

閉塞現象を回避したホッパー構造からの 粉体の重力排出特性

川原秀夫*・池本義則**・田原康熙**

Gravity Discharge Characteristic of the Powder from the Hopper- Structure which avoided the Blockage Phenomenon

Hideo KAWAHARA, Yoshinori IKEMOTO and Yasuteru TAHARA

Abstract

The vibrating feeder which has generally been used has its flow control devices installed on the outside of the hopper discharge. This paper presents a gravity discharge characteristic of a powder from hopper that used rubber film vibration by air pressure. The structure of proposed hopper is the double structure which inserted soft container in the conical rigid container. The result of the experiment revealed that proposed hopper was effective for the bridging of the powder. And the discharge of the powder affects the timing of aerial supply pressure and applying pressure.

Key Words: hopper, Gravity discharge, Bridging, Air pressure, Rubber film, Vibration

1. 緒言

近年、粉体のハンドリング（貯蔵・供給・輸送）には、高品質、省資源、省エネルギー、環境保全、衛生的ということが重要視され、粉体の精密なハンドリングと管理が厳しく要求されている。特に医薬品、磁性粉体、顔料などの高付加価値粉体や新素材開発の分野で微粉体の精密供給に対する要求が最近ますます高まっている。これまであらゆる粉体を扱う各種工業分野において、その処理工程で粉体の計量や搬送のためにホッパーが使用されている。このホッパーは、通常金属や剛性の強い合成樹脂で形成されている。流動性の不良な粉体は、ホッパー内で粉体が閉塞するブリッジを形成しやすく、ホッパーからの粉体の排出が困難になる。

従来、上記の問題を解決する手段として、ホッパーを構成している壁面の傾斜角度を大きくし、粉体とホッパー内壁との摩擦を小さくする方法が考えられるが、これではホッパー全体の容積を小さくしてしまう問題が発生する。またホッパーの排出口を大きくする手段も考えられるが、ホッパーからの粉体の排出量の制御が困難になる。さら

にこれらの構造的手段に加えて、ホッパーに衝撃や振動を加える方法や、ホッパー内に圧縮空気を吹き込んで粉体を分散させるエアレーションといった方法も考えられている。しかし前者では、騒音が発生し、ホッパーに衝撃や振動に耐えうる強度を持たせる必要が生じ、さらには粉体を却って固着させてしまう問題が発生する。また後者では、ブリッジが発生している粉体の特に上端部分を切り崩すことができないと共に、ラットホールが発生した場合には、空気がその穴から通り抜け効果を発揮することができない。

したがってこれらの問題点を克服するため、ホッパーを構成しているコーン状の剛性容器内に、同じくコーン状で軟質材製の軟性容器を挿入した2重構造の新たなホッパー構造を提案する。具体的には、剛性容器と軟性容器との間に気密空隙部を形成させ、剛性容器に通気管を連通し、この通気管から気密空隙部に圧縮空気を供給する。これにより軟性容器はホッパー中心部に向かって自在に膨出することが可能になり、閉塞状態にあるホッパー内の粉体構造を破壊させ、粉体の流動を円滑にすることができる。このホッパー構造は、あ

くまでも基本構造であり、使用用途に応じて粉体の排出構造を正圧・負圧を利用する方式に分類される。

本研究では、提案した構造がホッパー内で発生している粉体のブリッジ構造に対する有効性について検討し、気密空隙部への供給圧力あるいは印加する圧力変動のタイミングが粉体の排出量に与える影響を実験的に調査し、精密な粉体の定量的供給の可能性について検討する。

2. 実験方法

2.1 ホッパー構造

粉体がビンあるいはホッパーの開口部から重力の作用で自然流出するためには、粉体がブリッジを形成しないように開口部の寸法がある一定以上であることが必要である。しかし、粉体がブリッジを形成している場合でも容器に衝撃や振動を加え、ブリッジを破壊すると流出する場合がある。提案した2重構造のホッパーもこの性質を応用したものである。

まず、ホッパー内で発生している粉体のブリッジについて観察を行った。図1は透明のアクリル製容器を用いた2次元ホッパー内の粉体の状態を示している。なお、使用した粉体はJIS試験用粉体2種のけい砂(第2種)である。粉体の性状については後に述べる。粉体はホッパー内のある位置で、傾斜面に対してブリッジを形成し、上部の粉体の流れを停止させている。この状態で外部からホッパーに振動を加えるとブリッジは破壊し、粉体は開口部に向かって流れるが、振動が停止すると再びブリッジが形成される。

上述のように、ホッパー内で繰り返し発生するブリッジを回避するため、ホッパー内に軟性容器を挿入した2重構造のホッパーを提案した。図2は提案したホッパー内部の粉体流動の様子を模式化したものである。コーン状のステンレス製容器($t_1=1\text{mm}$)の内側に軟質材であるゴム製容器($t_2=0.5\text{mm}$)を挿入した2重構造になっており、これらの容器の間には気密空隙部が形成される。図2(a)に示すようにホッパー内でブリッジが形成されると、図2(b)に示すように通気管から圧縮空気が供給され、ゴム製容器が振動して閉塞状態にある粉体の流れを円滑にさせる構造になる。なお、供給された空気は排気管より大気中へ放出される。実際の装置では、圧縮空気は、空気回路中に設置された電磁弁の開閉によって断続的に気密空隙部へ供給され、ホッパー内部のゴム製容器に振動を与える。

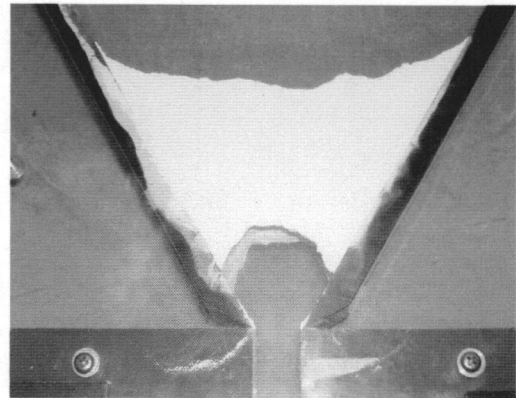


Fig.1 Bridging of a powder in 2-D hopper

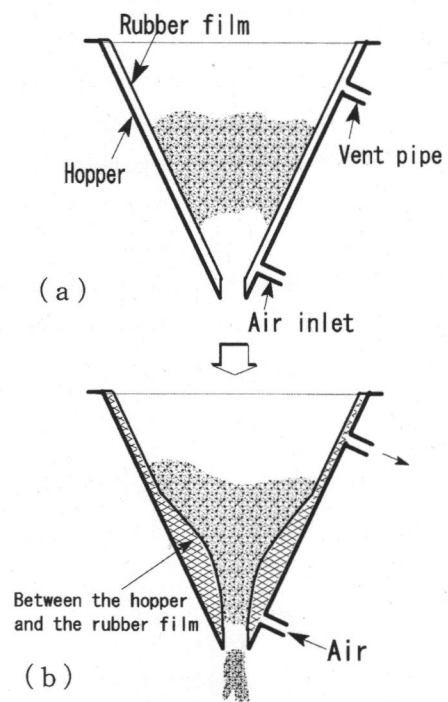


Fig.2 A schematic illustration of the mechanism of powder supply by rubber film vibration

2.2 実験装置

図3は実験装置の概観図を示す。ホッパーの形状は高さ $L=420\text{mm}$ 、直径 $\phi=396\text{mm}$ の円錐形状を有し、傾斜角度 $\theta=60\text{deg}$ である。なお、ホッパー下部の開口部の大きさは $\phi 30\text{mm}$ とした。剛性容器と軟性容器との間の気密空隙部には、コンプレッサから発生した圧縮空気がドライヤを介し、減圧弁により適切な圧力に調整された後、電磁弁を通過して供給される。この電磁弁の開閉を繰り返すことにより、軟性容器を振動させる。ホッパーからの粉体の排出量の計測には、ホッパー全体の重量をロードセル(KYOWA製, LTZ-50KA)を用いて重量の時間変化から算出した。また、ホッパー内部

の気密空隙部の圧力変動 (2 箇所) 及び電磁弁とホッパーとの間の配管内の圧力変動を捉えるため、ひずみ式圧力変換器 (KYOWA 製, PGM-2KC) を使用した。発生した電気信号は動ひずみ計 (KYOWA 製, DPM-601A) を介してパーソナルコンピュータでデータ処理を行った。さらにホッパー内部の粉体の挙動を捉えるため、デジタル CCD ビデオカメラ (SONY 製, DCR-PC109) で撮影した。

実験条件として、本研究では気密空隙部へ供給する空気圧力を 20~80kPa、さらに電磁弁の開閉時期を開 (ON) : 0.5~2.0sec、閉 (OFF) : 2.0sec と固定した。実験に使用する粉体の条件として、外部から振動を与えない状態で、ホッパーの開口部から重力の作用で自然流出しない粉体を予め実験に確認した。

その結果、JIS 試験用粉体であるフライアッシュ (5 種) とけい砂 (2 種) を実験用粉体として採用した。なお、図 4 に粉体の粒子表面の電子顕微鏡写真と粉体の性状⁽⁷⁾を表 1 に示す。

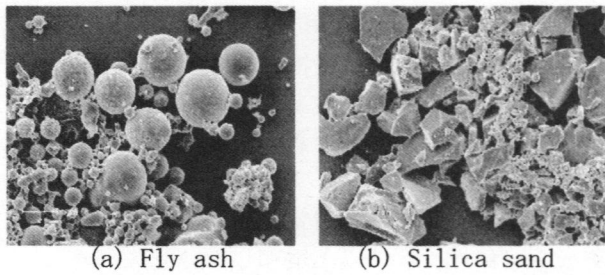


Fig.4 Micrograph of a powder surface

3. 実験結果

先ず供試粉体として、フライアッシュ (5 種) を用いた時の重力排出特性について検討した。図 5 は供給圧力と粉体重量の時間変化を電磁弁の開閉時期との関係から整理したものである。なお、電磁弁の開時間 t_o は 0.5~2.0sec まで変化させた。全体的な傾向として、供給圧力が増加すると粉体の排出時間が短縮され、電磁弁の開いている時間 (ON) が長くなる場合でも同様な傾向を示すが、供給圧力が高い領域になるとその傾向は小さくなる。また粉体重量は、振動が開始した直後からほぼ直線的に減少しているが、ある粉体の重量に達すると、急激に排出量が増加し、この傾向はホッパー内の粉体が全て排出されるまで継続される。この変曲点は全ての条件において現れており、その範囲は粉体重量の 2.0~3.0N の中に入っている。この領域において粉体の排出量に変化が発生するのは、ホッパー内部の粉体の流動形態が開口部の真上の部分を中心に流動範囲が拡大するファンネルフローから、粉体層全体が平均的に沈下するマ

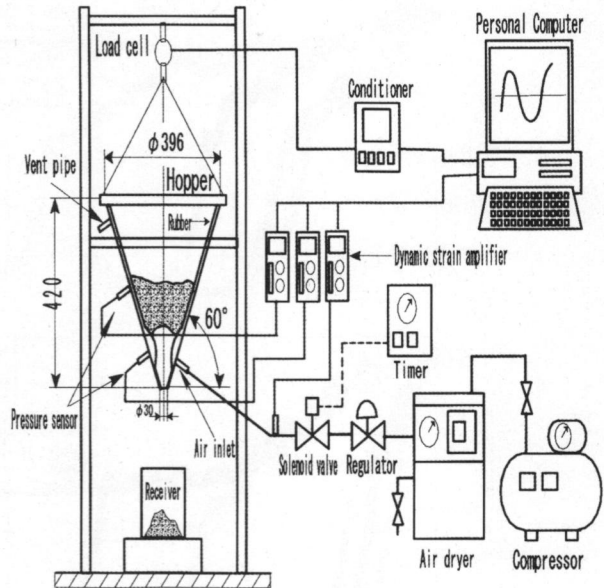


Fig3 Experimental set-up

Table 1 Property of powder

	Fly ash	Silica sand
Particle size d [μm]	13~17	27~31
Density ρ [g/cm^3]	2.0~2.3	2.6~2.7
Main component	SiO ₂ :45% over	SiO ₂ : 95% over Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , TiO ₂

スフローへと変化したからである。

図 6 は供給圧力に対する変曲点に達するまでの領域において、単位時間当たりの排出量の変化を示す。なお、図中には各々の電磁弁の時間に対して、ホッパー内の粉体の流動が開始する供給圧力の限界値を併せて示す。全体的に供給圧力の増加に伴い、曲線的に排出量が増加する。また電磁弁の開いている時間変化に対する排出量は、 $t_o=0.5\text{sec}$ に対して $t_o=1.0\text{sec}$ では $P=80\text{kPa}$ の場合、排出量は約 2 倍以上増加している。さらに $t_o=1.0$ 以上では、排出量に著しい変化は観察されず、一本の曲線に収束していく傾向にある。

一方、図 7 は供給圧力に対する変曲点以降の領域における単位時間当たりの排出量の変化を示す。供給圧力の変化に対して、規則的な傾向は現れていないが、排出量は供給圧力の変化に対して 7.0~15g/sec の範囲で変動しており、図 6 で示した排出量の約 3 倍であることがわかった。

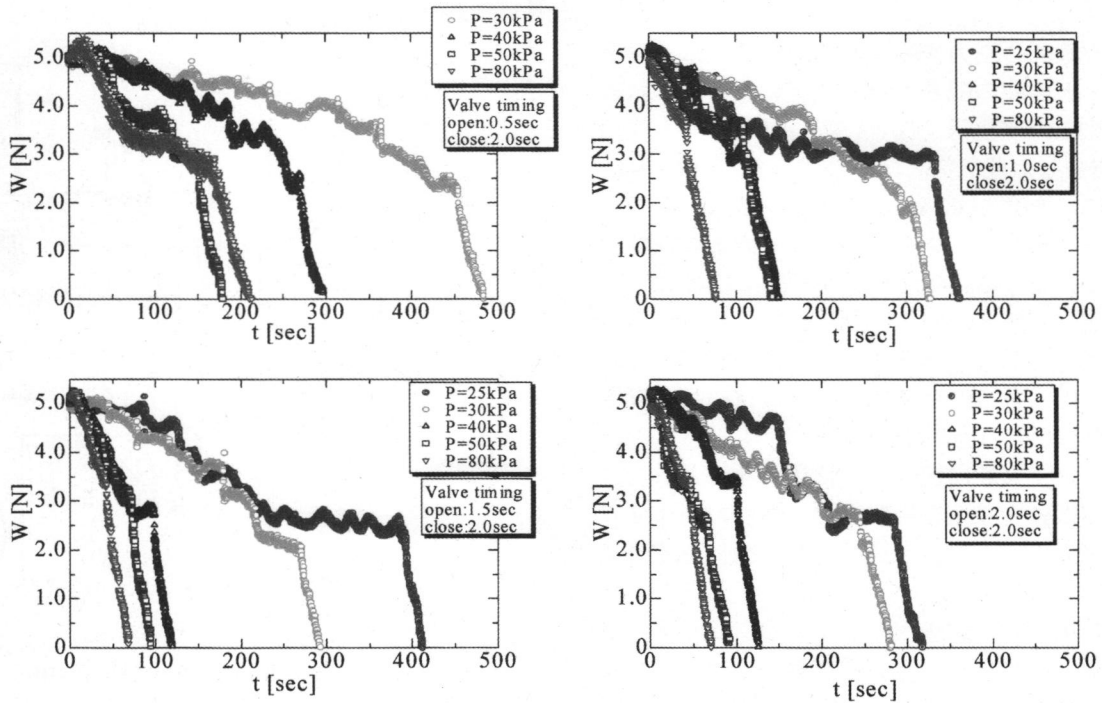


Fig.5 Time histories of the powder weight for fly ash at $t_0=0.5-2.0$ sec

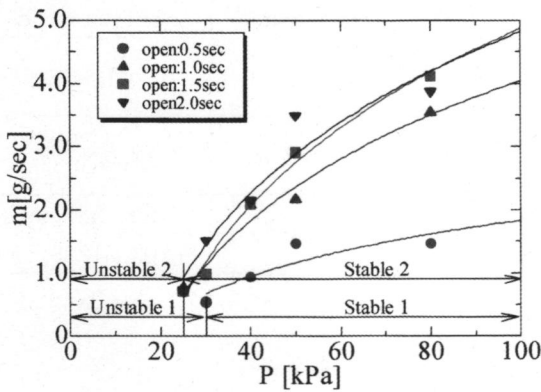


Fig.6 Relationship between supplies pressure of air and flow rate

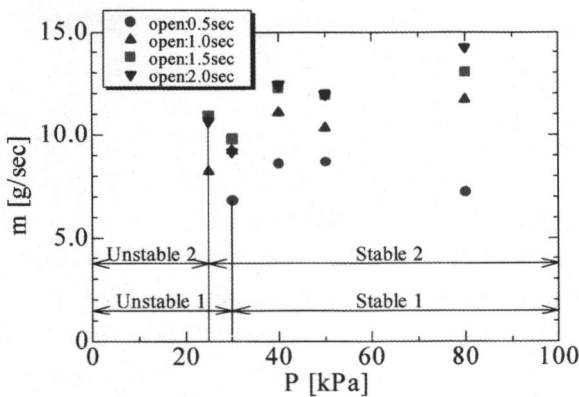


Fig.7 Relationship between supplies pressure of air and flow rate

次に、供試粉体としてけい砂 (2 種) を用いた時の重力排出特性について検討した。図 8 は供給圧力と粉体重量の時間変化を電磁弁の開閉時期との関係から整理したものである。全体的な傾向は図 5 で示したフライアッシュと同様な傾向を示しているが、各々の条件に対する排出時間は、フライアッシュに比べ 5 倍以上増加している。さらに、時間変化に対する排出重量曲線は、フライアッシュの場合に比べ階段状に減少しており、明らかに粉体の性状の違いによって、発生したものであると考えられる。この排出重量曲線では、単位時間当たりの排出量を算出することが困難であるため、このけい砂特有の排出量について詳細に検討した。

図 9 は、図 8 で示した電磁弁が開いている時間 $t_0=1.0$ sec、供給圧力 $P=80$ kPa について、時間 $t=400 \sim 700$ sec の間における排出量の変化とこれに対応するホッパー内部の粉体の状態をホッパー上部から捉えた写真を示す。 $t=400 \sim 500$ sec では、ホッパー内部の粉体はホッパー中心部に凹部が発生し、開口部からは微量の粉体が排出され、ブリッジの大きさが拡大している。 $t=500$ sec 以上になると、急激に粉体重量が減少している。これはホッパー内部で拡大していたブリッジが破壊したからであり、このためホッパーの中心部には開口部まで貫通した穴が形成されている。その後 $t=520$ sec 以降になると、再び緩やかな減少曲線に変化しているが、これはホッパー内壁面に付着していた粉体が剥がれ、ホッパー中心部へ流出したからである。このような現象は、けい砂の場合粉体が全て

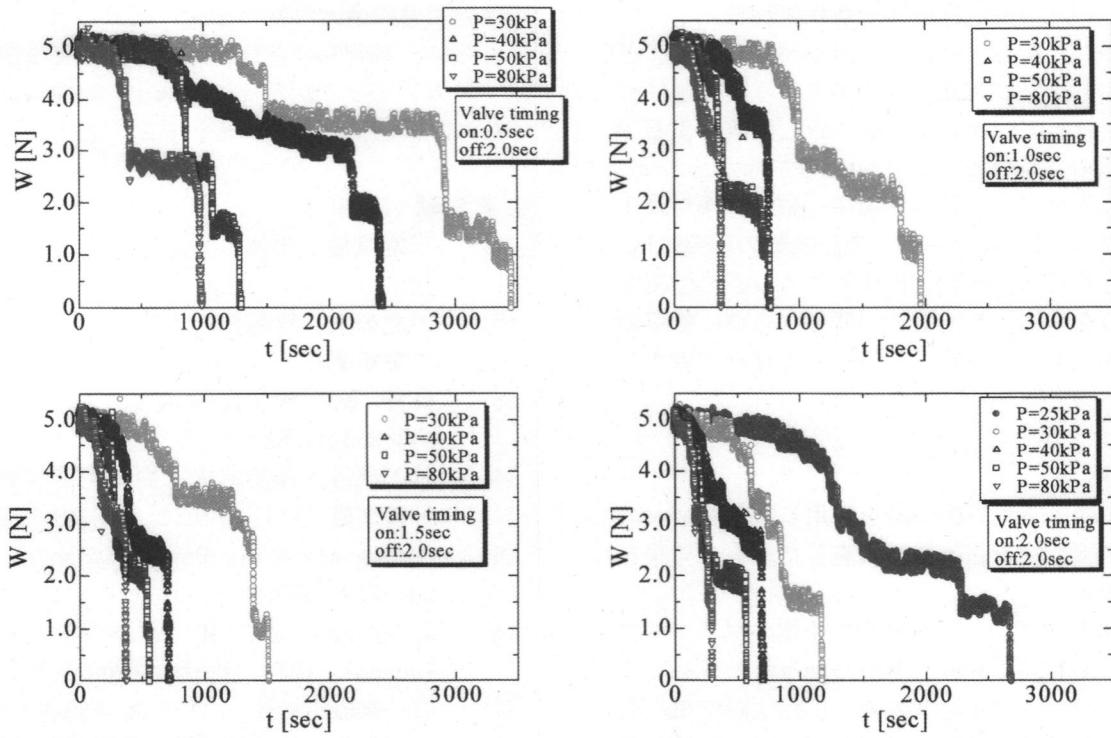


Fig.8 Time histories of powder weight for silica sand at $t_0=0.5\text{-}2.0\text{sec}$

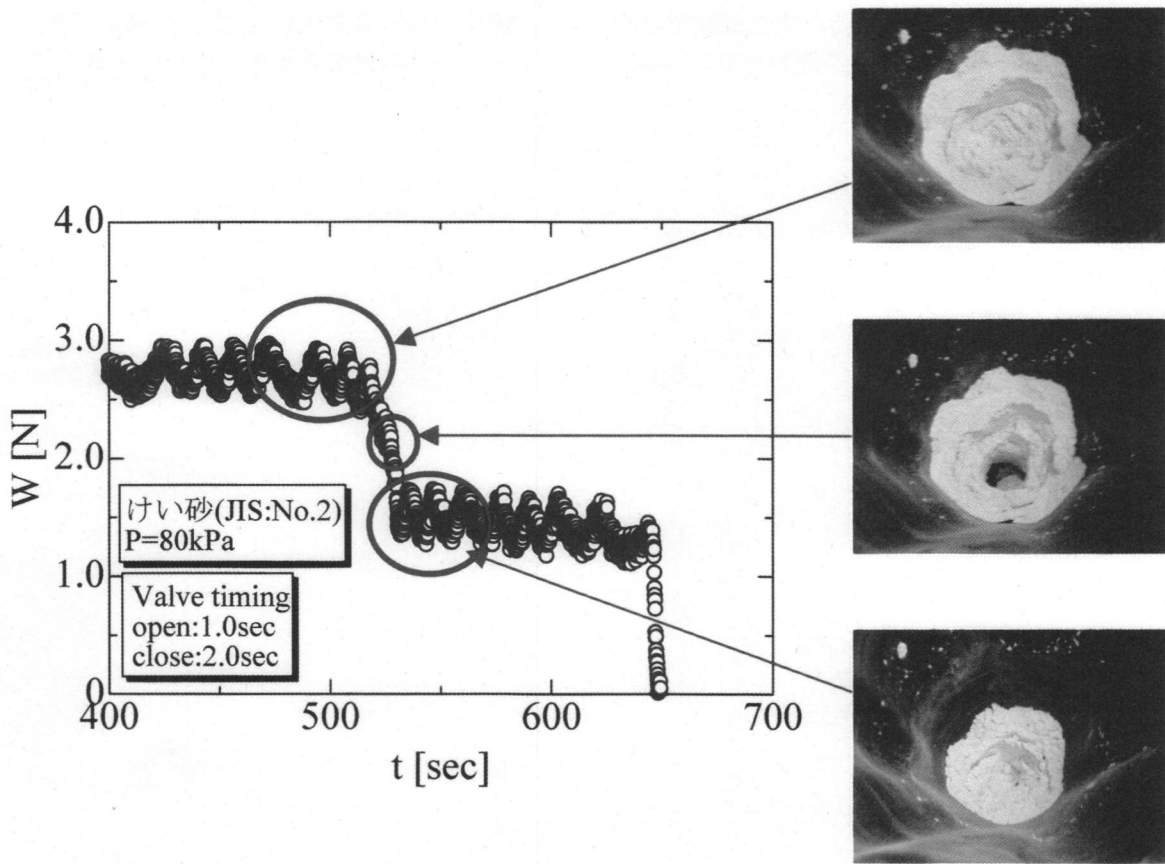


Fig.9 Relationship between discharge rate and powder flow movement of the inside hopper

ホッパーから排出されるまで継続される。

以上のことから、提案したホッパーにより、どの程度定量排出が可能となるかという定量性については言及していないが、繰り返し実験による平均排出量の平均値に対する変動率でみると、±2～10%程度となり、粉体の種類、振動の条件によって異なることがわかった。流動変動の要因には、ホッパー内で形成される粉体のブリッジの位置と供給圧力を印加する位置との関係ならびに振幅の変動の違いが考えられ、今後詳しく調べて報告したい。

4. 結論

空気圧によるゴム膜振動を利用したホッパーの粉体の排出特性を基礎的に調査した。その結果を以下に示す。

- (1) 提案したホッパー構造は、粉体のブリッジに対して有効であることがわかった。
- (2) ホッパー内の気密空隙部へ供給する空気圧力および電磁弁が開閉時期の変化は、粉体の排出量に大きな影響を与えることがわかった。

最後に本研究に対して、本校教官である尾形先生から有益な助言を受けている。また実験では平成15年度卒業研究学生(現:三菱レーヨン(株))

廣實忠司君に多大な協力を頂いた。

さらに、本研究の遂行にはやまぐち産業振興財団・アカデミック活用促進事業⁽⁸⁾の補助を得ている。ここに付記し、それぞれ感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 三輪茂雄: 粉体工学通論, 日刊工業新聞社
- (2) 川北公夫: 粉粒体のトラブル対策, 日刊工業新聞社
- (3) 斉藤 誠: 粉体工学会誌, Vol. 29 No. 4 248-253 (1992)
- (4) 竹下武成, 渥美邦夫, 神野光正: 化学工学論文集, Vol. 17 No. 2 355-361 (1991)
- (5) S. Jing and H. Li: Powder Technol, 101, 266-278 (1999)
- (6) G. Ferrari and M. Poletto: Powder Technol, 123, 242-253 (2002)
- (7) JIS 試験用粉体・APPIE 標準粉体: (社) 日本粉体工業技術協会・標準粉体説明書
- (8) 川原秀夫: 平成15年度アカデミックポテンシャル活用促進事業成果報告書, 1-5 (2003)
- (9) 川原秀夫: 第2回全国高専テクノフォーラム講演要旨集, 124 (2004)