

## （第15回）2019年度・研究助成報告

研究題名	動的な粉体流動に基づく流動性および噴流性の評価
研究期間	2019年4月1日～2021年3月31日
研究機関・所属 研究者名	大分工業高等専門学校・機械工学科 尾形 公一郎

## 1. 2019（2020）年度研究成果の概要

本研究では粉体の動的な流動から流動性および噴流性を評価する方法について検討した。まず、粒子径の異なる2種類のシリカおよび8種類の消石灰を用いた噴出実験を行い、粒子径が粉体の流動性に及ぼす影響について調査した。次に、粒子径の異なる2種類のシリカを対象として、粉体層内部の圧力上昇で粉体のフラッシング現象が発生するか否かを検討した。その結果、(1) 流動性評価装置で2種類のシリカの流動性を評価したところ、粒子径が小さくなると流動性が悪くなる傾向が見られた。(2) 8種類の消石灰の流動評価実験から造粒によって流動性の向上が確認された。(3) 噴流性評価装置でフラッシングが起こることを確認できた。(4) 粉体供給部からの供給終了後のオリフィスからの噴出量と単位時間当たりの圧力変化量に相関性が見られることが分かった。

## 2. 助成期間内での研究成果の概要

## 1. はじめに

一般に、粉体は粒子径が小さくなると粒子に作用する重力に対して付着力の影響が相対的に大きくなるため、粉体の供給操作では閉塞やフラッシング現象などのトラブルを生じる。このため、粉体ハンドリング時の粉体の流動評価は重要な課題であり、本研究では粉体の動的な流動性および噴流性の評価について検討した。

まず、粉体層に空気を供給してオリフィスから噴出する方法を用いて、粉体に作用する圧力や粉体層の空隙率を考慮した流動性および付着性の評価を試みた。本報では、粒子径の異なる2種類のシリカと8種類の消石灰を用いた噴出実験を行い、粒子径が粉体の付着性や流動性に及ぼす影響について調査した結果を述べる。

次に、オリフィスを有する円筒容器への粉体の落下と粉体層へのエアレーションによる粉体層内部の圧力上昇で粉体を噴出させる方法を用いて、フラッシング現象が発生するか否かを検討した。本報では、粒子径の異なる2種類のシリカを用いた場合の粉体の供給量、噴出量や粉体層内部の空隙流体圧の測定結果から、フラッシングの起きやすさと噴流性の関係について調査した結果をまとめる。

## 2. 実験方法

### 2.1 付着性および流動性の評価

Fig.1 に実験装置の概略を示す。実験は内径 50mm, 高さ 150mm の充てん容器へ粉体を充てん後, マスフローコントローラで調整した空気流を, 厚さ 6mm の多孔材を通して粉体層の上部と底部に同時に供給し, 粉体を充てん容器底部中央に設置した直径 4mm の円形オリフィスから噴出させた。噴出した粉体は回収器で回収した。粉体噴出量はロードセルで, 粉体層上部の空気圧力は微差圧センサで測定した。

本研究では, 粒子径の異なる 2 種類のシリカ ( $\text{SiO}_2$ ) と 8 種類の消石灰 ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) を用いて実験を行った。シリカ粒子の平均粒子径は  $5\mu\text{m}$  ( $\text{SiO}_2\text{-A}$ ) と  $16\mu\text{m}$  ( $\text{SiO}_2\text{-B}$ ), 真密度  $\rho_p=2200\text{kg/m}^3$  である。初期充てん量  $M_{pr}=150\text{g}$ ,  $200\text{g}$  に設定した。次に, Table 1 に消石灰の平均粒子径  $x_p$  と初期空隙率  $\varepsilon_i$  を示す。表中の最も小さい粒子径が A, その後は, 粒子径が小さい方から順に B~H を表す。消石灰の真密度は  $\rho_p=2240\text{kg/m}^3$  である。初期充てん量  $M_{pr}=70\text{g}$  に設定した。粉体層の上部と底部へ送る空気流量を  $Q_t=Q_b=(0.333\sim 1.667)\times 10^{-5}\text{m}^3/\text{s}$  の範囲で変化させた。

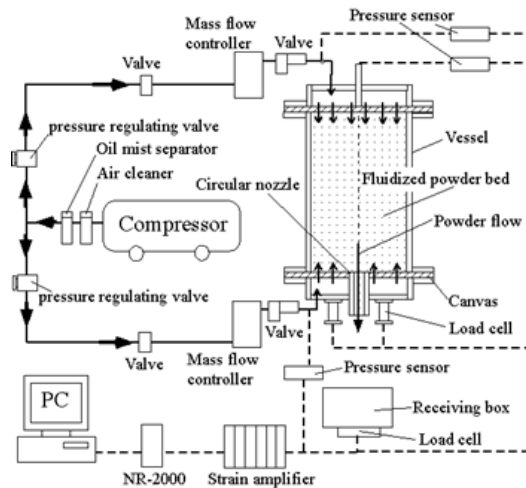


Fig.1 Experimental apparatus for evaluation of flowability

Table 1 Particle size and initial void fraction of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

$x_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\varepsilon_i$ [-]	$x_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\varepsilon_i$ [-]
11	0.842	36	0.821
18	0.811	47	0.831
20	0.811	55	0.831
26	0.821	176	0.762

### 2.2 噴流性の評価

Fig.2 に実験装置の概略を示す。本装置の粉体供給容器とフラッシング発生容器には内径 50mm, 高さ 300mm のアクリル製円筒容器を用いた。粉体供給部底部には孔径 1mm のパンチングメタルを取り付けた。フラッシング発生容器底部の空気供給部には厚さ 6mm の多孔材を設置した。実験は, 粉体の初期充てん量を電子秤で

測定した後、粉体供給容器に粉体を自然充てんする。次に、粉体供給容器の上部とフラッシング発生容器底部に加える空気流量および粉体供給部に加える加振力と周波数を設定する。その後、粉体供給部とフラッシング発生容器への空気の供給と、粉体供給部への加振を同時に開始する。この操作によって粉体供給部の粉体が落下してフラッシング発生容器に供給され、粉体がフラッシング発生容器底部の中央に設置した直径 4mm の円形オリフィスから噴出する。噴出した粉体は回収器で回収した。粉体の供給量と噴出量をロードセルで、フラッシング発生部の空隙流体圧を微差圧センサで測定した。

Table 2 に実験条件を示す。本実験ではシリカ粒子 ( $\text{SiO}_2$ ) を使用した。平均粒子径は  $16\mu\text{m}$  ( $\text{SiO}_2\text{-B}$ ) と  $40\mu\text{m}$  ( $\text{SiO}_2\text{-C}$ ) である。初期充てん量  $M_{pi}=150\text{g}$  とした。表中の  $Q_t$  は粉体供給容器の上部へ供給する空気流量、 $Q_b$  はフラッシング発生容器底部に送る空気流量であり、 $Q_t$  と  $Q_b$  は  $(0\sim 1.67)\times 10^{-5}\text{m}^3/\text{s}$  の範囲で変化させた。

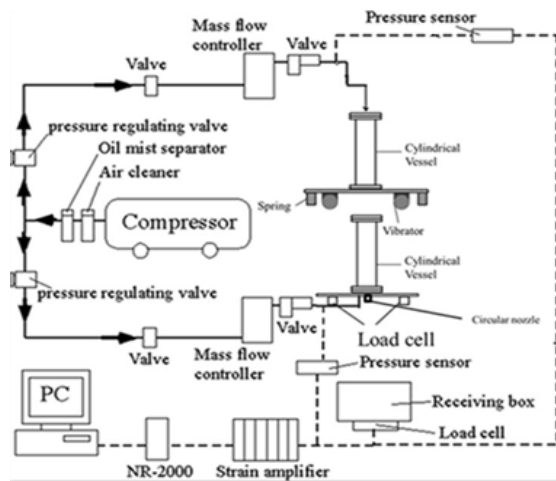


Fig.2 Experimental apparatus for evaluation of floodability

Table 2 Experimental conditions of floodability test

Powder	$M_{pi}$ [g]	$Q_t \times 10^{-5}$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	$Q_b \times 10^{-5}$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	$x_p$ [ $\mu\text{m}$ ]
$\text{SiO}_2\text{-A}$	150	0~1.67	1.67	15
$\text{SiO}_2\text{-B}$	150	0~1.67	1.67	40

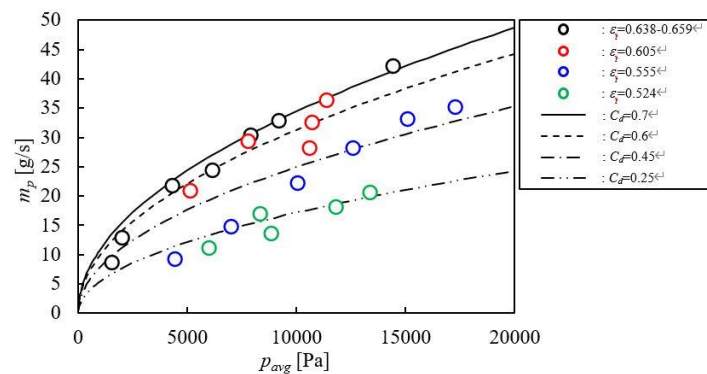
### 3. 流動性と噴流性の評価

#### 3.1 流動性の評価

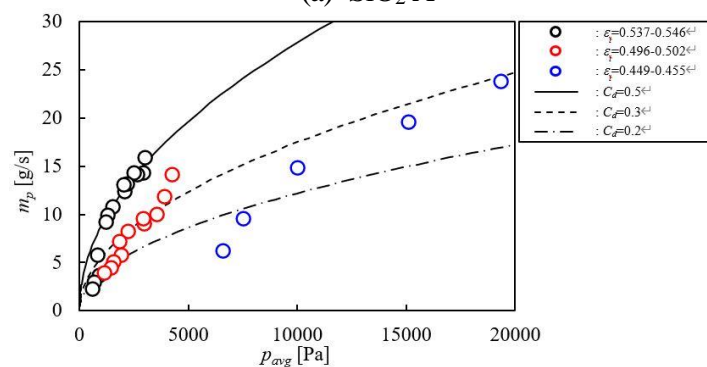
Fig.3 にシリカ A, B の単位時間当たりの粉体噴出量  $m_p$  と粉体噴出時の粉体層上部の圧力  $p_{avg}$  の関係を示す。ここで、Fig.3 には噴出可能条件のみをプロットしている。Fig.3 より、初期空隙率が一定の場合、単位時間当たりの噴出量は平均圧力の増加とともに増加する傾向が見られる。さらに、初期空隙率が小さくなると、粉体を噴出させるために高い圧力が必要になることが確認できる。ここで、粒子層の初期空隙率が小さくなると、粉体層の圧縮によって粒子の充てん構造は密になり、粒子

間力などが増加すると考えられる。このとき、粉体層がオリフィスから噴出を開始するためには、粉体層に大きな力を作用させる必要があると言える。このため、初期空隙率が小さい時に、粉体を噴出させるために必要な圧力が増加したと思われる。シリカ B はシリカ A に比べて、粉体層上部の圧力と初期空隙率が低い条件で粉体が噴出している。このことから、シリカ A, B の流動性は、 $A < B$  の順に良いと言える。この流動性評価の結果は、パウダテストによる Carr の流動性指数の測定結果とパウダーレオメーターで測定したフローファンクションと同様の傾向であり、本評価方法の有効性が示された。

Fig.4 に消石灰 A~H の単位時間当たりの粉体噴出量  $m_p$  と粉体噴出時の平均空隙流体圧  $p_{avg}$  の関係を示す。Fig.4 より粒子径の最も小さい消石灰 A は継続的な噴出を行うために高い圧力を必要としている。一方、造粒を行った消石灰 B~H は比較的低い圧力で噴出している。このことから、造粒を行った消石灰 B~H は消石灰 A に比べ流動性が良くなっていることがわかる。以上のことから、粒子を造粒することによって流動性を向上させることができることが分かる。この結果に対して、パウダテストの評価では消石灰 A~H の流動性に大きな差が見られず、パウダーレオメーターのフローファンクションでは消石灰 B~G に大きな差がなく、消石灰 A, H が比較的高くなっている。これらの評価の差は、造粒を行った粒子が試験の際に崩壊した可能性や消石灰の粒子形状が影響を及ぼしている可能性が考えられるため、今後、さらに検討が必要である。



(a) SiO<sub>2</sub> A



(b) SiO<sub>2</sub> B

Fig.3 Relationship between mass flow rate and average air pressure at the top of powder bed

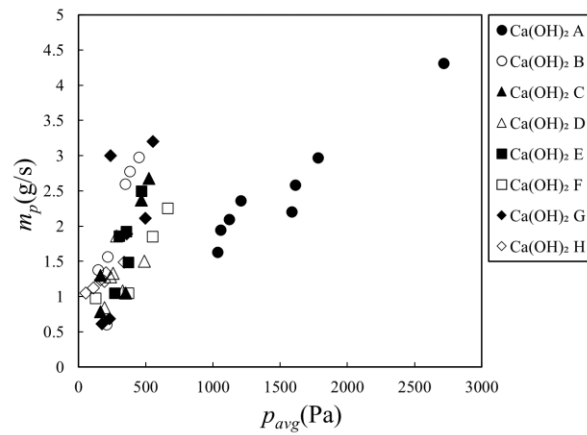


Fig.4 Relationship between mass flow rate of  $\text{Ca(OH)}_2$  and average air pressure of at the top of powder bed

### 3.2 噴流性の評価

本研究では, Fig.5 (a), (b)のような結果を用いて粉体の噴流性の評価を行った. まず, Fig.5 に示すように供給容器から粉体が供給を開始した時点, 粉体の供給が終了した時点およびオリフィスからの噴出が終了した時点をそれぞれ A, B および C とした. 区間 BC では, サンプル数が 21 個の 1 秒間のデータを用いて単位時間当たりの粉体噴出量  $m_p$ , および単位時間当たりの圧力変化量  $p_p$  を算出した.

Fig.5 (a), (b)に平均粒子径が  $16\mu\text{m}$  のシリカ粒子で噴出実験を行った結果を示す. 図中の  $m_1$  は試験部に供給された粉体の質量,  $m_2$  はフラッシング発生容器底部のオリフィスからの噴出量,  $p_a$  はフラッシング発生容器の底部圧力を表す.

Fig.5 (a)から, 測定開始から 4.2 秒後に上部容器から粉体の供給が開始され, 測定開始から 10.7 秒後に粉体の供給が終了している(区間 AB). その後, 上部からの粉体供給が終了しても, 噴出が継続していることが分かる(区間 BC). Fig.5 (b)で測定した噴出量と空隙流体圧の時間変化は同様の傾向であり, 両者には再現性があると言える. また, Fig.5 (a), (b)ともに区間 BC では粉体層内部の空隙流体圧のみで粉体がオリフィスから継続的に噴出するフラッシングが発生していると考えられる.

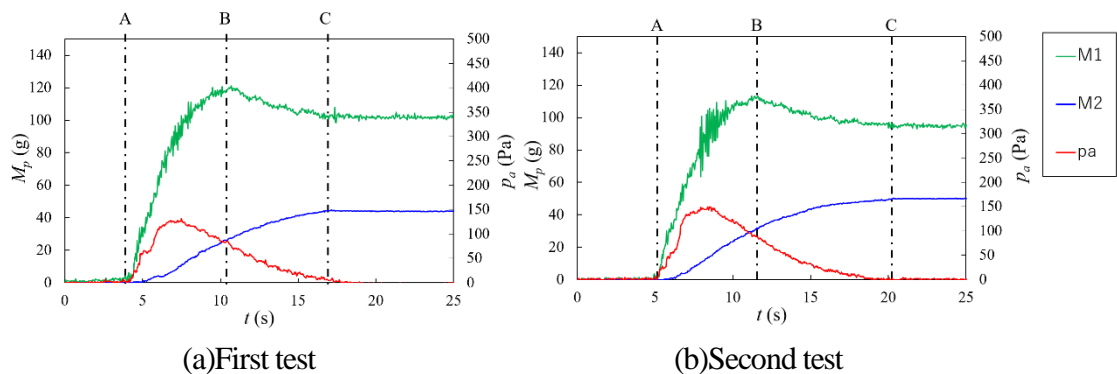


Fig.5 Discharge mass of powder, flushing mass and interstitial air pressure as a function of time of  $\text{SiO}_2\text{-B}$  where  $Q_f=0\text{m}^3/\text{s}$

Fig.6にFig.5 (a), (b)の区間BCのデータで算出した単位時間当たりの粉体噴出量 $m_p$ および単位時間当たりの圧力変化量 $p_p$ の関係を示す。この時、単位時間当たりの圧力変化量 $p_p$ は絶対値を取った。Fig.6より、単位時間当たりの圧力変化量が大きいかほど単位時間当たりの粉体噴出量が大きくなることが分かり、両者には相関性が見られる。

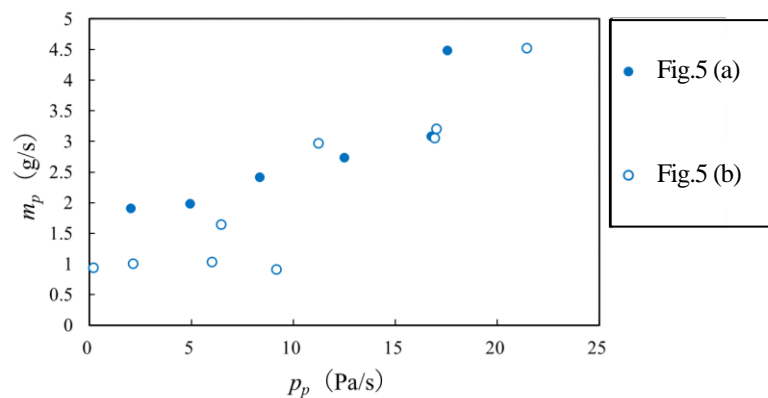


Fig.6 Relationship between mass flow rate of particle and interstitial air pressure gradient per unit time of SiO<sub>2</sub>-B

#### 4. まとめ

本研究で粒子径の異なる2種類のシリカと8種類の消石灰を対象とした流動性実験および粒子径の異なる2種類のシリカを対象としたフラッシング発生実験を行い、以下の結果が得られた。

- (1) 流動性評価装置で2種類のシリカの流動性を評価したところ、粒子径が小さくなると流動性が悪くなる傾向が見られた。
- (2) 8種類の消石灰の流動評価実験から造粒によって流動性の向上が確認された。
- (3) 噴流性評価装置でフラッシングが起こることを確認できた。
- (4) 粉体供給部からの供給終了後のオリフィスからの噴出量と単位時間当たりの圧力変化量に相関性が見られることが分かった。

### 3. 研究発表

#### 【学会発表】

- (1) 津久間俊太, 有賀大吾, 尾形公一郎, 加圧噴出法を用いた粉体の流動性の評価に及ぼす粒子物性の影響, 日本機械学会講演論文集 No.218-2[’21-3-9 九州学生会第52回学生員卒業研究発表講演会, No.323, pp.1-4 (2021年3月, 福岡, オンライン)
- (2) 尾形公一郎, 有賀大吾, 空気流による噴出法を用いた粉体の流動性や付着性の評価に及ぼす粒子特性の影響, 第26回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム講演論文集, G8, pp.1 (2020年11月, 岐阜, オンライン)
- (3) 尾形公一郎, 有賀大吾, 空気流による噴出法を用いた粉体の流動性や付着性の評価に及ぼす粒子径の影響, 第25回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム講演論文集, O03, pp.13-14 (2019年11月, 大阪)
- (4) 有賀大吾, 尾形公一郎, 加圧噴出法を用いた粒子径の異なる粉体の流動性と付着性の評価, 粉体工学会2019年度秋期研究発表会講演要旨集, BP-36, pp.108-109 (2019年10月, 大阪)