研究報告

粉体の排出に伴う動的圧力変動について

On the Dynamic Pressure which Occurred during Discharge
Cu-Powder through the Orifice

丹野 浩一* 菊田 貞雄* 高橋 藤雄*
Koichi Tanno Sadao Kikuta Fujio Takahashi

1. 緒言

従来、貯蔵用のホッパーなどの設計はほとんどが Janssen や Airy らの研究に基づくか、あるいは現場独自の経験によって設計されてきているのが現状のようである。しかし、実際にホッパーから粉粒体が排出する際には、ホッパー内の圧力は静的な場合の最大圧力以上の衝撃圧力が生じることが知られている。一方現場では大型サイロなどの破壊現象が報告されるなどの事例から、新しく貯蔵ホッパーなどの設計基準の設定が問題となってきた。このため近年、青木^{1,2)}、杉田³⁾ らをはじめ排出時に伴う壁面や底面の衝撃圧力に対する研究報告^{4~11)}が多くなっている。しかし、容器径やオリフィスなどの具体的な問題に関する研究報告は少ない。そこで著者らは動的圧力に関する基礎的研究をすすめるため水平底板を有するガラス製円筒容器を使用し、容器壁における動的圧力を測定して、動的圧力波形とフローパターンの関連、およびオリフィス径、容器管径などとの関連について、いくつかの知見を得たので報告する。

Fig. 1 動的圧力測定装置

Fig. 2 フローパターン観察用容器

Fig. 3 受圧面概略図

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を Fig. 1 および Fig. 2 に示す。

Fig. 1 は動的圧力検出装置で容器には直径がそれぞれ

昭和50年9月1日受理

* 宮城工業高等専門学校(〒981-12名取市愛島塩手字野田山48)
TEL 02238-4-2171

Fig. 4 ゲージ設置状況

17mm ϕ , 24mm ϕ , 34mm ϕ , 60mm ϕ で高さ50cmの硬質ガラス製円筒容器を、その底部には中心に直径2mm ϕ , 3mm ϕ , 4mm ϕ , 5mm ϕ , 6mm ϕ の円孔オリフィスを有する厚さ3mmの真ちゅう製水平板を使用した。容器壁面の圧力検出部はFig. 3に示すように、ガラス壁に直径3mm ϕ の穴をあけ、穴の外側に極く薄いシリコンゴム膜をはり、それを容器内壁の曲率と等しく加工した真ちゅう製リングで内壁面まで押し込んで固定し受圧面とした。検出部の取付け状況をFig. 4に示す。この圧力検出部の位置は水平オリフィス板面から垂直方向にそれぞれ10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 100mm, 150mm, 200mm, 250mmの高さに設けた。圧力の検出には非接着形歪ゲージ(U-T gauge)を使用した。U-Tゲージの検出端の直径は2mm ϕ で実験に使用した銅粉粒径の約20倍となっている。受圧面に検出端を接し圧力を測定するのであるが初期値の乱れを防ぐためU-Tゲージをマイクロメータで押し込み、動歪計の最大感度の場合に3deg振れた位置を初期値とした。銅粉の充てんは容器上部に取り付けた漏斗より注入したが、このときできるだけ均一に、しかも粉体上部表面を水平に充てんさせるため容器と漏斗の間に金網を取り付け、それを通して充てんした。排出に伴う粉体面のレベル低下はマイクロスイッチにより1cmごとにチェックし、時間は1secごとに同期させ記録した。データはすべて充てん後5分間静置したのち、下部ストッパーを開放し銅粉を排出し、それに伴う動圧を各検出孔について3回ずつ測定し平均した。なおオリフィス径が1mm ϕ の場合の排出流は、かなり断続的で不安定であったためデータから削除した。Fig. 2は排出に伴う流動パターンの観察に使用した容器図である。図のようにガラス円筒容器を縦方向に半割し、その片面に1cm角のます目をHD溶液で溶解刻印したガラス平板を取り付けた。充てん粉

Fig. 5 充てんに伴う壁面圧力

体内のマーカースとしては試料銅粉と同じものを加熱酸化し褐色化させ、それを2cmごとに薄く充てんした。観察にあたっては動圧測定と同じように5分間静置後排出させ、そのフロー状況を35mmモータドライブカメラ、8mmカメラ、高速度カメラにより記録した。実験に使用した粉粒体は動圧検出、フローパターン観察とも粒径74 μ ~104 μ の噴霧銅粉を傾斜板上をころがし、完全球粉のみを選別し試粉¹²⁾とした。これを前処理としてアルコール洗浄し異物を除去し、乾燥の後Vミキサーで混合した。なお使用した銅粉の真密度は7.99(g/cm³)、安息角は約26°、流動時のマスフローとプラグフロー境界域とオリフィス縁を結んだ角度は約45°~55°であった。

3. 実験結果

3.1 充てん時の圧力変動について

銅粉を容器内に充てんしていく場合の圧力変動の様子を検出位置5cmについてFig. 5に示す。図にみるように壁面圧力は充てんに伴って小さな階段状の変動を生じつつ徐々に上昇する。ここでS点は充てん銅粉が高さ5cmの位置に取り付けた検出端に到達した位置、F点は最終充てん位置(充てん層高28cm)である。階段状の変動は矢印で示したように検出孔の位置から7~8cmくらいまでは上昇ステップを、それ以上充てん量が増加すると下降ステップを示す。このことは容器内部の充てん銅粉は少しずつ沈下を繰り返し、しまっていく様子を示している。粉体充てん量が検出孔の上方7~8cmま

図6 (a) 150mm

(b) 100mm

(c) 50mm

(d) 30mm

(e) 20mm

Fig. 6 排出に伴う動的波形
orifice dia : 3mm ϕ
vessel dia : 34mm ϕ

での比較的粉体圧の小さいうちは銅粉は鉛直方向に沈下し、次第に内部密度は増加し圧力は大きくなるが、それ以上の充てん量になると、すでに内部は比較的密になっているため沈下の際、銅粉は壁面摩擦により抵抗の大きい壁周辺よりも、流動しやすい容器中心の方向へ移動するので、壁圧は一時低下する。そのためステップ状の圧力減少が起こるものと考えられる。

3.2 排出時圧力変動とフローパターンについて

銅粉を下部オリフィスから排出する際に得られた典型的な圧力変動波形を容器径34mm ϕ 、オリフィス径3mm ϕ 検出孔の高さ20mm, 30mm, 50mm, 100mm, 150mmの場合について Fig. 6 (a~e) に示す。30mm以下の場合を除いては、いずれも特徴ある最大衝撃圧力ピークを持った波形が観察された。本報で使用した銅粉はほとんど球と見なせる球状銅粉であること、比重が大きいことなどから衝撃圧力ピークは非常に尖鋭な形で得られた。変動波形は特徴ある4領域に分類することができる。すなわち特に顕著な変動を示すFig. 6(b)の場合について見ると、排出直後（排出開始後最大12秒以内）に階段状に圧力が上昇する領域Ⅰ，その後圧力値の異常に高いピークが現れる領域Ⅱ，続いてミクロ的には圧力変動の激しい鋸歯波形振動を繰り返すもののマクロ的には安定したマスフローとなり、レベルの低下にもかかわらず圧力値がほぼ一定値を示す領域Ⅲ，さらに粉体レベルが降下し測定位置より上方6~7cmの位置を過ぎると圧力値はレベル低下に比例して減少する領域Ⅳである。一方、圧力波形と容器内銅粉の挙動との関連を明確にするため半割容器を用いてフローパターンを観察した結果、特性波形の各領域と一致する点が多く両者の関係が明確になった。すなわち排出に伴うフローパターンの時間的な変化を排出開始後1.5秒から50秒までについて Fig. 7(a~e)に示す。本実験で使用した銅粉の場合、完全な非付着性粒体のように排出開始直後から容器内全体にわたって一挙にマスフローが生じるのではなく流動初期はオリフィス上部の円柱状の領域内の銅粉のみが流動するファンネルフローとなる。フローパターンの模式図を Fig. 8 に示す。いまオリフィスが開放し流出が始まると容器内銅粉は重力流出であるから水平方向よりも垂直方向から優先的に銅粉が供給される。このとき充てんされた銅粉は容器内にランダムに静的なブリッジを形成し、強くしまっており少々の衝撃では崩壊しにくくなっている。その結果ファンネルフロー部分、すなわち Fig. 8 ④のA領域の流動が開始し、次第に上方へと伝播していく。この段階が Fig. 6(b)のⅠ領域であって壁圧力は、はっきりしたステップを示し上昇している。これは容器内部の銅粉は連続

Fig. 7 排出に伴う基本的なフローパターン

(a) 1.5sec (b) 2.5sec (c) 10sec
(d) 20sec (e) 50sec

Fig. 8 ファンネルフローの模式図

的に流動しているのではなく、ブリッジの形成、崩壊を繰り返しながら流動していることを現わしている。すなわち、いま銅粒子の質量を m 、速度を v 、オリフィス面からの高さを h とすると、流動を開始した銅粒子は運動エネルギーと位置エネルギーとの和、すなわち力学的エネルギー T を持つ、

Fig. 9 ファンネルフロー ①とマスフロー ②の流線モデル

$$\frac{mv^2}{2} + mgh = T$$

したがってある位置での局所的な銅粉の力学的エネルギーは、かさ密度 ρ 、単位体積を dV とすれば次式で与えられる。

$$\frac{\rho dV \cdot v^2}{2} + \rho gh dV = T dV$$

銅粉は互いの衝突によって相互粒子に仕事 Φ をし、次第にエネルギーは減衰する。衝突回数を n とするとエネルギーは $(TdV - n\Phi)$ となる。特に高速度カメラ毎秒5000コマ撮影による粒子運動の様子から若干誇張してトレスしたFig.9 ①のBライン近傍では銅粉の集束が著しく大きくなり衝突回数も増加するため力学的エネルギーは減少し、速度が低下し、そこへ上方から次々と銅粉が落下集積し密度が高まり動的ブリッジを形成する。ところが銅粉は流動の際、粒子間摩擦によってスピンのかけられているため、一度形成しかけたブリッジはそれによってバランスを保てず崩壊する。このときの局所的な静摩擦から動摩擦への移行がステップ状の圧力となって現れる。そして Fig. 8①のA領域が次第に上方へ発展し、Bラインでの粉体圧が高まるとともにこの移行による摩擦力が増加する結果 Fig. 6(b)のI波形はステップ状に上昇するものと考えられる。さらにA領域が充てん表面

まで達すると水平方向の粉体圧が支配的となり力学的バランスは破れ銅粉は Fig. 8④ のように周囲B領域から一斉に供給され、容器内部は容易に銅粉が流動できるように密度は粗となり、銅粉全体が層流状態を示すマスフロー、Fig. 7 の (d~e) そして Fig. 9 の ④ へと変化する。この変化に伴う静摩擦から動摩擦へと移行するときの圧力が Fig. 6(b) のⅡに現れた最大衝撃圧力ピークである。ピーク直後圧力波形が若干ダンプする部分があるが、これは最大衝撃圧力ピーク直後に一時的にもっとも粗になった内部が次第に安定したマスフロー状態へと移行する期間である。このとき円筒容器の外側からマスフローとプラグフローの境界部分を観察すると最大ピーク直後に境界線の位置は一番低く、次第に上昇し、容器径の1~1.5 倍の高さの所で平衡化し、安定状態すなわち Fig. 6(b) のⅢ領域へと変化していく。安定したマスフローになると容器内各所でランダムな動的ブリッジが形成崩壊を繰り返し、激しい鋸歯状の衝撃圧を生じる。しかしマクロ的には銅粉の排出に伴うレベルの降下にもかかわらずほぼ一定圧力値を示す。さらにレベルが降下し次第に検出孔に近づく領域Ⅳのようにレベルの降下に比例して圧力値も低下する。一方、検出孔の位置が20mm および 30mm では銅粉の移動の見られない場所に位置するので圧力ピークらしき特徴は現れず Fig. 6の (d), (e) のような波形を示す。なお30mm, 40mmの位置では流動境界部に位置するので実験例ごとにかなり波形にバラツキが見られた。

3.3 測定位置と応力値について

本報では実験で得た圧力波形のうち、特に衝撃圧力ピークに着目し、初期の最大衝撃圧力値をU-Tゲージに取り付けた検出端（受圧面）の断面積で割り壁面応力として整理した。特性波形は実験例ごとに粉粒体特有のバラツキが生じ、最大衝撃ピーク値は銅粉の充てん状態によって多少影響があったが、ここではあえて、衝撃ピーク値に着目し、各検出孔位置における各3回の平均値をとった。なお衝撃圧力ピーク値が観察されない検出孔位置20mm, 30mmの場合やオリフィス径 6mm ϕ , 検出孔位置 150mm ϕ の場合にファンネルフロー 部が充てん表面に達しないうちに途中でマスフローに移行するためピーク値のはっきりしない波形 Fig. 10 などについてはマスフローになった瞬間の値、すなわち、鋸歯波形の生じ始めた値をとった。Fig. 11 に圧力検出部の高さとの関係を示す。30mm 付近と150mm 付近の二ヶ所にピークが現れたが 30mm 付近の特異なピークはマスフローとプラグフローの境界付近に当り、銅粉がもっとも集束する部分でかさ密度の高い所であるため応力値も

Fig. 10 最大衝撃の現れない場合の動圧波形
orifice dia : 6mm ϕ
vessel dia : 34mm ϕ
position : 150mm

Fig. 11 最大衝撃圧力分布図

Fig. 12 壁圧におよぼすオリフィス径の影響

大きく現れている。

3.4 オリフィス径と応力値について

Fig. 13 各測定点間の平均動圧とオリフィス径の関係

Fig. 14 壁圧におよぼす容器径の影響

Fig. 15 各測定点間の平均動圧と容器径の関係

容器径34mm ϕ を用い、オリフィス径を2mm ϕ ～6mm ϕ まで変えた場合の各測定位置についての応力分布をFig. 12に示す。またオリフィス径別に各測定位置のデータを平均した場合について Fig.13 に示す。図から明らかなようにオリフィス径の変化に対し 4 mm ϕ を境にオリフィス径の増減に伴い応力値が高くなる傾向を示してい

る。壁面での最大衝撃圧力ピークは充てんされた銅粉がファンネルフローからマスフローへと流動様式を変える時に粒子間に発生する静摩擦から動摩擦への変化、すなわち粒子間のせん断力の水平伝播力であることはすでに述べた。このことから、オリフィス径が小さくなるとファンネルフロー領域は小さくなり、逆に銅粉の動かない領域、デッドゾーンの体積は大きくなり、せん断摩擦の発生領域は増大し、また容器内のかさ密度も大きいいため粒子間のエネルギー伝播力は高くなり動的壁圧は大きくなる。一方オリフィス径が大きくなった場合にはファンネルフロー領域は大きく、デッドゾーンは小さくなり、また排出速度は増加するため当然容器内の銅粉の移動速度も増し、運動エネルギーは増大する。したがって水平分力も大きくなるものと考えられ、この両者の相関位置がオリフィス径 4mm ϕ にあると推定される。

3.5 容器管径と応力値について

オリフィス径 3mm ϕ を用い、容器内径を 17mm ϕ ～60mm ϕ まで変えた場合の各測定位置についての応力分布を Fig.14 に示す。また容器内径別に各測定位置のデータを平均した場合について Fig.15 に示す。図から明らかなように容器径の変化に対し 34mm ϕ をピークとして容器径の増減に伴い応力が低くなる傾向を示している。これはオリフィス径に対し容器径が著しく大きい場合にファンネルフロー領域に対しデッドゾーンが非常に大きいために銅粉の移動量が限られ、せん断摩擦が容器内で一挙に生じることができないことと、オリフィス径を一定とした場合に容器器を変えても排出速度は変わらないため容器径の増加に伴い容器内銅粉は $v \propto 1/D^4$ (D : 容器内径) の関係で移動速度は小さくなり、銅粉の運動エネルギーは減少し、その水平分力も小となることから応力値は小さくなると考えられる。一方、容器径が小さい場合にはファンネルフロー部分が相対的に大きくなり、容器内の銅粉の移動速度は非常に速く運動エネルギーも大きくなるが、密度がきわめて粗であるため、エネルギー伝播は弱まり水平方向へのエネルギーは小さくなるため応力値が低下するものと推察される。そして両者の相関位置が 34mm ϕ にあるものと考えられる。今後、さらにこれらの関係を明確にするために裏づけとなる実験を推め、また $4/D$ (D :オリフィス径) などとの関係などについても実験を推めはつきりさせる計画である。

4. 結 言

以上の結果を総括すると

1) 容器内に銅粉を充てんする場合の壁面圧力変動は長周期のステップ状の沈下を繰り返しながら徐々に緩慢

な圧力上昇をする。

2) 円筒容器から銅粉を排出する場合の壁面の圧力変動波形は、ステップ状の圧力上昇部分、最大衝撃圧力ピーク部分、マクロ的にはほぼ一定圧を示しているもののミクロ的には鋸歯状の圧力変動を示す部分、充てん層表面の低下に伴い急激な圧力減衰をする部分の4つの領域に分類できる特徴ある波形を示した。

3) 容器内の銅粉が流動する際には複雑な脈動流を伴っており、その周期は圧力変動波形などから、初期のファンネルフローでは数秒、マスフローでは、内部で1/50秒程度、オリフィス付近で1/500秒程度であることが推察された。

4) 最大衝撃圧力分布は充てん高さ250mm~300mmの場合に測定位置30mm付近、および150mm付近で大きくなっている。

5) 容器径34mm ϕ を使用し、オリフィス径を1mm ϕ ~6mm ϕ まで変えた場合に4mm ϕ で衝撃圧力値が最も小さくなる傾向を示した。

6) オリフィス径3mm ϕ を使用し、容器径を17mm ϕ ~60mm ϕ まで変えた場合に34mm ϕ で衝撃圧力値が最も高くなる傾向を示した。

最後に本研究に御協力頂いた丹野成之氏(現松下電器産業㈱)に対し心より感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 青木, 内山ら: 化学工学, 8, No. 1/2 (1973)
- 2) Tsunakawa, H., Aoki, R.: *Powder Tech.*, 11, 237 (1975)
- 3) 杉田 稔: 粉体工学研究会誌, 7, No. 6 (1970)
- 4) Lakshmanrao, V., Venkateswarlu, D.: *Powder Tech.*, 10, 143 (1974)
- 5) Lakshmanrao, V., Venkateswarlu, D.: *Powder Tech.*, 11, 133 (1975)
- 6) Cowin, S. C.: *Powder Tech.*, 3, 61 (1974)
- 7) Bransby, P. L., Blair-Fish, P. M., James, R. G., : *Powder Tech.*, 8, 197 (1973)
- 8) Bransby, P. L., Blair-Fish, P. M.: *Powder Tech.*, 11, 273 (1975)
- 9) 網川 浩: 粉体工学研究会誌, 10, No. 6 (1973)
- 10) Walker, D. M.: *Chem. Eng. Sci.*, 21 (1966)
- 11) Cornish, R. J.: *Powder Tech.*, No. 1/2 (1973)
- 12) 丹野, 菊田, 高橋, 中村: 粉体工学研究会誌, 7, No. 6 (1970)

Authors' Abstract

On the Dynamic Pressure which Occurred during Discharge Cu-Powder through the Orifice

by

Koichi TANNO, Sadao KIKUTA, Fujio TAKAHASHI

(Technical College of Miyagi)

Using a model of the cylindrical vessel, the authors measured the lateral dynamic pressures at nine different heights.

We showed in these works that the dynamic pressures which occurred during discharge through the orifice are much greater than those of initial static conditions.

The present report mentions about the maximum wall pressure measurements and the fundamental flow-patterns, and obtained the following results.

- (1) The characteristic wave of the dynamic pressures is classified into four large groups.
- (2) As soon as discharging cu-powder, the maximum impact pressures occurred at each measuring positions higher than the 40mm from the orifice plate.
- (3) When cu-powder in a vessel is discharging, the internal flow accompanies by the micro bridging which is repeated by 1/500~1/600 sec and the macro bridging which is repeated by 1/50 sec.
- (4) On the wall pressure distribution, the large pressure value was observed near the measuring position of 30mm and 150mm.
- (5) In the case of 4mm ϕ of different orifices, 2mm ϕ , 3mm ϕ , 4mm ϕ , 5mm ϕ , 6mm ϕ , the wall pressure was minimum, when the 34mm ϕ vessel was used.
- (6) In the case of the 34mm ϕ of different vessel, 17mm ϕ , 24mm ϕ , 34mm ϕ , 60mm ϕ , the wall pressure was maximum, when the 3mm ϕ orifice was used.

List of figures

- Fig. 1** Experimental apparatus of dynamic pressure
- Fig. 2** Experimental apparatus of flow pattern
- Fig. 3** Detail of diaphragm
- Fig. 4** Profile of gage setting position
- Fig. 5** Lateral pressure of charging
- Fig. 6** Characteristic wave of the dynamic pressure
- Fig. 7** Fundamental flow patterns
- Fig. 8** Flow diagram of funnel flow
- Fig. 9** Stream line of funnel flow ㊶ and mass flow ㊷
- Fig.10** Characteristic wave of the dynamic pressure
- Fig.11** Maximum dynamic pressure distribution along the axis of vessel
- Fig.12** Effects of orifice diameter on wall pressure
- Fig.13** Effects of orifice diameter on average wall pressure
- Fig.14** Effects of vessel diameter on wall pressure
- Fig.15** Effects of vessel diameter on average wall pressure