振動条件下での静電気測定法による粉体粒子の流量測定

Measurement of Particle Flow - rate by Monitoring Static Electricity under Various Vibration Conditions

具嶋 和也,^a 富岡 隆弘,^a 坂本 博,^a

Kazuya Gushima, Takahiro Tomioka, Hiroshi Sakamoto,

大野 薫,^a 時田 実,^b 増田 弘昭^c

Kaoru Ohno, Minoru Tokita, Hiroaki Masuda

Received 1 February 2006 ; Accepted 29 March 2006

This paper is concerned with a newly developed measurement technique of particle flow - rate in gas - solids pipe flow based on the static electrification of particles. The method is found to be feasible to detect the flow - rate as small as 0.5g/s for large alumina particles of 0.3mm in mass median diameter. Here we investigated the effect of sensor vibration on the detection sensitivity to obtain the fundamental data for practical applications of the sensor in various particulate processes such as sand blasting. The jet tests with alumina particles were carried out using a vibration exciter at various frequencies and amplitudes. According to the experiments, it was found that the detection sensitivity increases with the vibration and the sensor can be applied even when the acceleration of vibration is as large as 30G. It was also found that the resonance of the sensor vibration has no significant influence on the measurement of particle flow - rate.

Keywords : Static electricity, Particle sensor, Particle flow - rate, Vibration test, Gas - Solid suspension

1. 緒 言

粉体技術は、工業製品の原料から製品の製造段階まで今日幅広く普及している。鉄道分野においては、その活用の歴史は古く、機関車の砂まきとして起動時、加速時の車輪の空転を防止するために活用されてきた。砂まき装置は現在、高速鉄道にも適用可能な形態へと進化し、新幹線を含めた高速域のブレーキ時の滑走防止用にも使用されている¹⁾。また、鉄道の車両工

場においては、車両や台車の塗装剥がし、あるいは車両部品の汚れ落としなどの用途に粉体を使ったエアースラスト装置を利用している。

上記の鉄道車両用のブレーキなどに適用されている砂まき装置は、粉体粒子を空気中で噴射させており、使用時の粉体流量が0.5g/sと少なく、そのため流量測定を行なうことが難しい。この装置において、粉体の流量超過や低下などを検知できるモニタリングシステムがあれば、粉体を無駄なく効率的に使用することが可能となり、さらに粉体粒子が正常に噴射されているかどうかを確認する手段としての利用が可能となる。エアースラスト装置や粉体輸送装置において、管内を粉体粒子が空気により固気二相流で搬送される場合、粉体の流量を測定する方法として、荷重、衝撃力、静電気や静電容量などの原理を用いた測定法が挙げられる。これらの中で、流れる粉体粒子の濃度が低い場合には、静電気の原理を用いた静電気測定法が最も有効である^{2, 3)}。

筆者らは、前報で、振動を伴わない環境下において

a 財団法人 鉄道総合技術研究所
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) TEL 042-573-7341
Railway Technical Research Institute
(2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji, Tokyo 185-8540, Japan)
b 三協パイオテック株式会社
(〒243-0211 神奈川県厚木市三田9-1) TEL 046-242-5045
Sankyo Pio-Tech. Co., Ltd.
(9-1, Mita, Atsugi, Kanagawa 243-0211, Japan)
c 京都大学大学院工学研究科化学工学専攻
(〒615-8510 京都市西京区京都大学桂) TEL 075-383-2685
Department of Chemical Engineering, Katsura Campus,
Kyoto University
(Kyoto 615-8510, Japan)

粉体粒子が低濃度で管内を流れる場合、同測定法が定量測定に有効であることを検証した⁴⁾。

また、この測定法で粉体流量の検出感度を向上させる方法として、静電気の検出部に着目し、その構造に改良を加えることで、検出感度が向上することを確認した。今回は、砂まき装置が車両に搭載されていることから、測定時の検出感度に影響を及ぼすと考えられる振動に着目した。このように振動を伴う環境下にある装置において、静電気測定法による粉体の流量測定が可能であるかどうかについて、これまで十分な検討はされてこなかった。

そこで、本稿では、粉体噴射装置に取付けられている輸送管を振動させ、輸送管の管内に粉体粒子を空気と混合した固気二相流で流し、そのときの粉体の流量測定を静電気測定法を用いて行った。その際の振動が、粉体の流量測定に与える影響を検証した。

2. 測定原理

管内固気二相流では、粉体粒子が管壁（金属）と衝突を繰り返しながら移動し、衝突する度に粒子と管壁の間で電荷の移動を生じる。この電荷移動は接触物質間の有効電位差 V に支配されており、このときの電位差 V は仕事関数に基づく接触電位差 V_c から、電気影像効果 V_e 、および空間電荷効果 V_b を差し引いた、次式のようになる^{5, 6)}。

$$V = V_c - V_e - V_b \quad (1)$$

1 個の粒子が管内壁面と衝突しながら移動すると考えると、電荷の移動は次のように表される。

$$\frac{dq}{dn(x)} = \varepsilon_0 \frac{SV}{z_0} (1 - e^{-\Delta t/\tau}) \quad (2)$$

ここで、 q は粒子の電荷、 z_0 は接触表面間距離、 ε_0 は空気の誘導率である。 x は流路方向座標、 $n(x)$ は粒子の衝突回数、 S は粒子と内壁の有効接触面積、 Δt は 1 回の接触時間、 τ は帯電の時定数である。次に、多数の粒子が管内を通過するときの帯電現象について考える。このときの発生電流 I は、Eq. (2) から導くことができ、気流中の粒子の混合比が小さいときは次のようになる⁷⁾。

$$\frac{I}{W_p} = a \left(\frac{q}{m_p} \right)_0 + b \quad (3)$$

$$a = \frac{2n(\Delta x)S\Delta t}{\pi D_p^2 \tau} \quad (4)$$

$$b = -\frac{6\varepsilon_0 V_c n(\Delta x)S\Delta t}{\pi D_p^3 \rho_p z_0 \tau} \quad (5)$$

ここで、 W_p は管内通過粒子の質量流量、 m_p は粒子質量、 $(q/m_p)_0$ は $x=0$ での単位質量あたりの電荷、 D_p は粒子径、 ρ_p は粒子密度である。 a 、 b は管内の流速が一定であるとき定数となり、初期電荷が変化しなければ、発生電流は粉体粒子の流量に比例する⁸⁾。検出管の感度を上げるためには、有効接触面積 S と衝突回数 $n(x)$ が重要なパラメータとなる⁹⁾。粉体粒子が輸送管内を低濃度で流れている場合には、発生電流 I の値は小さい。このように発生電流 I が小さい場合には、検出管の内壁の形状を変えて、有効接触面積 S あるいは衝突回数 $n(x)$ を増加することが、発生電流の検出感度を上げるのに有効である。

上述のようなシステム全体が振動するモデルを考えてみると、その構成要素である粉体粒子や輸送管、あるいは静電気の検出部は、振動条件である加速度や周波数などの影響を受けるはずである。その結果、粉体粒子と輸送管の内壁との衝突回数や衝突時間などが影響を受け、発生する電流（検出感度）にも影響を及ぼすと考えられる。

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置

Fig. 1 に、実験に使用した装置の概略を示す。装置は、コンプレッサー、空気タンク、電磁弁、レギュレータ、空気流量計、温・湿度計、空気圧力計、粉体粒子-空気混合装置（以下、混合装置）、輸送管、粉体粒子の静電気量を検出するフロースイッチセンサー（以下、センサー）および測定した静電気（電流）を電圧に変換し、さらにその電圧を増幅させるためのフロースイッチ（三協パイオテック（株）製、ESA-11）、動電式加振機（（株）アカシ製、E-DE45）、噴射ノズル、計測制御用 PC およびメモリハイコダ（日置電機（株）製、8825）で構成されている。センサーの振動特性を調べるために、インパルス・ハンマー（PCB（株）製、086C05 型）と信号増幅用アンプ、硬質プラスチック製の変換チップ、アンチエイリアスフィルタ（NF ELECTRONIC INSTRUMENTS 製、P-84）、ひずみゲージ、動ひずみ計、記録用のデータレコーダ（SONY（株）製、PCCX32Ax）を用い、信号測定および解析用に PC を用いた。

Fig. 2 に、センサーの概略を示す。センサーはステンレス製の円筒状の外管と内管から構成されている。

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Sensor and detection pipe

円筒形状の内管（以下、検出管）は長さ80mm、穴径 $\phi 10\text{mm}$ で、外部とはセラミックス製のアイソレータで電氣的に絶縁されており、管内を流れる空気の漏れを防止するために、円形状のゴムパッキンでシールされている。検出管の内壁には検出感度を向上させるために直径 $\phi 3.0\text{mm}$ の金属棒（以下、インターラプトスティック）をらせん状に4本取り付けられている。この検出管はフロースイッチの+極、外管は-極と接続されている。

3. 2 実験方法

3. 2. 1 振動条件下での噴射試験

振動条件下において、静電気センサーを用いて粉体粒子の流量測定を行い、検出電圧が振動によってどのような挙動を示すか調べるために、センサーを加振機に取り付けて、加振しながら噴射試験を行った。センサーを治具を介して加振機に取り付け、加速度片振幅（以下、加速度振幅）および加振周波数を設定し、上下方向に正弦波で加振した。

粉体粒子は、PCによって電磁弁を開くことにより、噴射される。電磁弁が開くと、コンプレッサーで作られた圧縮空気はレギュレータにより空気流量を調整され、混合装置内に流れ込み、混合装置内の粉体粒子と空気の流量が調整されて固気二相流となり、輸送管、加振機上に取り付けたセンサーおよびノズルまで到達し、ノズル先端部（穴径 $\phi 2.5\text{mm}$ ）より噴射され

Fig. 3 Impact excitation testing for sensor

る。空気搬送により輸送管内を流れてきた粉体粒子は、管内壁と繰り返し衝突することにより静電気が発生し帯電する。このとき混合装置と輸送管の途中に取り付けたセンサー（検出管）には、帯電した粉体粒子とは逆極性の電荷が発生する。この検出された電荷（微小電流）を、フロースイッチで増幅し、さらに電圧に変換する。変換したモニター用の電圧（以下、検出電圧）を、接続したPCおよびメモリハイコーダに出力し測定した。

3. 2. 2 センサー本体の振動特性試験

振動のモード解析を簡易に行う方法として、打撃加振法（インパルス法）が挙げられる。そこで、この打撃加振法を用いて、センサーの固有振動数を求めた。Fig. 3に概略を示す。

Fig. 3は、センサーおよび取り付け治具、定盤を垂直方向に切断した断面図である。Fig. 3に示すように、センサーおよび取り付け治具は定盤上にしっかり固定されている。円筒状の外管の内側にある検出管の上側と下側には、ひずみゲージを2枚貼り、ひずみゲージにつながっている電線は外管に開けた直径 $\phi 11.0\text{mm}$ の孔から外に取り出し、動ひずみアンプと接続した。図中のインパルス・ハンマー先端部から

Table 1 Experimental conditions

Acceleration (m/s^2)	0, 98, 196, 294
Excitation frequency (Hz)	$1.0 \sim 10^3$
Air flow rate (l/min)	250~300
Particle flow rate (g/s)	0.3, 0.5, 0.7
Sampling rate (Hz)	5.0×10^3
Transport pipe	Rubber hose
Antialiasing filter (Hz)	Cut off frequency 2.0×10^3

のびている矢印で示された、センサー（外管）の中央、および取り付け治具の支持（上部）を、インパルス・ハンマーで叩き、加振させた。このときインパルス・ハンマーに取り付けたロードセルにより加振力を推定し、センサー（検出管）に貼ったひずみゲージにより振動応答を測定した。測定した信号は、それぞれサンプリング周波数 5kHz で A/D 変換して PC に入力し、FFT 解析を行って、固有振動数を求めた。折り返し誤差を防ぐために、アンチエイリアスフィルタ（ローパスフィルタ）を周波数 2kHz で挿入した。

4. 試験条件

噴射する粉体粒子の材質は、アルミナ（質量中位径 0.3mm）である。混合装置とセンサーの間に接続する輸送管は、長さ 1m のゴムホース（株）ブリヂストン製、O. K. EXCEL）を使用した。以下、ゴムホースはホースと呼ぶ。空気圧力はゲージ圧で 0.6~0.7 MPa、噴射時間は 30s、測定した電荷（電流）の電流-電圧変換比は $\pm 10^9 \text{ V/A}$ とした。加振機での加振条件は、垂直方向に加速度振幅 98m/s^2 (10G)、 196m/s^2 (20G)、 294m/s^2 (30G)、加振周波数 58~1000Hz で行った。測定時の温・湿度は、それぞれ室内温度が 28~33℃、噴射時の空気湿度が 46.5~75.1% であった。試験条件を Table 1 に示す。

5. 試験結果および考察

5.1 振動が検出電圧に与える影響

5.1.1 加速度振幅の大きさを変えた場合

Fig. 4 に、加振機に取り付けたセンサーを、加速度振幅 98m/s^2 、 196m/s^2 、 294m/s^2 で加振しながら、それぞれ粉体流量を 0.3g/s、0.5g/s、0.7g/s の 3 段階で噴射したときの検出電圧の測定結果を示す。ここでは、加振周波数はいずれも 100Hz とした。図中の Jetting command は電磁弁の開閉の信号である。粉体流量がそれぞれ 0.3g/s、0.5g/s、0.7g/s である Fig. 4 (a), (b), (c) のどの場合においても、加速度振幅が大きくなるにつれて、検出電圧も高い値を示す

(a) Particle flow rate : 0.3g/s

(b) Particle flow rate : 0.5g/s

(c) Particle flow rate : 0.7g/s

Fig. 4 Influence of acceleration
(frequency : 100Hz, rubber hose)

結果となった。このように、粉体流量あるいは加速度振幅が増加することによって検出電圧が大きくなった理由は、いずれの条件でも、輸送管や検出管の内壁と衝突する粉体粒子の数が増加したためと考えられる。

センサーの加振の有無で検出電圧を比較すると、いずれの粉体流量でも、加振しない場合に比べて加振した場合の方が高い検出電圧の値を示した。特に、粉体流量がそれぞれ 0.5g/s、0.7g/s である Fig. 4 (b), (c) において、センサーの加速度振幅を 294m/s^2 で

Fig. 5 Influence of acceleration and particle flow rate

加振した場合には、加振しない場合に比べて、検出電圧が1.0V程度増加した。このことから、振動条件下において流量測定を行う際には、振動の影響を考慮して使用する必要がある。

次に噴射波形に注目すると、センサーは最大で加速度振幅 294m/s^2 で加振されているにもかかわらず、加振しない場合と同様に、検出電圧の噴射波形は安定している。このことから、振動を伴う環境下においても、このセンサーを用いた粉体流量の測定が可能であることが分かった。

5. 1. 2 粉体流量と加速度振幅を変えた場合

Fig. 5に、加振周波数を100Hzで一定とし、加速度振幅 98m/s^2 、 196m/s^2 、 294m/s^2 のそれぞれの加振条件において、粉体流量を 0.3g/s 、 0.5g/s 、 0.7g/s の3段階で噴射したときの、粉体流量と検出電圧の関係を加速度振幅ごとに測定した結果を示す。Fig. 5から、検出電圧は加速度振幅の増加、あるいは粉体流量の増加とともに、ほぼ直線的に増加することが分かった。

5. 1. 3 加振周波数を変えて加振させた場合

粉体理論に基づき考えた場合、振動条件である加振周波数が増加すると、それに伴い管内を流れる粉体粒子と管内壁の衝突回数が増加し、検出電圧は増加する傾向を示すはずである。そこで、加振周波数と検出電圧に上記のような相関があるかどうかを調べるために以下の条件で試験を行った。

加速度振幅を 98m/s^2 、 196m/s^2 、 294m/s^2 とし、加振周波数を 58Hz ～ 1000Hz の範囲で条件を変えて、粉体流量を 0.5g/s で噴射した。そのときの検出電圧と加振周波数の関係を加速度振幅ごとに測定した結果を Fig. 6に示す。この場合、周波数 f と加振変位 d (以下、単に振幅と呼ぶ) の間には、次式の関係が成り立つ。ただし、 a は加速度振幅 (m/s^2) である。

Fig. 6 Influence of frequency under vibration conditions

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{d}} \quad (6)$$

Fig. 6より、加速度振幅をそれぞれ 98m/s^2 、 196m/s^2 、 294m/s^2 で加振した場合、加速度振幅が高い程、加速周波数のすべての領域において検出電圧は高い値を示した。また、どの加速度振幅においても、検出電圧は周波数が 58Hz から 1000Hz まで増加するとともに減少傾向を示した。

この測定結果は、粉体理論から導き出した結果と反する結果となり、加振周波数が増加すると検出電圧は減少する傾向を示した。すなわち、周波数が高く速い振動において、検出電圧は振動に追従しておらず、検出管内で発生する発生電流は振動による影響を受けなくなる結果となった。

次に、加振周波数と振幅の間には前述の Eq. (6) の関係が成り立つことから、Fig. 6の横軸を振幅に置き換えてプロットした図を Fig. 7に示す。

Fig. 7より、振幅が 0.005mm あるいは 0.0065mm で加速度振幅を 98m/s^2 、 196m/s^2 としたときのそれぞれのプロットは、加振しない場合の検出電圧 1.44V を表す破線と交差していることが分かる。このことから、振幅が 0.005mm 以下で加振した場合には、加振しない場合の検出電圧 1.44V 程度となり、振幅が 0.005mm 以下では振動による影響を受けなくなることが分かった。Fig. 7について検出電圧と振幅の関係を求めるために式 $y = A \ln x + B$ を用いて最小二乗法により直線近似を行った。近似式の原点は振幅 0.005mm 、検出電圧 1.44V とした。ここで、 y は検出電圧、 x は振幅、 A 、 B は定数である。計算した結果、定数 A 、 B はそれぞれ加速度振幅が 98m/s^2 のとき 0.05 と 1.70 、 196m/s^2 のとき 0.09 と 1.93 、 294m/s^2 のとき 0.16 と 2.29 となった。Fig. 7に示す実際

Fig. 7 Influence of amplitude under vibration conditions

は、加速度振幅が 98m/s^2 、 196m/s^2 、 294m/s^2 のそれぞれについて、近似式で求めた近似直線である。

Fig. 7 の近似直線が、データに対して妥当性があるかどうか判断するために、Fig. 4 (b) の測定結果と比較した。Fig. 4 (b) の場合、加振周波数が 100Hz 一定で、加速度振幅が 98m/s^2 (振幅 0.25mm)、 196m/s^2 (振幅 0.5mm)、 294m/s^2 (振幅 0.75mm) のとき検出電圧はそれぞれ 1.64V 、 1.93V 、 2.29V である。この Fig. 4 の加速度振幅が 196m/s^2 の場合の検出電圧を Fig. 7 の近似直線と比較すると検出電圧の差は 0.06V 程度で、加速度振幅が 98m/s^2 と 294m/s^2 の場合の検出電圧は、ほぼ近似直線上に検出電圧のプロットが位置する。この結果から、求めた近似直線は Fig. 7 のデータに対して精度が高く、有効であると推測される。

この Fig. 7 の近似直線から、振幅が同じ場合には加速度振幅が 98m/s^2 、 196m/s^2 、 294m/s^2 と大きくなるに従って検出電圧も増加し、振幅が大きくなると検出電圧も増加することが明らかになった。

5. 1. 4 固有振動数解析

外部からセンサーに対して固有振動数と一致した振動数の振動が与えられた場合、その振動によってセンサーには共振現象が生じる。このような振動条件下において、センサーを用いて粉体流量の測定を行うと、検出電圧は共振現象によって影響を受けられると思われる。そこで、センサーの固有振動数を調べるために、打撃加振試験を行った。

Fig. 8 に、打撃加振試験で得られた結果を示す。Fig. 8 (a) は、インパルス・ハンマーで加振したときの信号波形である。信号波形には、センサーを加振させるためにハンマーで 30 回定期的に叩いたことを示すパルス波形が見える。Fig. 8 (b), (c) は、検出管の上側と下側に貼ったひずみゲージで測定した振動応

(a) Excitation pulse of impulse hammer

(b) Response pulse of strain gauge (top surface)

(c) Response pulse of strain gauge (bottom surface)

Fig. 8 Vibration pulse of impulse hammer and straining gauge

答である。

インパルス・ハンマーによる加振力のパルス波形と同様のタイミングで、振動応答のパルス波形が表れており、検出管が加振力に対して応答していることが分かる。加振力に対する応答を表すひずみ量は、 10×10^{-6} 程度の小さいひずみ量であった。

Fig. 9 に、測定した Fig. 8 (a), (b) のパルス波形について、それぞれ FFT 解析を行い、加振力に対する検出管の上側で測定したひずみの伝達関数を求めた結果を示す。Fig. 9 より、解析した周波数 $1.0 \sim 1000\text{Hz}$ において、固有振動数と見られるピークが 595Hz に存在することが分かった。

次に、Fig. 9 に示された振動波形について、加振力に対するひずみとの間の相関を表すコヒーレンス関数を Fig. 10 に示す。検出管の上側のひずみゲージで測定したひずみは微小な量であるが、Fig. 10 に示すように、コヒーレンスが固有振動数付近で 0.9 以上と

Fig. 9 Transfer function between excitation force and vibration response

大きいことから、求めた固有振動数は信頼性があると判断できる。また、検出管の下側のひずみゲージにおいても同様の結果を得た。

さらに、センサーが取り付けられている支持部についても、インパルス・ハンマーでの打撃加振試験を行い、同様の周波数にピークが表れることを確認した。

5. 1. 5 固有振動数で加振させた場合

共振現象を生じる固有振動での振動が、検出電圧にどのような影響を与えるのかを調べるために、センサーを固有振動数で加振しながら、粉体粒子の噴射試験を行った。Fig. 11に、加振周波数を固有振動数 595Hz で、加速度振幅をそれぞれ 98m/s^2 、 196m/s^2 、 294m/s^2 として、センサーを加振した場合と加振しない場合について、粉体流量を 0.5g/s で噴射したときの検出電圧の測定結果を示す。

Fig. 11の加速度振幅が異なるそれぞれの場合について検出電圧を比較したが、センサーを加振した場合と加振しない場合では、検出電圧は最大で 0.3V 程度の差であった。一方、前述 Fig. 4 (b) の加振周波数

Fig. 10 Coherence between excitation force and vibration response

Fig. 11 Influence of sensor resonance frequency (particle flow rate: 0.5g/s)

を 100Hz で加振した場合には、検出電圧は加速度振幅の増加とともに増加し、加振しない場合と比べて検出電圧は 1.0V 程度の差があった。このことから、固有振動数 595Hz で加振した場合の方が、加振周波数 100Hz で加振した場合に比べて、加速度振幅によって検出電圧が受ける影響が少ないと考えられる。

次に、Fig. 11の固有振動数で加振した測定結果が共振現象により特異な挙動を示さず、測定結果に連続性が認められるか確認するために、Fig. 7の測定結果と比較した。Fig. 11の固有振動数において、加速度振幅がそれぞれ 98m/s^2 、 196m/s^2 、 294m/s^2 の場合の検出電圧は、 1.38V (振幅: 0.007mm)、 1.4V (0.014mm)、 1.6V (0.021mm) で、それらの検出電圧を Fig. 7に対して当てはめると、Fig. 7の結果に対して特異性は認められず、固有振動数での結果は連続性があるものと考えられる。

振動特性上、問題と考えられた、センサーの固有振動数で加振した状態での噴射試験では、検出電圧は特異な挙動を示すことはなく、加振周波数と検出電圧の間には連続した相関関係が認められた。また、このときの噴射波形は加振しない場合と同様に安定した波形を示し、センサーは共振現象の影響を受けることなく測定が可能であった。

これらの試験結果から、静電気センサーは変動がなく振動が一定の振動条件下では、管内の粉体粒子の流れの有無を検知することが可能で、粉体粒子の定量測定も可能であることが分かった。振動が一定でなくランダムに変動するような振動条件下においては、粉体粒子の流れの有無を検知することは可能であるが、粉体粒子の定量測定を行うためには振動によって検出電圧が受ける影響を除去、あるいは補正するような工夫が更に必要と考えられる。

6. 結 言

振動条件下にある、管内固気二相流における質量中位径 0.3mm のアルミナ粒子の流量を、静電気測定法を用いて測定した結果、以下の結論を得た。

- 1) 加振条件下においても、流量測定による噴射波形は、加振しない場合と同様に安定した波形であった。
- 2) センサーの固有振動数は 595Hz で、固有振動数での加振条件でも共振現象の影響を受けず、安定して測定ができた。
- 3) センサーを加振した場合、検出電圧は加振条件である加速度振幅および振幅によって影響を受けることを確認した。加振時の振幅が 0.005mm 以下の場合には、振動の影響を受けないことが明らかになった。
- 4) 加振条件である加速度振幅、あるいは振幅が増加

すると、振動している輸送管あるいは検出管内において、それぞれの管の内壁と衝突する粉体粒子の数が増加し、その結果検出電圧が大きくなったものと推測される。

- 5) 当センサーは振動を伴う環境下において、粉体粒子の流れを監視するモニタリング装置として使用する場合には、振動条件の変動の有無にかかわらず有効である。粉体粒子の流量を測定する装置として使用する場合には、加振条件が変動すると検出電圧も変動し、測定結果に影響を及ぼすことから、振動を検知し補正するための手段を検討する必要があると考えられる。

〔謝辞〕 本稿を執筆するにあたり、助言を頂きました財団法人 鉄道総合技術研究所の瀧上唯夫氏、三協パイオテク株式会社の渡辺金之助会長、齋藤和男氏に感謝の意を表します。

Nomenclature

a	: constant defined by Eq. (3)	(—)	V_b	: potential difference affected by space charge	(V)
b	: constant defined by Eq. (4)	(C · kg ⁻¹)	V_c	: contact potential difference	(V)
D_p	: particle diameter	(m)	V_e	: potential difference affected by image charge	(V)
d	: sensor displacement by vibration	(m)	W_p	: powder flow rate	(kg · s ⁻¹)
I	: electric current	(A)	x	: length from a point	(m)
m_p	: particle mass	(kg)	Δx	: length of a pipe	(m)
$n(x)$	: number of collisions of a particle	(—)	z_0	: gap between contact bodies	(m)
q	: particle charge	(C)	ϵ_0	: permittivity of air	(F · m ⁻¹)
$(q/m_p)_0$	: initial charge per unit mass of particles	(C · kg ⁻¹)	ρ_p	: particle density	(kg · m ⁻³)
S	: contact area between particle and wall	(m ²)	τ	: time constant of electrification	(s)
Δt	: duration of contact	(s)			
V	: potential difference	(V)			

References

- 1) Ohno, K., T. Ban, K. Gushima, S. Ohe and K. Honda : "Application of adhesion improvement material jetting to prevent wheel skidding and slipping", *Railway Research Review*, **59**-4 10-13 (2002)
- 2) Iinoya, K., H. Masuda and K. Watanabe : "Powder and bulk solids handling processes", pp. 65-108, Marcel Dekker (1988)
- 3) The Association of Powder Process Industry and Engineering Japan : "Funryutai Keisoku Handbook", ed. by APPIE, pp. 401-403, Nikkan (1981)
- 4) Gushima, K., H. Sakamoto, K. Ohno, M. Tokita, K. Saito and H. Masuda : "Measurement of Mass Flow Rate of Particles in Gas-Solid Suspension Flowing in Pipe", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **42**, 708-714 (2005)
- 5) Matsusaka, S. and H. Masuda : "A New Method for Measurement of Powder Flow Rate Based on Static-electrification", *THE MICROMERITICS (Funsai)*, **39**, 92-99 (1995)
- 6) Masuda, H., S. Matsusaka and H. Shimomura : "Measurement of Mass Flow Rate of a Polymer Powder Based on the Static Electrification of Particles", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **34** 919-923 (1997)
- 7) Matsusaka, S. and H. Masuda : "Electrostatics of particles", *Advanced Powder Technol.*, **14**, 143-166 (2003)
- 8) Masuda, H., S. Matsusaka, S. Akiba and H. Shimomura : "Electrification of fine particles in gas-solids pipe flow", *KONA : Powder and Particle*, **16**, 216-222 (1998)
- 9) Matsusaka, S., M. Ghadiric and H. Masuda : "Electrification of an elastic sphere by repeated impacts on a metal plate", *J. Phys. D:Appl. Phys.*, **33**, 2311-2319 (2000)