空気流による付着性粉体のオリフィスからの噴出現象*

Spouting Phenomenon of Cohesive Powder from an Orifice using Air Flow

尾 形 公 一 郎**

OGATA Koichiro

Abstract This study experimentally examined the spouting phenomenon of the cohesive powder from an orifice when air was supplied from the top and the bottom of powder bed in a vessel. The stable discharge of the cohesive powder was obtained as the same flow rate of air was simultaneously supplied at the top and the bottom of the powder bed. Then, it was observed that the flow pattern of powder bed in a vessel became a mass flow, and that the discharged powder jet from an orifice was dispersed in the atmosphere. It was found that the interstitial air pressure affected the change of the void fraction and the discharge coefficient. In addition, it was confirmed that the interstitial air pressure during the spouting of powder greatly influenced the mass flow rate of powder through an orifice.

Keywords: Cohesive powder, Powder jet, Void fraction, Interstitial air pressure, Mass flow rate

1. はじめに

近年、様々な産業分野で微細化した粉体を取扱う機会が増えており、粉体の単位操作技術の向上が求められている。これは、粉体は比表面積が大きく反応性などに優れるためである。しかしながら、一般に、粉体は粒子径が小さくなると付着性の影響を受けて流動性が悪くなることが知られている。特に、粉体を空気中でハンドリングする場合、粉体の付着・凝集に伴う閉塞などによって、容器からの排出停止や粉体が突発的に流出して制御不能となるフラッシングなどの問題を生じる[1]。このため、付着性粉体の円滑な排出操作の知見を得ることは重要である。その操作の一つに、粉体を空気流で容器から排出（本稿で取扱う流れは粉体が空気流でオリフィスから勢よく流出する現象であるため、以下、噴出と呼ぶ）する方法がある。

ここで、容器内に充てんした粉体を空気流でオリフィスから噴出する研究を述べる。このような

研究は多くの理論的、実験的研究がなされてきた[2-11]。これらの研究は、粉体の気流中での流動化特性の指標の一つである Geldart 線図で整理できる。Geldart 線図[12,13]とは、粒子径と粒子と流体の密度差で粉体の流動化特性を C、A、B、D の4つのグループに分類したものである。この中で、グループ A、B 及び D 粒子は流動化が可能な粒子である。一方、グループ C 粒子は粒子径が小さいため付着性の影響が大きく、流動化がしにくいとされている。このことを踏まえて、空気流によるオリフィスからの噴出に関する研究をまとめると、流動化が可能なグループ B 及び D 粒子に対して、容器内に充てんした粉体の上部や底部に空気を供給して、噴出特性を調査したものが多く見られる[2-7]。また、気流や付着力などの影響が強くなる、グループ A 及び C 粒子を対象とした研究[7-11]もあるが、特に、C 粒子は流動化噴出が困難な場合や非定常な流動特性が存在する[9-11]。さらに、粉体に与える空気の供給位置

* 2012.1.26 受付

** 大島商船高等専門学校電子機械工学科 〒742-2193 山口県大島郡周防大島町小松 1091-1

TEL: (0820)74-5487 FAX: (0820)74-5487 E-mail: ogata@oshima-k.ac.jp

を変化させて、オリフィスからの粉体の噴出に及ぼす空気流の影響や操作性などを検討した研究は僅かである[6]。以上のことから、気流や付着性の影響が大きくなるグループ A 及び C 粒子の空気流による噴出に関する知見は十分ではないと考えられる。

このような背景から、筆者は空気流による付着性粉体（ここでは、容器底部のオリフィスからの重力排出が困難なグループ A 及び C 粒子）の定量噴出に関する研究を進めている[14–16]。その操作は、密閉容器内に充てんした粉体層の上部と底部へ空気を供給して、粉体を定量噴出しようとするものである。本稿では、筆者がこれまでに実施してきた、空気流による付着性粉体の定量噴出操作、噴出特性や粉体流動について述べる。

2. 実験

2.1 実験装置と方法

Fig.1 に実験装置の概略を示す。実験装置は、粉体充てん部、空気供給部、粉体充てん部へ空気を透過する多孔材と粉体回収部から成る。粉体へ供給する空気はコンプレッサーで生成し、エアクリーナー、オイルミストセパレーター、減圧弁を通して、マスフローコントローラーへ導く。空気流量はマスフローコントローラーで設定する。実験は内径 D_v が 50mm、高さ 150mm のアクリル製円筒容器に粉体を充てんした後、容器上部と底部に設置した厚さ 6mm の多孔材を通して、粉体層の上部と底部へ同一の空気流量を同時に供給する。この時、粉体は容器底部中央の直径 4mm の円形オリフィスから噴出される。

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

実験では、粉体噴出量 M_p をロードセルで、粉体層上部の空隙流体圧 p_a を圧力センサで測定した。また、噴出中の粉体層高さ H や大気中へ噴出する粉体流動をデジタルビデオカメラで撮影した。実験中に得られたロードセル、圧力センサとマスフローコントローラーの信号は動ひずみ計、データ収録装置を介して、パーソナルコンピュータで噴出量と圧力、空気流量の時系列データを取得した。また、データ収録装置、パーソナルコンピュータとデジタルビデオカメラの時刻を合わせることで、各種測定値とフローパターンの同時計測を可能とした。

2.2 使用粒子及び実験条件

Table 1 に小麦粉とシリカ粒子の粒子物性値を示す。表中の d_p は平均粒子直径、 ρ_p は粒子の真密度である。本研究で用いた小麦粉は、Geldart 線図中の A 粒子に属するが、オリフィスからの重力排出が困難な粉体である。また、シリカ粒子は Geldart 線図中の C 粒子で気流による流動化がしにくい粉体に分類される。

Table 2、3 に小麦粉とシリカ粒子の実験条件を示す。ここで、 M_{pi} は粉体の初期充てん量、 H_i は粉体層の初期高さ、 ε_i は初期空隙率、 Q_t と Q_b は粉体層上部と底部へ供給する空気流量である。また、本研究では、粉体噴出中の粉体層の平均空隙率 ε を次式で算出した。

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} = 1 - \frac{4M_r}{\pi D_v^2 H \rho_p} \quad (1)$$

ここで、 ρ_b は粉体のかさ密度、 M_r は容器内の粉体層の残留質量 $M_r = M_{pi} - M_p$ である。

Table 1 Particle properties.

	d_p (μm)	ρ_p (kg/m^3)
Wheat flour	46	1493
Silica	15.6	2200

Table 2 Experimental conditions (Wheat flour).

M_{pi} (g)	H_i (mm)	ε_i (-)	$Q_t=Q_b$ ($\times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$)
100	83~85	0.589~0.599	1.7, 3.3, 5.0
100	95~96	0.641~0.645	6.7, 10.0
100	112~113	0.695~0.698	13.3, 16.7
98	120~125	0.721~0.733	

Table 3 Experimental conditions (Silica powder).

M_{pi} (g)	H_i (mm)	ε_i (-)	$Q_i=Q_b$ ($\times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$)
200	84~85	0.449~0.455	2.666~8.333
200	92~93	0.496~0.502	0.166~2.5
200	101~102	0.537~0.546	0.166~2.5

3. 噴出モデル

オリフィスから粉体が定量噴出していることを評価するためには、粉体の単位時間当りの噴出量が一定であることが一つの指標となる。このため、空気流によって噴出する粉体の単位時間当たりの噴出量 m_p に対して種々のモデルが提案されている。本研究の粉体流動を考えると、既存のモデルと同様に、空気流による粉体のオリフィスからの噴出には、噴出中の粉体層に作用する空隙流体圧や空隙率が大きく影響すると思われる。そこで、本研究の流れ場での粉体の単位時間当たりの噴出量に対する空隙率や空隙流体圧の影響を簡略化して知るために、De Jong [4]やGeldartら[7]と同様の流動モデルを用いて、単位時間当たりの噴出量に及ぼす空隙率や空隙流体圧の影響を調査した。

本研究で用いた流動モデルは次の通りである。まず、空気流によって流動する粉体を非圧縮、非粘性流体と仮定して、ベルヌーイの定理により噴出速度を表す。ここで、実験結果から、単位時間当たりの噴出量に対する粉体層高さ H の影響はあまり見られないので、De Jongと同様に、噴出速度に対する重力項の影響は無視するものとし、 $\Delta p=p_a$ 、 $\rho=\rho_b=(1-\varepsilon)\rho_p$ とおくと、オリフィスからの粉体の噴出速度 v は式(2)で表される。

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{2\{gH + (\Delta p / \rho)\}} \\ &= \sqrt{2p_a / (1-\varepsilon)\rho_p} \end{aligned} \quad (2)$$

次に、De Jongと同様に、オリフィスからの粉体の単位時間当たりの噴出量 m_p を式(3)で表す。

$$\begin{aligned} m_p &= CA(1-\varepsilon)\rho_p v \\ &= C \frac{\pi}{4} (D - kd_p)^2 \sqrt{2(1-\varepsilon)\rho_p p_a} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 D はオリフィス直径、 C は供給係数、 k は粒子の形状係数である。式(3)中の定数をまとめると次式となる。

$$m_p = BC_{av} \sqrt{(1-\varepsilon_{av})} p_{av} \quad (4)$$

式(4)中の B は定数をまとめたもの、添え字 av は各値の平均値を表す。式(4)より、空気流による粉体の単位時間当たりの噴出量は空隙率、空隙流体圧、供給係数の関係で整理できる。

4. A粒子の噴出特性[14,15]

まず、密閉容器内に充てんした粉体を定量噴出するための空気供給位置について調査した結果を述べる。本章では、オリフィスからの重力排出が困難で、Geldart線図中のA粒子に属する小麦粉を使用した結果を示す。

4.1 空気供給位置による粉体噴出特性

Fig.2に、充てん容器内の粉体層の上部から空気を供給して粉体をオリフィスから噴出した場合の特徴的なフローパターンを示す。Fig.2(a)は粉体噴出時の空気と粒子運動の模式図、Fig.2(b)は粉体層上部からの撮影画像である。ここで、 $\varepsilon_i=0.659$ 、 $Q_i=10 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ である。図のように、この空気供給方法では、Fig.2(a)のように、粉体層上部からオリフィスへ向かう空気流が支配的で層全体の流動は行われない様子が確認された。また、Fig.2(b)のように、層の外側は静止状態で、層内部の粉体のみが強制的に噴出するラットホールのような流動が見られた。このように、粉体層の上部から空気を供給する方法では、粉体の良好な噴出状態が得られないことが分かる。

Fig.2 Flow pattern in a vessel at the spouting of powder when air was introduced only at the top of powder bed, $\varepsilon_i=0.659$, $Q_i=10 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$.

Fig.3 に、粉体層の底部から空気を供給して、粉体を噴出した場合の空気と粒子運動の模式図と粉体層側面からの撮影画像を示す。ここで、 $\varepsilon_i=0.652$ 、 $Q_b=10 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ である。この空気供給方法では、Fig.3(a)のように、粉体層底部に供給した空気流が層内を通気し、かつ、層内の圧力上昇が起こることで、粉体層を流動化噴出する流れが形成されることが考えられる。粉体噴出中の容器内の粉体運動を観察すると、Fig.3(b)のように、層内を通気する空気流の影響で粉体層はクラックや層分離を起こしながら、分離した粉体層が上部へ大きく上昇する様子が見られた。このような粉体流動は、層上部が大気開放の条件で粉体層の底部から流動化噴出させた場合にも確認されている[9, 11]。本研究で実施した粉体層の底部に空気流を供給する噴出操作では、粉体層の分離や層の上下振幅が見られた場合に、オリフィスからの粉体の噴出量や空隙流体圧が非定常に変化する流れが現れた。このため、本方法では粉体の定量噴出が不可能な条件が存在することが明らかとなった。

Fig.3 Flow pattern in a vessel at the spouting of powder when air was introduced only at the bottom of powder bed, $\varepsilon_i=0.652$, $Q_b=10 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

次に、密閉容器内の粉体層の上部と底部から同一の空気流量を同時に供給した場合の粉体流動と噴出特性について述べる。Fig.4 に、粉体噴出中の容器内の粉体層のフローパターンの模式図を示す。この結果は、実験で粉体の噴出が可能であった条件の可視化から得られたものである。図

のように、本空気供給方法では、容器内の粉体は層全体が平均的に低下し、容器内に先に充てんした粉体から噴出するようなマスフロー流動を維持しながら、容器底部のオリフィスからの粉体の噴出が実現できていた。これは、本方法では、粉体層上部と底部へ供給した空気流によって、(1) 底部からの空気流による粉体層の流動化特性の向上、(2) 上部からの空気流による層上昇の抑制効果と(3) 層内の空隙流体圧の上昇により発生する空気流が相互に影響することで、粉体のオリフィスからの噴出が実現できたと考えられる。

Fig.4 Flow pattern of mass flow condition during the spouting of powder.

Fig.5 Time histories of the cumulative mass of powder, the interstitial air pressure and the height of bed when air was introduced at the top and the bottom of powder bed, $\varepsilon_i=0.589$, $Q_t=Q_b=10 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

Fig.5 に、初期空隙率 $\varepsilon_i=0.589$ の場合の粉体噴出

量 M_p 、粉体層上部の空隙流体圧 p_a と粉体層高さ H の時間変化を示す。ここで、 $Q_t=Q_b=10 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ で同一とし、粉体層へ同時に空気を供給した。図より、空気供給直後から粉体はオリフィスからの噴出を開始し、粉体噴出量はほぼ一定の傾きを取ることが分かる。これは、オリフィスから噴出する粉体の単位時間当りの噴出量がほぼ一定で、粉体の定量噴出が実現できていることを示している。また、粉体層上部の空隙流体圧は空気供給後に急激に増加し、噴出中は任意の圧力を保つことや、粉体層高さは時間経過とともに一定の傾きで減少することが分かる。

Fig.4、5 の結果から、粉体層の上部と底部へ空気を供給する操作方法是重力排出が困難な粉体である小麦粉をほぼ一定の単位時間当たりの噴出量で噴出可能であり、粉体の定量噴出に対して有効な操作方法であることが理解できる。

4.2 粉体噴出中の空隙率と空隙流体圧の特性

Fig.6 に、粉体層の上部と底部へ同一の空気を供給した場合の粉体噴出時の容器内の粉体層の平均空隙率 ε と粉体層高さ H の関係を示す。ここで、初期空隙率 $\varepsilon_i=0.721 \sim 0.733$ でほぼ一定とし、粉体層への供給空気流量 Q_t と Q_b を変化させた。図より、平均空隙率は多少のばらつきは見られるものの、粉体層高さの減少に伴い、その値を僅かに増加させることが分かった。また、粉体層へ供給する空気流量の増加とともに平均空隙率は全体的に増加する傾向が見られた。

Fig.6 Relationship between the void fraction and the height of powder bed during the spouting of powder.

次に、Fig.7 に、粉体噴出中の粉体層上部の空隙流体圧 p_a と粉体層高さ H の関係を示す。図より、多少の変動は見られるものの、粉体噴出中の層上部の空隙流体圧は任意の圧力を保持していることが分かる。さらに、粉体層へ供給する空気流量の増加とともに空隙流体圧は増加する傾向が見られる。このことは、供給空気流量の増加によって粒子層に作用する外力が大きくなることを示している。

以上をまとめると、粉体層の上部と底部から空気を供給した場合の容器内の粉体流動は、粉体層の膨張による流動性の改善や、粉体層に作用する空隙流体圧の影響によって、容器底部のオリフィスからの粉体の良好な噴出特性を示すことが分かる。

Fig.7 Relationship between the interstitial air pressure and the height of powder bed during the spouting of powder.

5. C 粒子の噴出特性[16]

前章の結果から、密閉容器内の粉体をオリフィスから定量噴出させるためには、粉体層の上部と底部から空気を供給する方法が有効であることが明らかになった。そこで、本章では、空気中での流動化がしにくい粉体である Geldart 線図中の C 粒子に分類されるシリカ粒子に対して、この空気供給方法を導入し、粉体の定量噴出が可能であるかを調査した結果について述べる。

5.1 噴出中の粉体流動

Fig.8 に、粉体層の上部と底部から同一の空気流量を同時に供給して粉体を噴出する場合の容器内のフローパターンを示す。使用粒子はシリカ

粒子で、初期空隙率 $\varepsilon_i=0.546$ 、層上部と底部への供給空気流量 $Q_t=Q_b=0.5\times 10^{-5}\text{m}^3/\text{s}$ である。図より、容器内の粉体は層全体が平均的に低下しながら噴出することが分かる。この流れは、Fig.4 に示した粉体流動と同じであり、粉体層の上部と底部から空気を供給する操作方法が C 粒子の噴出に対しても有効であることが分かる。また、同程度の粒子径や粒子密度の粉体層底部に流動化空気を与えた噴出実験では、容器内の粉体層に凝集やクラックが生じる非定常な流動が見られている[9, 11]。これに対して、本空気供給方法による粉体の流れは、容器に先に充てんした粉体から噴出するマスフロー流動であり、層内に供給した空気流によって良好な粉体流動を維持できていることが理解できる。

Fig.8 Flow pattern of silica powder in a vessel when air was supplied from the top and the bottom of bed.

Fig.9 Behavior of powder jet during the spouting of powder from an orifice.

Fig.9 に、オリフィスから噴出する粉体の流れを示す。実験条件は初期空隙率 $\varepsilon_i=0.544$ 、供給空気流量 $Q_t=Q_b=0.833\times 10^{-5}\text{m}^3/\text{s}$ である。図より、噴出開始直後のオリフィス近傍部の流れは、粉体の半径方向への分散はそれ程見られずに、粉体の鉛直

下向き方向への流れが支配的であることが確認できる。一方、オリフィス出口部からの距離が増加すると、粉体流動は半径方向に拡大し、粉体が空間中に分散する様子が見られた。前述した粉体層底部へ流動化空気を与えた噴出実験[9, 11]では、粉体が凝集した状態で大気中へ噴出しており、本研究のような良好な分散特性は得られていなかった。

5.2 粉体噴出に及ぼす影響因子

Fig.10 に、シリカ粒子の噴出量 M_p 、粉体層上部の空隙流体圧 p_a と粉体層の平均空隙率 ε の時間変化を示す。ここで、実験条件は Fig.8 と同じである。図より、粉体噴出量は一定の傾きを取り、単位時間当りの噴出量が一定であることが分かる。これは、本空気供給操作で Geldart 線図中の C 粒子に分類されるシリカ粒子の定量噴出が実現可能であることを示している。この時、粉体層上部の空隙流体圧は所定の圧力を保持し、平均空隙率は僅かに増加する傾向が見られた。これらの結果は、前章で示した小麦粉の噴出特性と同様である。

Fig.10 Time histories of the cumulative mass of powder, the interstitial air pressure and the void fraction.

次に、粉体層の上部と底部に空気流を与えた場合の粉体の噴出に及ぼす影響因子を考える。3章で述べたように、粉体がオリフィスから定量的に噴出していることを評価するためには、粉体の単位時間当りの噴出量が一定であることが一つの指標であり、式(4)から、単位時間当りの噴出量には、空隙率、空隙流体圧と供給係数が影響すると

思われる。そこで、これらの特性を調査した。

Fig.11 に、各初期空隙率 ε_i での粉体層の平均空隙率 ε_{av} と層上部の平均空隙流体圧 p_{av} の関係を示す。ここで、粉体層の平均空隙率と層上部の平均空隙流体圧は各実験条件での粉体噴出時の値から平均値を算出した。図より、各初期空隙率の条件での粉体層の平均空隙率は層上部の平均空隙流体圧の増加とともに線形的に増加する傾向が見られた。これは、噴出時の粉体層は層内に供給した空気流で膨張し、粉体の流動性が改善されていることを示唆している。さらに、この傾向から粉体層の膨張特性は空隙流体圧の影響を大きく受けることが理解できる。

Fig.11 Relationship between the void fraction and the interstitial air pressure.

Fig.12 Relationship between the discharge coefficient and the interstitial air pressure.

Fig.12 に、各初期空隙率における粉体噴出時の

平均供給係数 C_{av} と粉体層上部の平均空隙流体圧 p_{av} の関係を示す。ここで、供給係数は式(3)と実験値から算出し、平均供給係数は Fig.11 と同様に粉体噴出時の値を平均した。図より、多少のばらつきは見られるものの、平均供給係数は層上部の平均空隙流体圧の増加とともに増加する傾向が見られる。このことは、供給係数の変化が空隙流体圧の影響を大きく受けることを表している。

Fig.13 に、シリカ粒子の単位時間当りの噴出量 m_p と粉体層上部の平均空隙流体圧 p_{av} の関係を示す。図中の実線は式(4)の計算値である。図より、単位時間当りの噴出量は粉体層上部の空隙流体圧の増加とともに増加する。また、Figs.11、12 の結果から、粉体層の平均空隙率 ε_{av} と平均供給係数 C_{av} は層上部の平均空隙流体圧に依存することが分かっている。Fig.13 と式(4)から、粉体層へ供給した空気流で発生した層内の空隙流体圧が粉体の噴出特性に大きく影響していることが理解できる。

Fig.13 Relationship between the mass flow rate and the interstitial air pressure.

6. まとめ

本稿では、容器底部のオリフィスからの重力排出が困難な Geldart 線図中のグループ A 及び C 粒子を空気流でオリフィスから噴出する操作方法を検討し、粉体の噴出特性や流動特性を示した。その結果、密閉容器内に充てんした粉体層の上部と底部に空気を供給する操作が粉体の定量噴出に対して有効であることを述べた。また、この操作方法では、容器内の粉体層はマスフロー流動で、

オリフィス噴出後の粉体は空間中に分散する良好な流動特性を示した。さらに、定量噴出時の単位時間当たりの噴出量には粉体層に作用する空隙流体圧が大きな影響を与えることを述べた。

近年、産業界ではサブミクロン、ナノサイズの粉体を取り扱う機会が増えており、その精密なハンドリングが求められている。本稿では、数十マイクロサイズの粉体の空気流による噴出現象に焦点を当てて議論したが、サブミクロンサイズの粉体を対象とした流動化噴出に関する研究も進められている[17]。しかしながら、この領域の粒子に対する研究は十分とは言えない。今後は、本研究で用いた空気供給方法などでサブミクロン、ナノサイズの粉体の噴出特性や流動機構の解明に取り組む予定である。

謝 辞

本研究は科学研究費補助金若手研究B(No.16760143)で行われた。本研究の成果は本学学生であった出井良和氏、高杉和成氏の多大なる協力を得た。ここに記して、感謝の意を表する。

Nomenclature

C	: discharge coefficient	[-]
C_{av}	: average discharge coefficient	[-]
D	: orifice diameter	[mm]
d_p	: particle diameter	[μm]
H	: height of powder bed	[mm]
M_p	: cumulative mass of powder	[g]
M_r	: residual mass of powder	[g]
m_p	: mass flow rate of powder	[kg/s]
p_a	: interstitial air pressure	[Pa]
p_{av}	: average interstitial air pressure	[Pa]
Q_b	: air flow rate to bottom of bed	[m ³ /s]
Q_t	: air flow rate to top of bed	[m ³ /s]
ε_{av}	: average initial void fraction	[-]
ε_i	: initial void fraction	[-]
ε	: void fraction	[-]
ρ_b	: bulk density	[kg/m ³]
ρ_p	: particle density	[kg/m ³]

参考文献

- [1] The Society of Powder Technology, Japan ed., Handbook of Powder Technology (in Japanese), 344-349, Nikkan Kogyo (1998)
- [2] Kuwai, G., Flow of Solid Particles through Orifice, Chem. Eng. Sci. Jpn., Vol.17, 453-458

- (1953).
- [3] McDougall, I. R. and Knowles, G. H., Flow of Particles through Orifices, Trans. Inst. Chem. Engrs., Vol.47, T73-T78 (1969).
- [4] De Jong, J. A. H., Vertical Air-controlled Particle Flow from a Bunker through Circular Orifices, Powder Technology, Vol.3, 279-286 (1969/70).
- [5] De Jong, J. A. H., Aerated Solids Flow through a Vertical Standpipe below a Pneumatically Discharged Bunker, Powder Technology, Vol.12, 197-200 (1975).
- [6] De Jong, J. A. H. and Hoelen, Q. E. J. J. M., Cocurrent Gas and Particle Flow during Pneumatic Discharge from a Bunker through an Orifice, Powder Technology, Vol.12, 201-208 (1975).
- [7] Geldart, D. and Haesebrouck, M., Studies on the Intermittent Discharge of Coarse Solids from Fluidised Beds, Chem. Eng. Res. Des., Vol.61, 162-166 (1983).
- [8] Martin, P. D. and Davidson, J. F., Flow of Powder through an Orifice from a Fluidized Bed, Chem. Eng. Res. Des., Vol.61, 225-232 (1983).
- [9] Donsi, G., Ferrari, G., Poletto, M. and Russo, P., Aggregative Behavior of Cohesive Magnesium Carbonate Powders during Fluidization and Aerated Discharge, KONA, Vol.21, 54-65 (2003).
- [10] Donsi, G., Ferrari, G., Poletto, M., and Russo, P., Gas Pressure Measurement inside an Aerated Hopper, Chem. Eng. Res. Des., Vol.82, 72-84 (2004).
- [11] Barletta, D., Donsi, G., Ferrari, G., Poletto, M., and Russo, P., Solid Flow Rate Prediction in Silo Discharge of Aerated Cohesive Powders, AIChE Journal, Vol.53(9), 2240-2253 (2007).
- [12] Geldart, D., Types of Gas Fluidization, Powder Technology, Vol.7, 285-292 (1973).
- [13] Geldart, D., Williams, J. C., Flooding from Hoppers: Identifying Powder likely to give Problem, Aeration, Powder Technology, Vol.43, 181-183 (1985).
- [14] Ogata, K., Spouting Phenomenon of Fluidized Fine Cohesive Powder, J. Soc. Powder Technol., Japan., Vol.45(12), 844-851 (2008).
- [15] Ogata, K., Effect of Initial Void Fraction and Fluidized Air flow on Spouting of Fine Powder through an Orifice, J. Soc. Powder Technol., Japan., Vol.46(3), 187-196 (2009).
- [16] Ogata, K., Spouting Phenomenon of Cohesive Fine Powder using Air Flow, JSMF Annual Meeting 2011, 302-303 (2011).
- [17] Cannavacciuolo, A., Barletta, D., Donsi, G., Ferrari, G. and Poletto, M., Arch-Free Flow in Aerated Silo Discharge of Cohesive Powders, Powder Technology, Vol.191, 272-279 (2009).