

## 論 文

## 石炭と炭酸カルシウム粉末の流送帶電

荷 福 正 治\*, 東 猛\*\*, 増 田 閃 一\*\*\*  
(1986年6月27日受理)

A Study on Static Electrification of Coal and Calcium Carbonate Powders during Pneumatic Transportation

M. NIFUKU,\* T. HIGASHI\*\* and S. MASUDA\*\*\*

(Received June 27, 1986)

This research was done to study fundamentals of powder electrification to prevent dust explosion in the process of pneumatic transportation. The powder charge after passing through a stainless steel pipe (30 mmID, 34 mmOD) was measured using coal and calcium carbonate powder as samples. Powder charge was measured in the Faraday Cage with a cylindrical filter at the outlet of the pipe. Powder particles were charged by corona previously with either positive or negative polarity. Powder charge was dependent on the powder concentration and saturated at a certain concentration. The denser powder cloud was saturated electrostatically more rapidly than the sparser one. The result also showed that the transportation velocity affects the powder charge. The powder charge is proportional to the air velocity to the power 1.0-2.7. It is indicated that the previously charged powder will increase its charge after passing through the stainless pipe.

### 1. はじめに

近年、粉体塗料の使用の増加、石油から石炭（微炭）へのエネルギー源の転換等にみられるように、産業界における粉体の取扱い量が非常に増大してきた。これらの粉体は取扱いの便利さから、空気輸送されることが多い。しかしこれに伴って粉体が摩擦帶電を生じ、放電を起こして粉塵爆発を発生する危険も増大している。

粉体の空気輸送により発生する電荷量は、粉体相互や周囲物体との接触・摩擦・分離等の状態、粉体の流送量、粉体の流送速度、粉体や周囲物体の物性等いろいろ

な条件に影響を受け、これらについてはすでに多くの研究がある<sup>1-13</sup>。一方、粉体は輸送用管路に導入される以前において、コロナ放電やフィーダ・ノズル・バルブ等の通過過程でかなり強力に荷電されていることが多く、これらが管路内のその後の帶電への一つの有力な影響因子となりうるものと予想される。しかしこの問題についての研究はいまだ見当たらない。

そこで本研究においては、この点を解明するための第一歩として、粉体へ一定量の強制予備荷電を行なった上で管路流動による帶電を発生せしめ、予備荷電の影響を調べた。さらに、強制予備荷電による粉体の荷電状態の検討も行なった。

### 2. 粉体の予備荷電方法

粉体の予備荷電方法としては、摩擦帶電、衝突帶電、剝離帶電などの方法が考えられ、その測定方法にも、ファラデーケージ法、ブローオフ法<sup>14-16</sup>、直流電界法、交流電界法などがある<sup>17</sup>が、本研究においては、予備荷電条件を同一にする容易さの点で正または負のコロナ放電を用いることとした。この方法によると、コロナ放電中の電流を測定することにより粉体の予備荷電による電荷量を推定しうる。

実験に用いたコロナ荷電部は別報<sup>22</sup>に示すものを用い

\* 工業技術院公害資源研究所 (305 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16-3)

National Research Institute for Pollution and Resources, Agency of Industrial Science and Technology, 16-3, Onogawa, Yatabe-cho, Tsukuba-gun, Ibaraki, 305 Japan

\*\* 元工業技術院公害資源研究所

Formerly with National Research Institute for Pollution and Resources, Agency of Industrial Science and Technology

\*\*\* 東京大学工学部電気工学科 (113 東京都文京区本郷 7-3-1)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Tokyo, 3-1, Hongo 7-chome, Bunkyo-ku, Tokyo, 113 Japan

た。これは、内径 28.5 mm のアクリルパイプの相対する内壁面上に軸に平行に 2 列にそれぞれ放電針を 1 cm おきに 21 個設けてコロナ放電極とし、これと 90° をなす内壁面上の二つの位置に軸に平行に棒状の接地極 2 本を設けてある。コロナ放電極には、正または負の 8 kV の電圧を印加する。この電圧値はコロナ荷電部でストリーマ放電が発生しない最大のコロナ放電電圧である。

### 3. 実験方法

実験装置を図 1 に示す。粉体は所定の供給量にセットされたマイクロフィーダ (PF) より供給され、コロナ荷電部 (CDU) と摩擦帶電発生用のステンレスパイプ (内径 30 mm, 外径 34 mm) を経て電荷量測定用の吸引式ファラデーケージへと流送される。

コロナ荷電部で荷電しない場合とした場合のおのおのにつき、流送パイプ (ステンレスパイプ) を接地したときとしないときの帯電量を測定し、流送パイプ接地の効果をも調べた。

ファラデーケージ内には粉体を捕集するための円筒漉紙を入れてある。円筒漉紙で捕集された粉体の持込み電荷による電流を振動容量型電流計により測定し、その結果をペンレコーダに記録する。

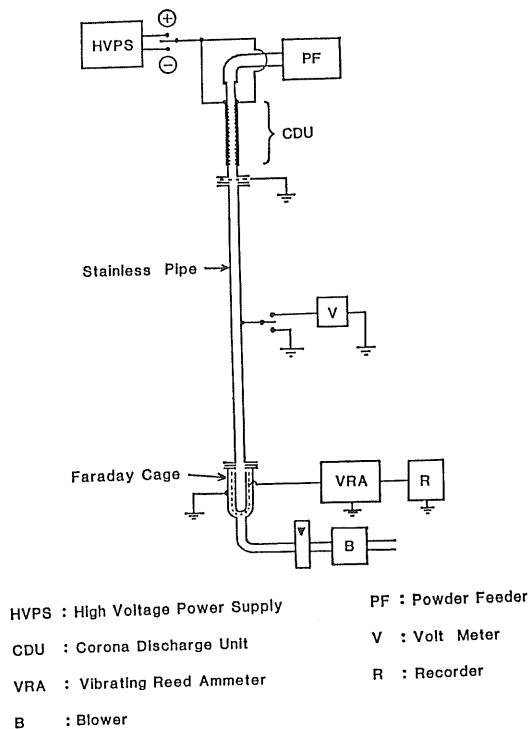


図 1 実験装置

Fig. 1 Experimental apparatus.

粉体の流送量と流送速度は、粉体の帯電量に大きな影響を及ぼすのでこれらを変化させたときの帯電量の変動をも調べた。粉体の供給量は流送中の浮遊粉塵雲濃度が約 50~250 g/m<sup>3</sup> となるように調節した。粉体の流送速度は、5, 10, 15, 20 m/s の 4 段階に変化させた。流送パイプ内の空気速度はプロアへの吸込み口のバイパスによって調節した。

実験に用いた粉体は、石炭と炭酸カルシウムである。石炭と炭酸カルシウムの粒度分布は図 2 と図 3 に示すとおりである。実験条件（常温常圧の大気中）下における石炭の体積固有抵抗は、 $2.3 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ 、表面固有抵抗は  $4.1 \times 10^{14} \Omega$ 、また炭酸カルシウムの体積固有抵抗は  $6.7 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 、表面固有抵抗は  $2.0 \times 10^7 \Omega$  であった。

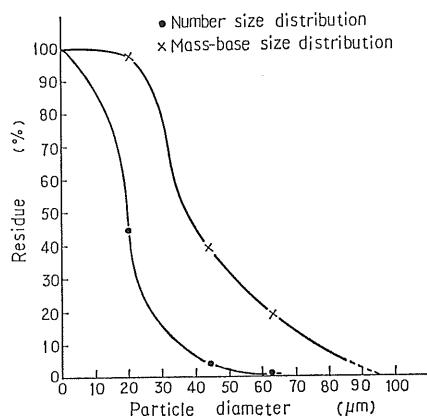


図 2 石炭の粒度分布  
Fig. 2 Particle size distribution of coal.

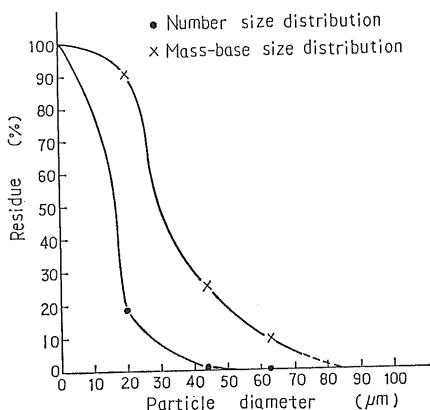


図 3 炭酸カルシウムの粒度分布  
Fig. 3 Particle size distribution of calcium carbonate.

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 コロナ荷電部の荷電特性

コロナ荷電部の放電極に正または負の 8 kV を印加すると、コロナ放電が発生する。このときの放電電流を測定すると、+8 kV 印加のとき、放電電極側で +5~5.5  $\mu$ A、接地極側で +2~2.2  $\mu$ A、-8 kV 印加のとき、放電電極側で -10~-11  $\mu$ A、接地極側で -17~-18  $\mu$ A であった。コロナ荷電部の印加電圧を 9 kV 以上になると、放電電極からストリーマ放電が発生し、同時に高圧電源がトリップする。

コロナ荷電部の長さは 20 cm で、上述の放電電流値を考慮すると、かなり強力な荷電を行なうものと考えられる。

コロナ放電域では粉体が接地極に付着する現象が見られたが、コロナ荷電部に振動を与えることにより、防止することができた。

##### 4.2 粉体濃度と帶電性

粉体の流送速度を一定 (5 m/s) にし、粉体供給量を変えて流送粉体濃度を変えた場合の石炭粉末の帶電による発生電流を図 4 および図 5 に示す。この場合流送速度は一定に保たれているから、発生電流は単位時間に管路を通過する粉体の電荷量に比例している。したがって、この発生電流を粉体濃度と流速で割ると、粉体の比電荷量に比例した量が得られる。

図 4 は、強制予備荷電をしない場合で空気輸送のみによる帶電特性（発生電流）を示すものである。この場合は、粉体濃度を増加すると、発生電流も大きくなり、200 g/m<sup>3</sup> 付近でピークに達し、その後は減少している。このような飽和傾向は、過去の研究<sup>9)</sup>にも示されてい

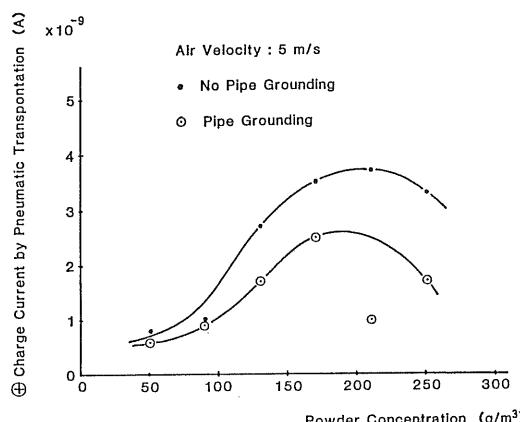


図 4 空気輸送における粉体濃度と発生電流の関係(石炭)

Fig. 4 Effect of powder concentration on charge current by pneumatic transportation.

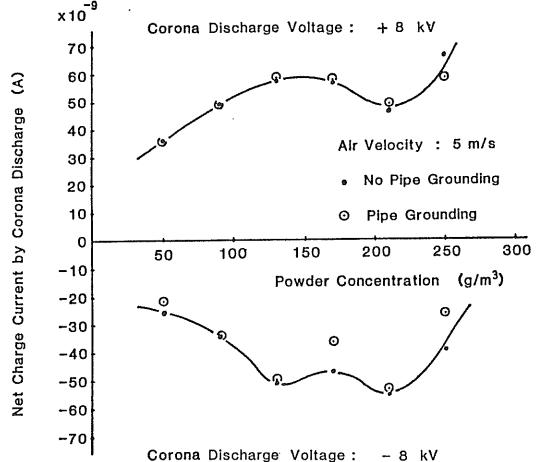


図 5 粉体濃度と強制荷電による発生電流の関係(石炭)

Fig. 5 Effect of powder concentration on net charge current by corona discharge during pneumatic transportation.

る。粉体濃度がある程度以上大きくなると、粉体の発生電流が減少するのは、粉体濃度の増加とともに管壁に接触または衝突しうる新しい粒子の数が減ずるためであろう<sup>8,10)</sup>。もしこの傾向が一般的なものであれば粉体の空気輸送における最終発生電流(流動電流)，したがって粉体の最終帶電電荷を小さくするには、粉体を高濃度で輸送すればよいということになる。

図 5 は、石炭に強制予備荷電をしたときの帶電特性を示すものである。正または負のコロナ放電による強制予備荷電を行なうとパイプ輸送の出口においても石炭は正または負に帶電している。ただし、図の発生電流は、強制荷電による石炭の発生電流から、強制荷電をしないときのそれを差し引いたもので示してある。粉体濃度と発生電流の関係は、強制荷電をしないときと似通っているが、発生電流は、強制荷電をしないときの 10 倍以上となっていることが示されている。粉体濃度を大きくすると粉体の全体としての電荷も大きくなるが、粉体濃度がある程度以上大きくなると、全電荷は減少する。また、粉体の比電荷については粉体濃度の上昇とともに小さくなっていく。これは、浮遊している粉体の濃度が大きいと内部の粉体が十分にコロナ荷電されないためであろうと考えられる。

##### 4.3 輸送速度と帶電性

粉体の流送濃度を一定にし、輸送速度を変えたときの粉体の帶電性を図 6 ~ 図 10 に示す。

図 6 と図 7 は、それぞれ石炭と炭酸カルシウムの強制予備荷電をしないときの管との摩擦のみによる帶電特性

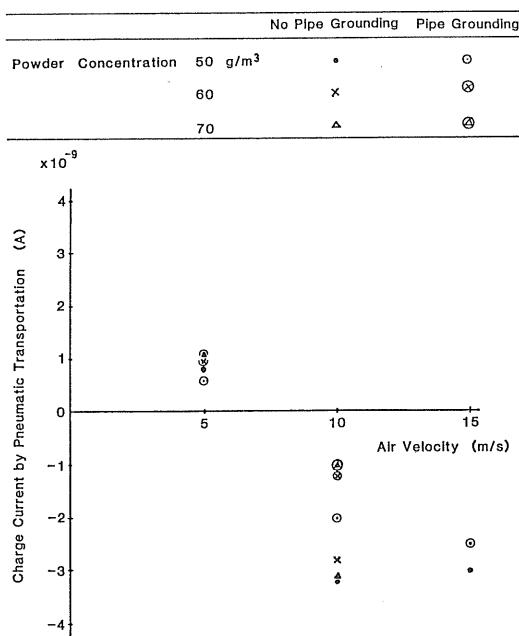


図 6 空気輸送における輸送速度と発生電流の関係(石炭)

Fig. 6 Static electrification of coal by pneumatic transportation and the grounding effect of pipeline.

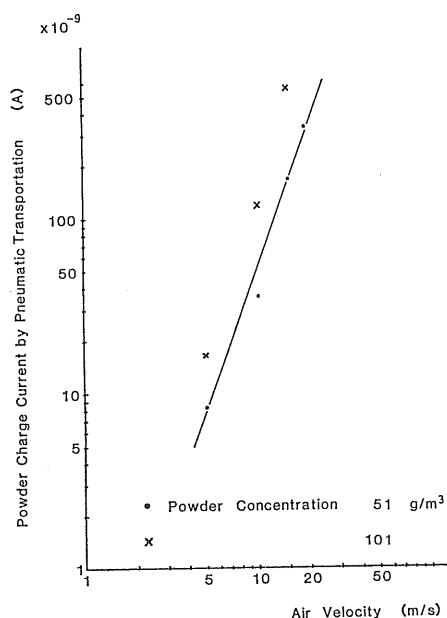


図 7 空気輸送における輸送速度と発生電流の関係 (炭酸カルシウム)

Fig. 7 Static electrification of  $\text{CaCO}_3$  by pneumatic transportation.

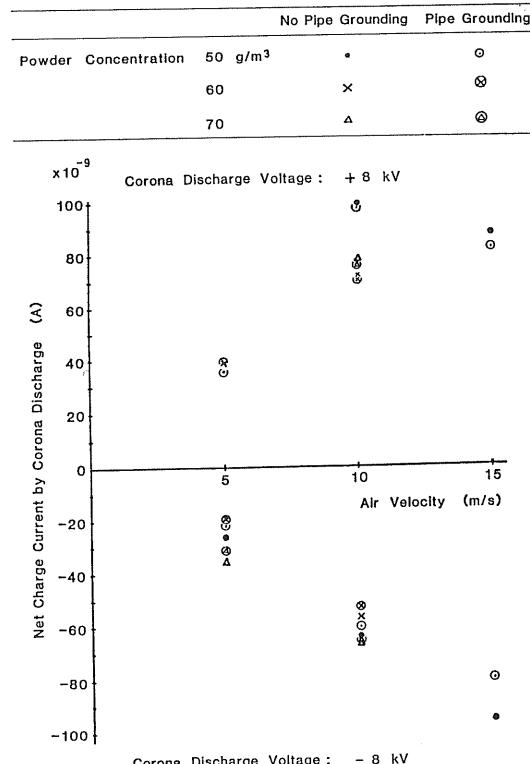


図 8 輸送速度と強制荷電による発生電流の関係 (石炭)

Fig. 8 Net charge of coal by corona discharge during pneumatic transportation and the grounding effect of pipeline.

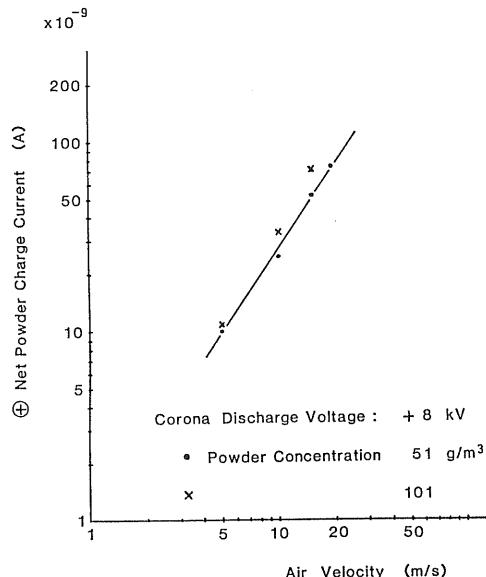


図 9 輸送速度と強制荷電による発生電流の関係 (炭酸カルシウム)

Fig. 9 Net charge of  $\text{CaCO}_3$  by corona discharge during pneumatic transportation.

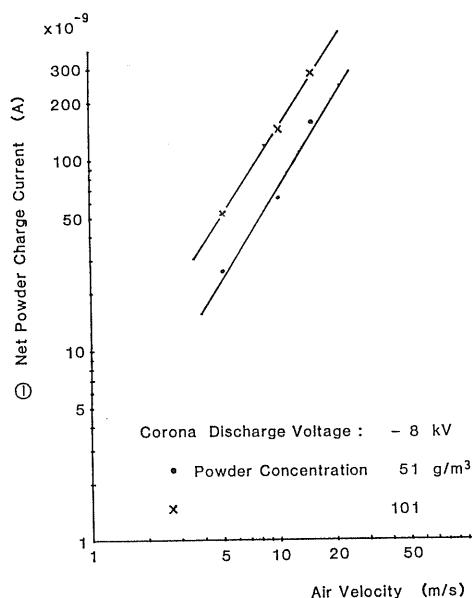


図 10 輸送速度と強制荷電による発生電流の関係 (炭酸カルシウム)

Fig. 10 Net charge of  $\text{CaCO}_3$  by corona discharge during pneumatic transportation.

を示すものである。石炭粉末(図6)の場合には、輸送速度が大きくなるにつれ、発生電流も大きくなり輸送速度13 m/s付近で発生電流がピークに達している。輸送速度6 m/s付近で、石炭の帯電極性が変化しているが、このようなことは、フライアッシュを長距離輸送したとき<sup>9)</sup>にも生じることが報ぜられている。

炭酸カルシウム粉末(図7)の場合には、発生電流は輸送速度の約2.7乗に比例し、粉体濃度の増加に伴い発生電流は単調に増加する。これらの傾向は、これまでの研究<sup>1,3,5-10)</sup>でも示されている。

図8～図10は粉体に強制予備荷電をしたときの粉体の発生電流と空気速度の関係を示すものである。ただし図の発生電流は、粉体に強制予備荷電を行なったときの値から、強制予備荷電を行なわないときの粉体のそれを差引いたもので示してある。石炭、炭酸カルシウムとも、正または負のコロナ予備荷電により、管路出口においても正または負に帶電している。石炭の場合、輸送速度と発生電流の関係は、強制予備荷電を行なわないときと同じく、輸送速度の増加につれ、発生電流も大きくなり、輸送速度13 m/s付近でピークに達している。また、強制予備荷電をすることにより、石炭の発生電流は強制予備荷電を行なわないときの10倍以上となっている。炭酸カルシウムの場合も、輸送速度の増加につれ、発生電流が大きくなり、輸送速度の1.5～1.6乗に比例している。ま

た、濃度の大きいほど発生電流は大きい。この場合には、個々の粒子が輸送管壁と衝突する確率が等しく、単位質量当りの帶電量が流速すなわち管壁への衝突スピードの上昇とともに増大するものと考えられる<sup>8)</sup>。

これらの結果より、輸送速度の増加について発生電流も増加し、輸送速度の1.0～2.7乗に比例するものと考えられる。

なお、強制荷電をしている場合、輸送速度が大きいほど、粉体のコロナ荷電域における滞留時間は短くなり、その分だけ予備荷電量が減少するはずである。

以上のことより、強制荷電した石炭と炭酸カルシウムの粉体のパイプ通過後の帶電は、流速増大とともに帶電量が増大するから、強制荷電された場合、その後の流送によりパイプ内で発生する電荷が増えるものと推定される。その理由は、コロナ荷電は流速増加とともに減少すると考えられるからである。しかし、強制荷電による帶電量をコロナ荷電装置の出口で測定しなかったため、この結論は推定の域をでない。

#### 4.4 コロナ放電の極性と粉体の帯電極性

粉体を空気輸送したとき、粉体に発生する電荷の極性は管路物体の物性に依存する。したがって、空気輸送により発生する粉体の帯電極性は、粉体と管路材質の帶電列により、推定しなければならない。

しかしながらコロナ放電で強制荷電を行なうときは、図5, 8, 9, 10に示されるように、コロナ放電の極性に粉体の帯電極性が一致している。それゆえ、コロナ放電による予備荷電を行なうことにより輸送端での粉体電荷の極性を任意に変化でき、また、管路での帶電についても予備荷電が解明の一助となるものと考えられる。

#### 4.5 コロナ放電による粉体の帯電

単一粒子のコロナ放電による荷電を検討する。粒径が1 μm以上である場合には電界荷電が支配的となるので、粒子の得る電荷量Qは時間tとともに次式に従って上昇し、飽和値 $Q_\infty$ に達する<sup>18)</sup>。

$$Q = Q_\infty \cdot (t/\tau) / [1 + (t/\tau)] \quad (1)$$

$$Q_\infty = 4\pi \epsilon_0 [(3\epsilon_s) / (\epsilon_s + 2)] r^2 E_c \quad (2)$$

$$\tau = 4\epsilon_0 E_c / i \quad (3)$$

ここで、

$\tau$ : 荷電時定数 [s]

$\epsilon_0$ : 真空の誘電率( $8.85 \times 10^{-12}$ ) [F/m]

$\epsilon_s$ : 粒子の比誘電率

$r$ : 粒子半径 [m]

$E_c$ : 荷電空間の電界強度 [V/m]

$i$ : 荷電空間のイオン電流密度 [A/m<sup>2</sup>]

本研究における実験条件から、 $Q$ ,  $Q_\infty$ ,  $\tau$ を求めることとする。

石炭の比誘電率  $\epsilon_s$  は  $5^{19}$ , 炭酸カルシウムの比誘電率は  $6.14^{20}$  である。 $r$  は、図2と図3より、石炭は平均  $10 \mu\text{m}$ , 炭酸カルシウムは平均  $8 \mu\text{m}$  である。 $E_e$  ( $\approx$  コロナ電圧をコロナ電極-接地極間隔で除して求める) は  $4.57 \times 10^5 \text{ V/m}$  である。 $i$  (接地極への流入電流を接地極表面積で除して求める) は  $+8 \text{ kV}$  印加で、 $4.18 \times 10^{-4} \text{ A/m}^2$ ,  $-8 \text{ kV}$  印加のとき  $3.48 \times 10^{-3} \text{ A/m}^2$  となる。これらより、 $Q_\infty$  は、石炭が、

$$Q_\infty = 1.03 \times 10^{-14} \text{ [C]}$$

炭酸カルシウムが、

$$Q_\infty = 0.69 \times 10^{-14} \text{ [C]}$$

となる。 $\tau$  は  $+8 \text{ kV}$  印加のとき  $0.0387 \text{ s}$ ,  $-8 \text{ kV}$  印加のとき  $0.00465 \text{ s}$  となる。 $t$  は、粉体の輸送速度  $5 \text{ m/s}$  のとき  $0.04 \text{ s}$  となる。これらより、(2)式より計算した石炭の  $Q$  は、 $+8 \text{ kV}$  印加、 $5 \text{ m/s}$  のとき、

$$Q = 4.80 \times 10^{-15} \text{ [C]}$$

$-8 \text{ kV}$  印加、 $5 \text{ m/s}$  のとき、

$$Q = -9.04 \times 10^{-15} \text{ [C]}$$

となる。

炭酸カルシウムの  $Q$  は、 $+8 \text{ kV}$  印加、 $5 \text{ m/s}$  のとき、

$$Q = 3.24 \times 10^{-15} \text{ [C]}$$

$-8 \text{ kV}$  印加、 $5 \text{ m/s}$  のとき、

$$Q = -6.11 \times 10^{-15} \text{ [C]}$$

となる。

次に、コロナ放電による粒子の帶電実験結果より、 $Q$  を求めてみる。石炭の真密度は、 $1.91 \text{ g/cc}$  であるので粉体濃度  $50 \text{ g/m}^3$ 、輸送速度  $5 \text{ m/s}$  で輸送パイプを絶縁した場合、 $+8 \text{ kV}$  印加のとき、

$$Q = 1.8 \times 10^{-15} \text{ [C]}$$

$-8 \text{ kV}$  印加のとき、

$$Q = -1.3 \times 10^{-15} \text{ [C]}$$

となる。炭酸カルシウムの真密度は  $2.70 \text{ g/cc}$  であるので、粉体濃度  $51 \text{ g/m}^3$ 、輸送速度  $5 \text{ m/s}$  で輸送パイプを絶縁した場合、 $+8 \text{ kV}$  印加のとき、

$$Q = 3.6 \times 10^{-16} \text{ [C]}$$

$-8 \text{ kV}$  印加のとき、

$$Q = -9.5 \times 10^{-16} \text{ [C]}$$

であった。

ここで、 $Q$  の理論値と実験値を比較すると、実験値は石炭の場合  $+8 \text{ kV}$  印加のとき理論値の  $38\%$ ,  $-8 \text{ kV}$  印加のとき理論値の  $14\%$  となっている。炭酸カルシウムの場合、 $+8 \text{ kV}$  印加のとき理論値の  $11\%$ ,  $-8 \text{ kV}$  印加のとき理論値の  $16\%$  となる。

本研究で用いた石炭や炭酸カルシウムのような絶縁物の場合、過去の研究<sup>21)</sup>では、実験によるコロナ飽和電荷

量は(2)式で求まる  $Q_\infty$  のほぼ半分になることが指摘されている。

#### 4.6 輸送管の接地と帶電性

輸送管接地の有無は本質的には、粒子の発生電流に影響を与えないはずであるが、強制荷電をしない場合、輸送管を接地すると管路端での発生電流が約  $30\%$  減少し、その理由は明らかでない。強制荷電により、粉体粒子を十分に予備荷電すると、輸送管を接地しても、発生電流はほとんど変化しない。

#### 5. 結 言

空気輸送中の粉体の帶電特性を調べるために、流送中の粉体に一定量の強制荷電を行なう方法により、流送条件と帶電性の関係を、空気輸送のみによる実験結果と比較しながら調べたところ、次の結果を得た。

- (1) 粉体の生ずる発生電流は粉体濃度に依存し、ある値でピークに達し、その後減少する。
- (2) 輸送速度の増加につれて発生電流が増加し、輸送速度の  $1.0 \sim 2.7$  乗に比例するものと考えられる。
- (3) 強制荷電された粉体は、その後の流送によりパイプ内で発生する電荷が増えるものと推定される。
- (4) 粉体をコロナ放電で予備荷電するときは、粉体の管路端での帶電極性はコロナ放電極性と一致した。

この研究では、石炭および炭酸カルシウムの粒子の平均半径をそれぞれ  $10, 8 \mu\text{m}$  とし、粒子が球形であるものとして、粒子の発生電流を検討したが、実際の粉体は、いろいろな粒度分布と形状をしているので、この点を考慮しての帶電性の検討をさらにする必要があるものと考えられる。

#### 参 考 文 献

- 1) 増田弘昭、伊藤義文、酒井 潔、井伊谷鋼一：粉体工学研究会誌、10 (1973) 151
- 2) 豊田常彦、田辺弘往：粉体工学研究会誌、12 (1975) 141
- 3) H. Masuda, T. Komatsu, N. Mitsui and K. Iino : J. Electrostatics, 2 (1976/1977) 341
- 4) 東 猛、荷福正治、近藤善資：火災、28 (1978) 31
- 5) S. Kittaka, N. Masui and Y. Murata : J. Electrostatics, 6 (1979) 181
- 6) 増井典明、村田雄司：静電気学会講演論文集'79, p. 127, 静電気学会 (1979)
- 7) P. Boschung and M. Glor : J. Electrostatics, 8 (1980) 205
- 8) 増井典明、村田雄司：静電気学会講演論文集'81, p. 244, 静電気学会 (1981)
- 9) 荷福正治：最新静電気障害の事故例・危険予知防止対策, p. 315, 経営開発センター (1981)
- 10) 上滝具貞、富田侑嗣、湯 晋一：粉体工学研究会誌、12 (1975) 166
- 11) 増田弘昭：静電気学会誌、4 (1980) 128
- 12) 荷福正治：採鉱と保安、28 (1982) 244

- 13) 荷福正治：採鉱と保安，**28** (1982) 307
- 14) L.B. Schein and J. Cranch : *J. Appl. Phys.*, **46** (1975) 5140
- 15) 小口寿彦, 久保 勉, 吉田弘美: 電子写真, **16** (1977) 52
- 16) 鮫岡芳夫, 竹内 学, 長坂秀雄: 静電気学会講演論文集'79, p. 130, 静電気学会 (1979)
- 17) 竹内 学: 静電気学会誌, **4** (1980) 134
- 18) 静電気学会編: 静電気ハンドブック, pp. 93, 269, オーム社 (1981)
- 19) M.P. Groenewege, J. Schuyer and D.W. van Krevelen : *Fuel*, **34** (1955) 339
- 20) R.C. Weast: *Handbook of Chemistry and Physics*, p. E-46, The Chemical Rubber Co., Ohio (1972)
- 21) 増田閃一: 粉体工学研究会誌, **12** (1975) 154
- 22) 荷福正治, 増田閃一: 静電気学会誌, **11** (1987) 178