

粉体の付着に関する基礎研究

Basic Research on Powder Adhesion

清水 健司

ホソカワミクロン株式会社 粉体システム事業本部 大阪技術部

Kenji SHIMIZU

Osaka Engineering Group, Powder Processing System Division, Hosokawa Micron Corporation, JAPAN

抄 録

粉体の付着と流速の関係について、流速が小さい時は付着を引きはがす力が小さいことによる低速付着が、流速が大きい時は静電気力等の付着力が大きくなることによる高速付着が生じることが知られている。

本稿では、付着と流速の関係に着目し、近年ニーズが増えている数 μm ~ nm オーダーの微細な粉体に対して、粉体の付着と流速の関係が、粉体の物性が変化した場合にどのようなになるか、また具体的にどのくらいの流速が適当であるのかを実験により確認した。

ABSTRACT

Regarding the relationship between powder adhesion and flow velocity, when the flow velocity is low, low-speed adhesion occurs due to the small force to peel off the adhesion, and when the flow velocity is high, high-speed adhesion occurs due to the large adhesion force such as electrostatic force.

In this report, we examined the effect on the relationship between powder adhesion and flow velocity when the physical properties of the powder change, using fine powder on the order of several μm to nm , for which needs have been increasing in recent years. In addition, I examined by experiments how much the flow velocity was specifically appropriate for each powder.

1 はじめに

粉体処理プロセスにおいて、粉体の付着は常に付きまとう課題であり、粉体の微細化ニーズの増加にともない、付着を起因とする問題もますます増加していくと考えられる。

粉体の付着の原因は、ファンデルワールス力（分子間力）、静電気力、液架橋力が主であり、これらの付着する力と、引きはがそうとする力の大小で付

着するかどうかが決まる。付着を引きはがそうとする力としては、重力、振動や衝撃による加速度、空気の流れ、機械的な力（スクレーパ等）等があげられる。付着する力は粒子径が細くなるにつれて小さくなるが、引きはがそうとする力の多くも粒子径が細くなるにつれて、付着する力以上に小さくなるため、粒子が細くなるほど付着しやすくなる。具体的には、ファンデルワールス力（分子間力）は粒子径に比例して小さくなるが、重力は粒子径の3

表 1 実験に用いた原料の各物性値

Table 1 List of raw materials.

	Particle size [μm]	Moisture [%]	Bulk density [kg/m ³]	Compression rate [%]	Relative permittivity [-]
Talc $D_{50}=20\ \mu\text{m}$	20	0.1	580	29.7	1.6~2.0
Talc $D_{50}=2\ \mu\text{m}$	2	0.4	170	18.1	1.6~2.0
Silica $D_{50}=1\ \mu\text{m}$	1	1.1	250	24.6	2.0
Light calcium carbonate $D_{50}=2.72\ \mu\text{m}$	2.7	0.4	340	30.6	1.6
Titanium dioxide $D_{50}=0.015\ \mu\text{m}$	0.015	0.4	480	30.3	100
Barium titanate $D_{50}=0.32\ \mu\text{m}$	0.3	0.2	990	33.2	1000

乗、空気の流れによる引きはがす力は粒子径の2乗に比例して小さくなる。そのため、ある粒子径以下では引きはがす力より付着する力が大きくなり付着が発生する^[1,2]。

本稿の付着と流速の関係について、流速が低い時は粒子を引きはがす力も小さいため、付着力>引きはがす力となり、低速付着が生じる。流速が大きくなり、付着力<引きはがす力となると、付着が剥がれて粉体が搬送される。しかし流速が一定以上大きくなると融着、静電付着や圧着といった付着力がより強くなることで、再び付着力>引きはがす力となり高速付着が生じる。

本稿では、付着と流速の関係に着目し、近年ニーズが増えている数μm-nmオーダーの微細な粉体に対して、粉体の付着と流速の関係が、粉体の物性が変化した場合にどのようになるか、また具体的にどのくらいの流速が適当であるのかを実験により確認した。

なお、本稿は自己研鑽として社内向けに作成した報告をベースとしているため、実験系や評価方法等に稚拙な点が多いがご容赦頂きたい。

2 実験 1：付着と風速の関係の検証

2.1 材料

今回の実験では、表 1 に示す 6 種類の粉体を用いた。粒子径は MT-3300EX II (マイクロトラック)、

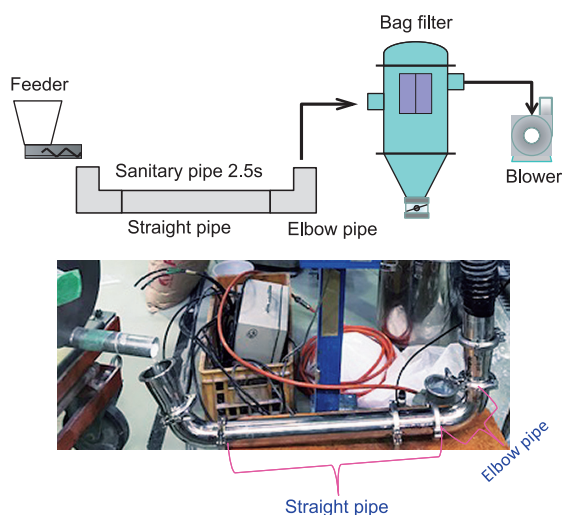


図 1 実験 1 の実験フロー (上) および実験風景 (下)
Fig. 1 Experiment flow (upper) and photo (lower) of Experiment 1.

水分値は加熱乾燥式水分計 MX-50 (A&D) で測定した。圧縮率は 400kN テーブルプレス (NPa システム) を用い、φ40 mm×高さ 35 mm の容積に充填した粉体に圧力を 8 MPa かけた時の圧縮前後の密度比より求めた。

静電気の起こり易さの目安として記載した比誘電率の値は、(株) YEI の HP を参照した^[3]。

2.2 方法

図 1 に実験フローおよび実験風景の写真を示す。2.5S のサニタリ配管を用いて、配管の直管部および、

表 2 直管部の付着量

Table 2 Weight of adhesion at straight pipe.

Material	Velocity [m/s]	Weight of adhesion at straight pipe [g]	Evaluation (Including visual evaluation)
Talc $D_{50}=20\ \mu\text{m}$	42	0.0	No adhesion.
	18	0.0	
Talc $D_{50}=2\ \mu\text{m}$	60	0.0	More adhesion at 42 m/s, less adhesion faster or slower.
	42	4.9	
	18	0.1	
Silica $D_{50}=1\ \mu\text{m}$	80	0.4	Little adhesion. There is a lot of adhesion at 18 m/s. Slightly adheres at 80 m/s.
	62	0.1	
	42	0.1	
	18	1.3	
Light calcium carbonate $D_{50}=2.72\ \mu\text{m}$	80	9.0	The adhesion at 18 m/s is large. At 50 m/s and above, adhesion increases as the velocity increases.
	62	8.2	
	51	5.9	
	42	2.5	
	30	0.0	
	18	3.9	
Titanium dioxide $D_{50}=0.015\ \mu\text{m}$	100	0.0	Little adhesion. There is a lot of adhesion at 18 m/s. No adhesion at 42 m/s. Thin adhesion was seen when the velocity increased.
	80	0.0	
	62	0.2	
	42	0.0	
	18	1.8	
Barium titanate $D_{50}=0.32\ \mu\text{m}$	80	0.0	Little adhesion. There is a lot of adhesion at 18 m/s. No adhesion at 42 m/s. Thin adhesion was seen when the velocity increased.
	62	0.2	
	42	0.1	
	18	35.7	

エルボ部の付着量を確認した。各条件で 1 kg の粉体を流し、付着量は重量および目視にて評価した。含塵濃度は約 $100\ \text{g}/\text{m}^3$ になるように供給量を調整した。配管風速は主に 18, 40, 60, 80 m/s の条件で実験を行った。

2.3 結果

2.3.1 直管部の結果

表 2 に直管部の付着結果を示す。一番右の列に目視評価を加味した傾向を記している。

全体的な傾向として、直管部の付着は考えていたよりも少なく、付着性の高い印象のある二酸化チタンやチタン酸バリウムであってもほとんど付着が生じていなかった。比較的付着の多かった軽質炭酸カルシウムの風速と付着量の関係を図 2 に示す。

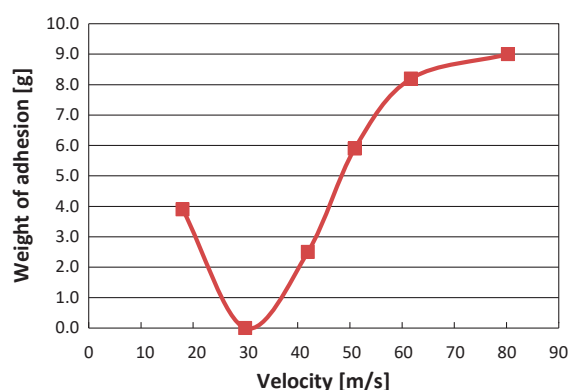


図 2 流速と付着量の関係 (軽質炭酸カルシウム)

Fig. 2 Relationship of the velocity and weight of adhesion at the straight pipe (Light calcium carbonate).

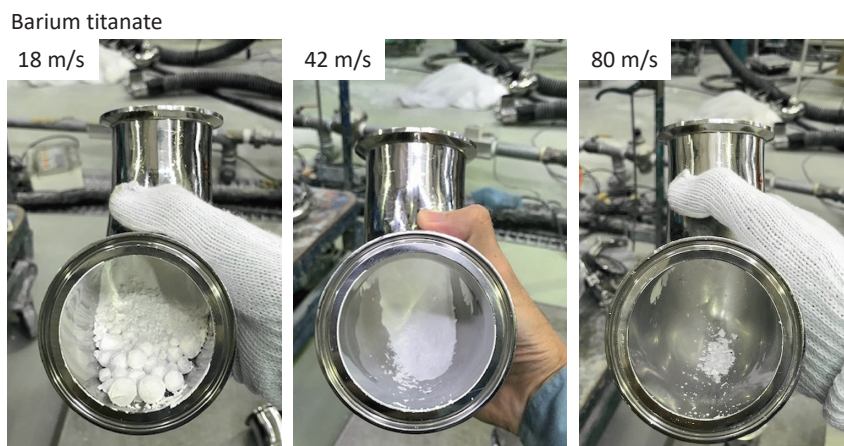


図3 二酸化チタンの直管部の付着の様子
Fig. 3 Adhesion at straight pipe (Titanium dioxide).

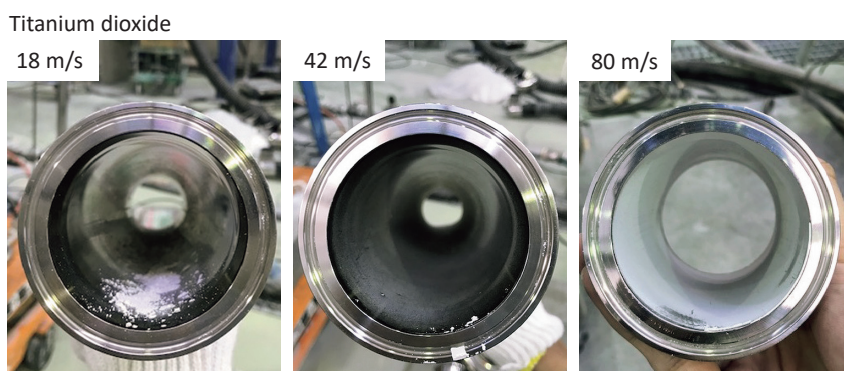


図4 チタン酸バリウムのエルボ部の付着の様子
Fig. 4 Adhesion at elbow pipe (Barium titanate).

風速 30 m/s の時はほとんど付着が生じていないが、風速 18 m/s の時は搬送力不足による粉溜まりがあり、また風速 42 m/s 以上の時は配管全面への付着が確認できた。

また、シリカ、二酸化チタン、チタン酸バリウムの付着性は小さかったものの、風速と付着量の傾向は軽質炭酸カルシウムと同様であった。ともに今回の風速条件では 42 m/s の時の付着量が少なく、18 m/s では搬送力不足による粉だまりがあり、風速が速くなると内管全面への薄い付着が多くなる様子が確認できた。代表例として二酸化チタンの付着の様子を図3に示す。

2.3.2 エルボ部の結果

同じく表3にエルボ部の付着の結果を示す。エルボ部では直管部と異なり、実ライン等で問題となりえる、押し付けられたような硬い付着が確認できた。

直管部の時と同じく、タルクのみ異なる結果であるが、それ以外の粉は同じ傾向を示していた。18 m/s の時は搬送力不足と思われる粉だまりがある点は直管部と同様だが、それより速い風速域では、速くなればなるほど付着が減る傾向であった(表3、図4)。

これまでの実験から得られた知見は以下の通りである。

- 直管部はほとんどの粉で 30–42 m/s 付近の付着が最も少ない。18 m/s では搬送力不足である。
- 風速が 60 m/s 以上に速くなっても、直管部の付着は僅かにしか増加しない(表2、軽炭を除く)。
- エルボ部はほとんどの粉で風速が速ければ速い程付着が少ない(表3)。

表3 エルボ部の付着量

Table 3 Weight of adhesion at elbow pipe.

	Material	Velocity [m/s]	Weight of adhesion at elbow pipe [g]	Evaluation (Including visual evaluation)
R-2	Talc	42	0.0	No adhesion.
R-1	$D_{50}=20 \mu\text{m}$	18	0.0	
R-5	Talc	60	0.7	Little adhesion at 60 m/s.
R-4	$D_{50}=2 \mu\text{m}$	42	2.2	
R-3		18	2.5	
R-16	Silica	80	0.6	Little adhesion. There is a lot of adhesion at 18 m/s. The faster the velocity, the less adhesion.
R-17	$D_{50}=1 \mu\text{m}$	62	0.2	
R-18		42	0.0	
R-19		18	63.8	
R-10	Light calcium carbonate	80	1.6	There is a lot of adhesion at 18 m/s. The faster the velocity, the less adhesion.
R-11	$D_{50}=2.72 \mu\text{m}$	62	5.7	
R-15		51	9.1	
R-12		42	7.4	
R-14		30	14.5	
R-13		18	134.4	
R-24	Titanium dioxide	100	10.1	There is a lot of adhesion at 18 m/s. The faster the velocity, the less adhesion.
R-20	$D_{50}=0.015 \mu\text{m}$	80	31.5	
R-21		62	69.0	
R-22		42	73.7	
R-23		18	101.5	
R-25	Barium titanate	80	6.9	There is a lot of adhesion at 18 m/s. The faster the velocity, the less adhesion.
R-26	$D_{50}=0.32 \mu\text{m}$	62	8.7	
R-27		42	49.6	
R-28		18	239.6	

2.4 考察

上記結果 a より、ほとんどの粉体で 18 m/s では搬送力が不足し、30–42 m/s の時の付着が最も少なかった。今回 18–42 m/s の流速範囲で細かく流速条件を試してはいないが、粉体の搬送で標準的に使用している 20–30 m/s 付近の流速域が、付着現象に着目しても適していると予想できる。

結果 b より、各粉体の比誘電率の値は最大で数百倍異なるにもかかわらず、風速が大きい場合の直管部への付着の様子に明確な差は見られなかった。比誘電率による電気特性の評価や、実験系、実験時間等に不備がある可能性もあるが、これらの粉では静電付着の影響は小さいと考えている。一般に付着性の高いチタン酸バリウムを用いても、直管部へはほ

とんど付着が生じなかったことから、現場で問題となる付着は電気特性によるものではなく、空気の流れや渦による圧密する力が原因であると予想できる。

結果 c より、風速が速い程付着量が少なかったが、これはエルボ部での付着では粉が圧密されているため、空気による掻き取り力が、一次粒子径としてでは無く、粉体の塊として効いているためと予想できる。このような付着箇所では、外部からの衝撃による付着除去も効果があると考えられる。この結果を受けて、「エルボ部のみ風速を上げることで付着が減らせるのでは」と仮説をたて、次の検証を行った。



図5 実験2の実験風景 (2.0S エルボ使用)
Fig. 5 Photo of Experiment 2.

表4 エルボ部の付着量の比較

Table 4 Weight of adhesion at elbow pipe.

Elbow pipe	Weight of adhesion [g]				
	2.5S			2.0S	
Velocity	42 m/s	60 m/s	100 m/s	65 m/s	96 m/s
Light calcium carbonate	7.4	5.7	—	5.5	—
Titanium dioxide	73.7	69	10.1	44	32.7
Barium titanate	49.6	8.7	—	34.3	— 30.3



図6 エルボ部の配管径を変更した場合の付着の様子
Fig. 6 Adhesion when the pipe diameter of elbow was changed.

3 実験2：エルボ部の風速アップによる付着軽減効果検証

3.1 方法と材料

図1と同様のフローにて、配管部の出口側の2.5Sエルボを2.0Sエルボに変更した。それに伴い、前後にレデューサを配置した。配管の写真を図5に示す。粉体は、エルボ部の付着への風速依存が大きかった軽質炭酸カルシウム、二酸化チタン、チタン酸バリウムを使用した(表1)。

3.2 結果

表4に実験結果を示す。配管径が異なるため、付着重量のみでは比較が難しいため、付着の様子で評価した。図6に代表例としてチタン酸バリウムの写真を示す。二酸化チタンの場合、2.5S配管の時は風速が60 m/sから100 m/sとなった時に、付着量が明らかに減っているのに対し、2.0S配管の時は大きな差は見られなかった。付着の様子も2.5S×100 m/sと2.0S×96 m/sの条件で比較すると、2.5S

×100 m/sの方が重量、見た目共に少なく、エルボ部を細くした効果は見られなかった。

チタン酸バリウムの場合も、2.5S×60 m/sの時はほとんど付着が見られないのに対し、2.0S×65 m/sの時は、見た目、重量ともに付着が生じており、エルボ部を細くした効果は見られなかった。

3.3 考察

実験1では風速が速くなるとエルボ部の付着が少なくなったのに対し、実験2ではエルボ部を細くする事で風速を上げたにも関わらず、付着が少なくならなかった。残念ながら、エルボ部を細くして風速を上げる事では、付着対策となっていないと判断できる。この原因としてはやはり、配管径が小さくなったことが影響していると考えている。配管が細くなる事で曲率半径が小さくなり、より急な方向転換が起きているため、エルボ部への衝突力が増えたのではないかと推測する。また単純に配管径が小さくなったため、粉体の壁面への接触機会も増えたことも不利に働いたと予想する。

今後エルボ部を細くする構造の検証を実施するのであれば、曲率半径を揃えた場合の評価や、ノッカー等で外から衝撃を与えた時の付着の違い等を評価すれば、メリットが出る可能性もあると考える。

4 おわりに

今回、付着に関する基礎研究というテーマで、スピード感が重視される日々の業務では深く検討しない点に着目した。結果として、当初の思惑と異なり、粉体の種類に関わらず直管部への付着がほとんど生じず、粉体特性の違いによる傾向を見ることはできなかったが、標準的な風速域が付着に対しても最適

であることを示唆する結果が得られた。

今後も付着という恒久的な粉体に関する問題の解決方法を引き続き考えていきたいと思う。

References

- [1] 松坂 修二, “付着の原因とその評価”, (社)日本粉体工業技術協会編:先端粉砕技術と応用, pp. 451-456, (有)エヌジーティー, 立川 (2005), ISBN:978-4990272036.
- [2] 坂下 攝, “付着の原因とその防止対策”, (社)日本粉体工業技術協会編:先端粉砕技術と応用, pp. 457-465, (有)エヌジーティー, 立川 (2005), ISBN:978-4990272036.
- [3] (株)Y.E.I., 2021, 比誘電率を測ってみませんか? <www.yei-jp.com/tech-infor/dielectric/dielectric.html> accessed 26.08.2021.

著者紹介



清水 健司 Kenji SHIMIZU

〔経歴〕 2006年東京農工大学大学院 応用生命化学科卒業。同年ホソカワミクロン株式会社入社。粉体工学研究所を経て、2019年から現職。

〔専門〕 粉体工学, 生化学。

〔連絡先〕 kshimizu@hmc.hosokawa.com