になったときの点を粉面であると判断する。この点を中心に上に32画素、下に16画素、左右各8画素の範囲のみに二値化、ラプラシアン操作を施すことにより、層高の検出を行った。実際の処理例をPhoto. 4に示す。このように処理面積を大幅に縮小することによりレベル検出に要する時間を約0.26秒にまで短縮することができた。

#### 4. ホップ内部の流動状態の観察

粉粒体貯槽内の流動状態はマス・フロー状態とコア・フロー状態に分けることができる<sup>3)</sup>。コア・フロー状態とは流動状態が均一でない状態をいい、貯槽内にデッドスペースと呼ばれる部分が長期間残留するので、この状態は貯槽としては不適當である。一方、マス・フロー状態とは貯槽内の大部分の流動状態が均一な状態をいい、この場合は上述のような現象は発生せず、また長期間にわたって粉面が一定に保たれるために、レベル制御を容易に行うことができる。そこで、まず最初にホップ内部の粉粒体の流動状態を調べた。その方法として、トレーサをホップ内に投入し、その動きを観察することにより粉粒体の流動状態を調べた。

##### 4.1 実験方法

実験用ホップの容器幅を120~240mmの範囲で40mmおきに変化させ、各々の場合についてトレーサをホップ前面に配置し、流入量、流出量を変化させ実験を行った。また、このときの粉粒体の流動状態をVTRで記録した。

トレーサとしては1/8角の大豆を黒色に着色したものをを用いた。トレーサの位置としてはFig. 4のように、層高650mm、ホップ左端30mmのところから30mmおきに、また層高700mm、ホップ左端15mmのところから30mmおきに二段に配置し、その上に層高750mmまで粉粒体を入れ、その状態から流入および流出の両バルブを開けて粉粒体を降下させた。

VTRによりとらえた映像をある時間ごと(降下速度により約0.2~2秒)にサンプリングし、このサンプリングされた原画像に二値化操作施すと、トレーサは黒い点としてディスプレイ上に現れる。そこで、この位置の座標をタブレットディジタイザを用いて検出することにより、トレーサの軌跡を求めた。また、VTRには計時機能があり、トレーサの流下状態とともに1/100秒刻みの時刻が記録されているので、この時刻をもとに粉粒体の降下速度を求めた。

実験は粉粒体の流出のみを行った場合を非定常状態、流入のみでなく流出も同時に行った場合を定常状態と呼ぶことにし、それぞれの場合について実験を行った。

##### 4.2 トレーサの流下軌跡と降下速度

Fig. 5, Fig. 6は容器幅200mmのときの、それぞれトレーサの軌跡(Fig. 5)と、降下速度をベクトル表示したもの(Fig. 6)の一例である。トレーサは各容器幅に

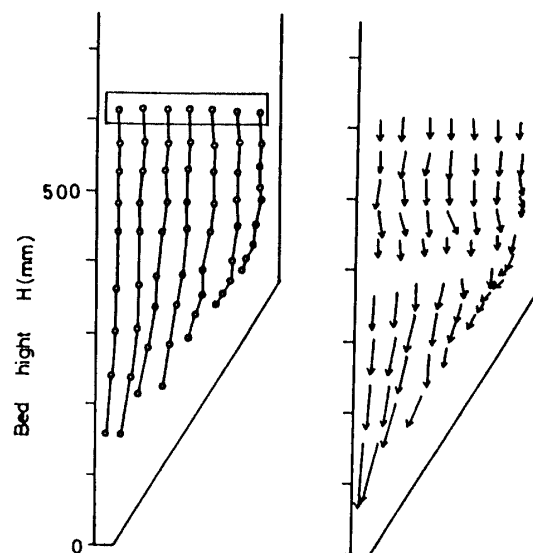


Fig. 5  
Locus of tracers

Fig. 6  
Velocity vectors

ついて上下2段に配置しているが、便宜上、ここでは下段に配置したトレーサの動きについてのみ示した。画像のサンプリング周期は約2秒である。

Fig. 5の小円がトレーサの位置を表しており、各小円を結ぶ線が流線となる。また、枠内にある小円が初期のトレーサの位置である。この図から、ある層高まではトレーサはほぼ一様に降下しており、その層高を過ぎるとトレーサの位置により降下速度が異なってくるとともに、ホップのスカート部の影響により左方に流れる。Fig. 6は降下速度をベクトル表示したものであるが、ベクトルで表現することにより粉粒体の降下速度の方向と大きさがよくわかる。

##### 4.2.1 非定常状態の場合

Fig. 7に容器幅を160mm、流入量を $Q_{in}=0$ とし、実験用ホップのスライドバルブ開度をパラメータとしたときの各層高における速度の変化について示す。ある層高に達するまでトレーサの速度はほぼ一定であり、それ以後はトレーサの速度はその初期位置により変化している。これはある層高で流れの状態が変化している

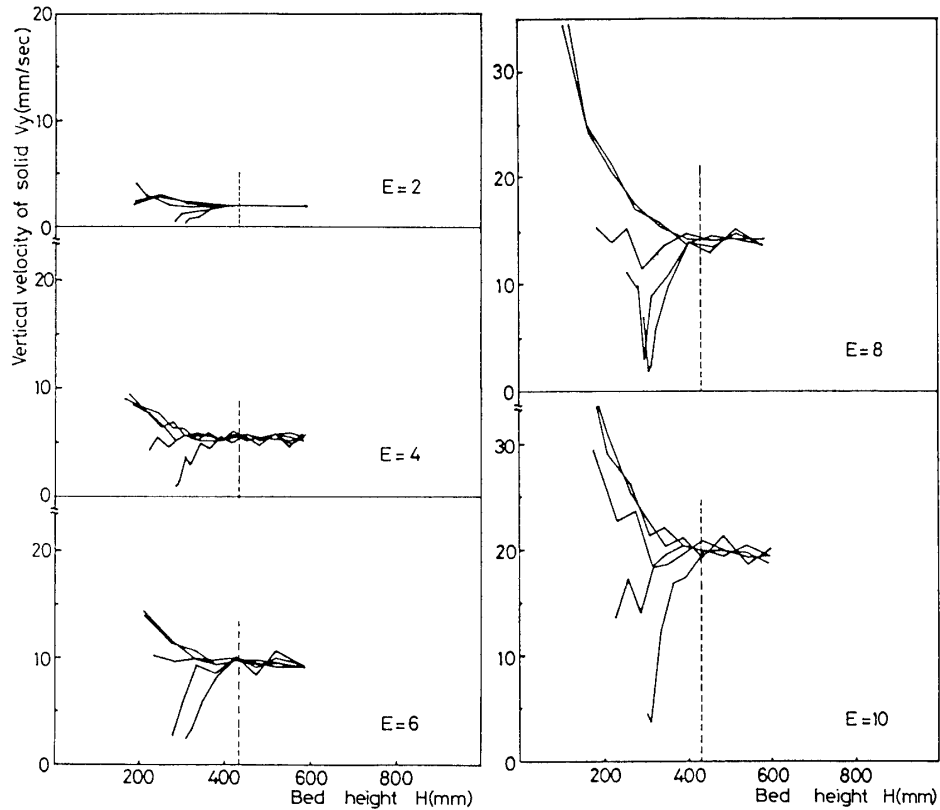


Fig.7 Relation between vertical velocity of solid and bed height (B=160 : Qin = 0)

ことを示している。この層高を転移層高と名付ける。各図中における破線が転移層高の位置を表している。転移層高は容器幅が一定の場合、排出用スライドバルブ開度、すなわち流出量にかかわらずほぼ一定となっている。また、流出量が増すほど転移層高までの平均速度は、直線的に速くなっており、降下速度の垂直方向成分の変動幅も大きくなっている。これらのことは他の容器幅についても同様である。Fig. 8に各容器幅における転移層高までの平均降下速度とバルブ開度(流出量)の関係を示す。転移層高より上部では流出量と平均降下速度はほぼ比例関係にあることがわかる。

4.2.2 定常状態の場合

Fig. 9は容器幅を160mmとし、流入量 $Q_{in}$ と流出量 $Q_{out}$ の差を $Q_{in} - Q_{out} = 0$ としたときの、降下速度の垂直方向成分と層高の関係を、バルブ開度をパラメータとして示したものである。非定常状態と同様に、ある層高に達するまでトレーサの速度は一定であり、それ以後は各位置のトレーサの速度は変化し始める。また、流出量が増加するにつれて転移層高までの平均速度は増加し、速度の変動幅も大きくなっている。この場合も転移層高は容器幅が一定のとき、流出量にかかわらず一定となっている。

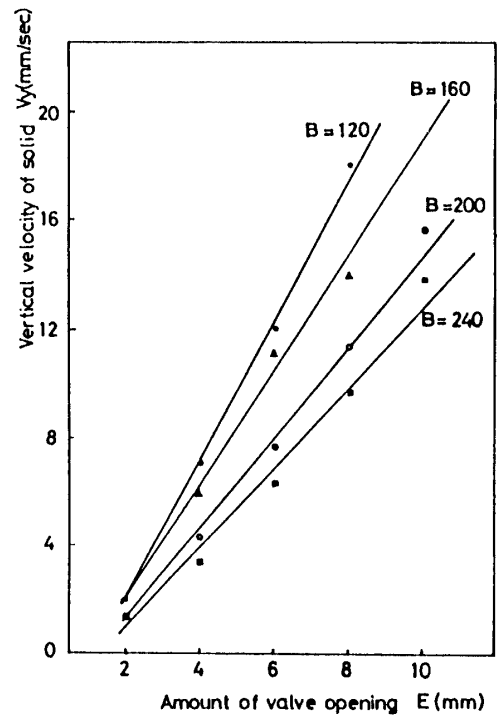


Fig. 8 Relation between vertical velocity of solid and amount of valve opening (Qin = 0)

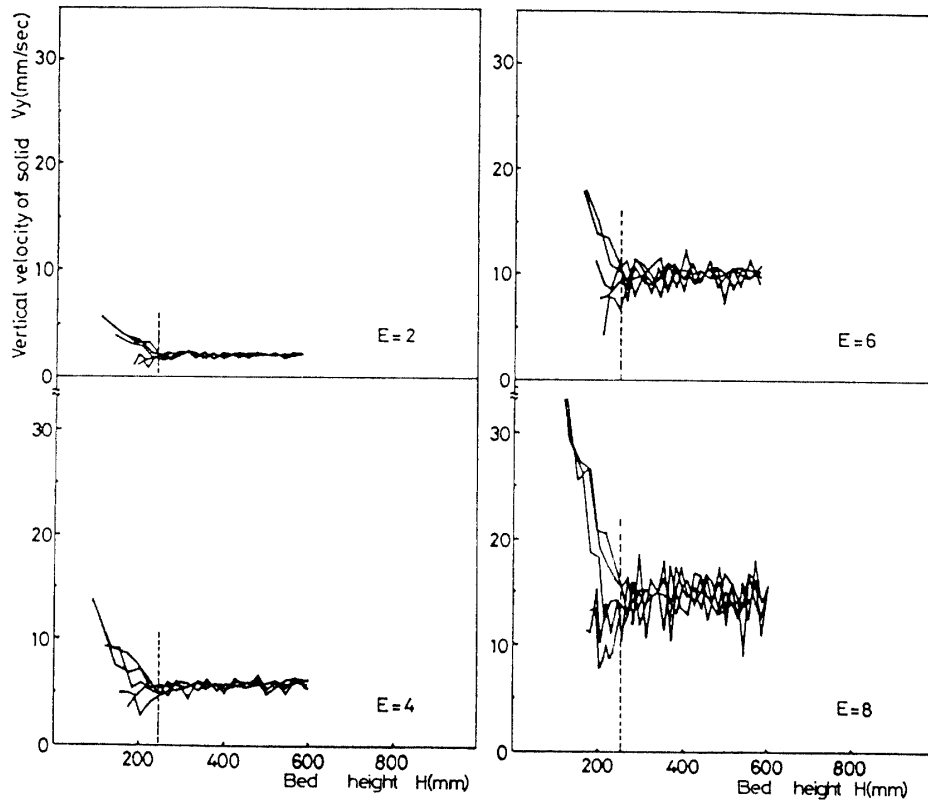


Fig.9 Relation between vertical velocity of solid and bed height  
( $B=160 : Q_{in}-Q_{out} = 0$ )

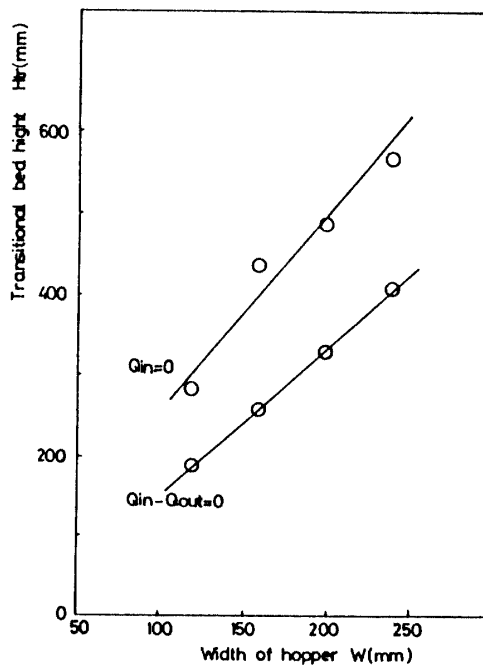


Fig. 10 Relation between transitional bed height and width of hopper

Fig. 10に定常状態と非定常状態における転移層高と容器幅の関係を示す。これから転移層高とホッパーの容器幅は直線関係にあることがわかる。また、定常状態より非定常状態の方が転移層高が高い。このことは定常状態の方がマス・フロー領域が広いということを意味している。これは砂の流入により流動境界線が側壁から離れる位置が低くなったため、マス・フロー領域が拡大したものである。

以下に述べるレベル制御はこのマス・フロー領域で行った。

### 5. レベル制御

#### 5.1 システムのブロック線図

Fig. 11に制御システムのブロック線図を示す。(a)はシステムの構成要素で表したものであり、(b)はこれを伝達関数表示したものである。システムはホッパー、コントローラ、サーボモータ、減速ギア、ボールスクリュウ、スライドバルブなどから構成されている。むだ時間要素は前述した画像処理に要する時間である。Rは設定値、 $\tau$ はサンプリング周期、 $Y(z)$ は制御量すなわち層高である。本システムは積分要素を多く含んでいるためコントローラとしては次式で示される位置形PD制御式<sup>4)</sup>を用いた。

$$G_c(z) = K_P + K_D \frac{z-1}{z} \quad (3)$$

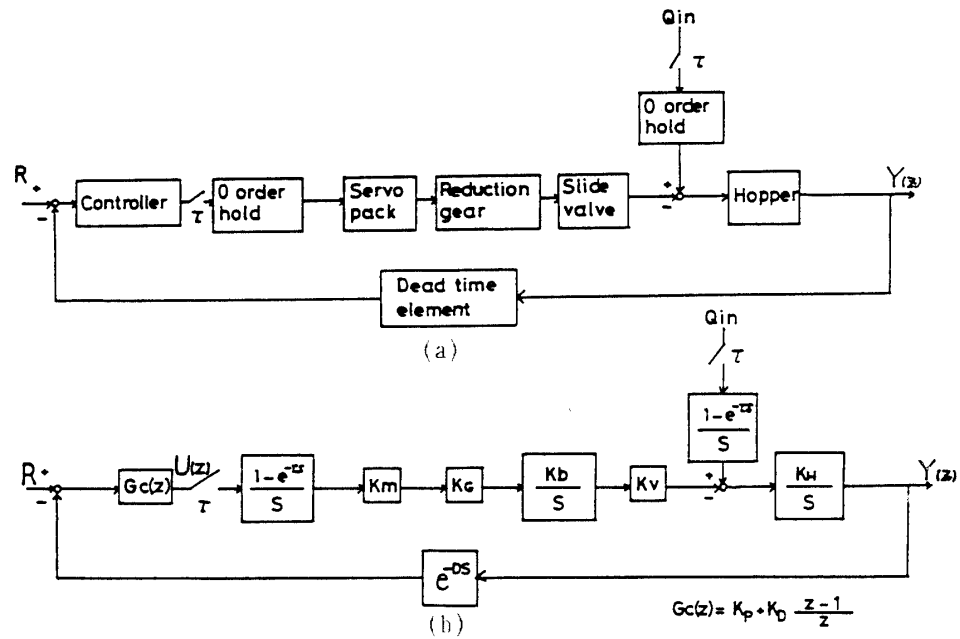


Fig. 11 Block diagram of control system

## 5.2 ビデオカメラと層高の位置関係

制御を行うに際してビデオカメラをホッパ前面のある高さに固定した。この状態を示したのがFig. 12である。ここで、枠内がビデオカメラの視野である。このために粉面とビデオカメラの位置関係には次の3つの状態が存在する。すなわち、①カメラの視野よりも粉面が上にありカメラに粉面が写っていない場合、②粉面がカメラの視野内にある場合、③粉面がカメラの視野よりも下にある場合である。②の場合については前述の処理を行い、レベルを検出する。①、③の場合については次のような方法でその判断を行っている。まず、視野の最上部の輝度レベルのデータを取り、順次下方に向かって粉面の有無を調べる。粉面の有無は輝度レベルの差により検出する。もし粉面があれば3章に述べた方法で処理する。粉面がない場合、つまり、輝度レベルの差のなかった場合は、最下部の輝度レベルと最上部の輝度レベルの比較を行う。このとき、その差が3以下であれば砂がないとし、4以上ならば全体が砂であると判断する。これは映像を取り込むときにホッパの下方から照明を当てており、ホッパ内に砂がある場合は下方が明るく、上にいくにしたがって暗くなる。また、粉粒体がない場合はホッパの内壁を黒に着色しているため、照明を当ててもホッパの上下で輝度レベルにあまり差が生じないことからこのような判断を行った。制御に関しては①の場合はカメラの視野の最上端を、③の場合は視野の最下端を層高として処理を行った。

## 5.3 実験結果

実験は容器幅160mm、流入量を一定( $Q_{in}=262\text{g/sec}$ 、また供給用スライドバルブの開度を14.9deg)とし、ゲイン $K_p$ 、 $K_D$ および初期層高を変化させて行った。また、サンプリング周期については画像処理時間が約0.26秒まで短縮できたことから $\tau=1\text{sec}$ とした。この時の応答波形の一例をFig. 13, Fig. 14に示す。

Fig. 13は初期層高750mm、設定層高650mm、初期バルブ開度0、 $K_p=0.001$ 、 $K_D=0.06$ 、また粉面がカメラの視野内にある場合の応答波形である。Uが操作量、Hが層高、Eがバルブ開度、そして、点線は設定層高を表している。層高は70秒ほどではほぼ整定している。Fig. 14は初期層高500mm、設定層高700mm、初期バルブ開度0、 $K_p=0.001$ 、 $K_D=0.01$ とし、初期層高がカメラの視野よりも下にある場合である。最初の20秒ほどは層高がカメラの視野よりも下にあり、視野の最下部を層高として処理しているため、層高に平らな部分が生じている。実際の層高の変化は一点鎖線で示されている。応答波形はオーバーシュートもほとんどなく55秒ほどで整定している。

## 6. 結 論

本研究において、画像処理時間の短縮を図ることにより画像処理装置を検出端とした制御が可能であることが判明した。さらに、画像処理を用いてホッパ内部の流動状態を調べた結果以下のことがわかった。



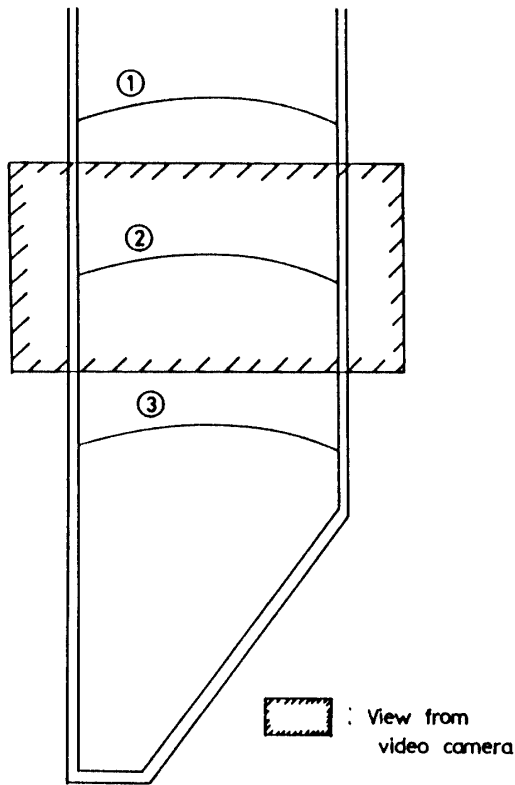


Fig. 12 Relation between pattern and position of video camera

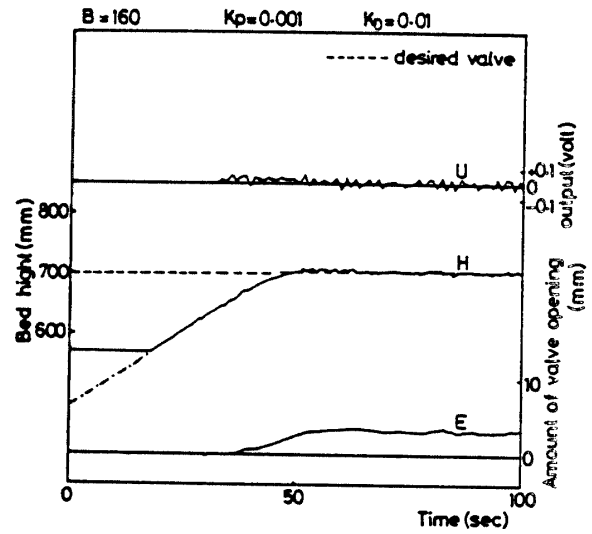


Fig. 14 Response of PD control for the step reference input (level control)

- 1) 定常, 非定常の各場合についてホップの容器幅を一定にしたとき, 転移層高はほぼ一定であり, ホップの容器幅を大きくすると転移層高は高くなりマス・フロー領域は減少する.
- 2) 定常状態の方が非定常状態より転移層高は低く, マス・フロー領域は拡大する.

参考文献

- 1) 安居院猛, 中嶋正之: コンピュータ画像処理, 産報出版 (1979)
- 2) 長尾真: デジタル画像処理, 近代科学社 (1978)
- 3) 上滝具貞, 早野延男, 山中久人: 角型粉体貯槽におけるマス・フロー発生条件 (第一報), 日本機械学会論文集, No. 366 (1977)
- 4) 山下直, 保志尚: デジタルプロセス制御, コロナ社 (1969)

(昭和62年 4 月15日 受理)

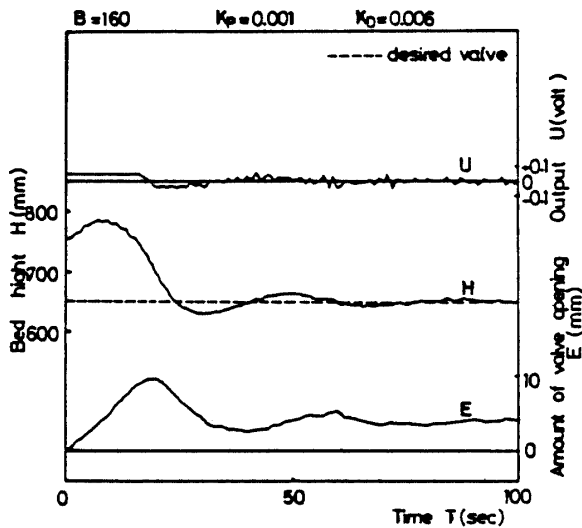


Fig. 13 Response of PD control for the step reference input (level control)