

振動型静電界センサ内の送風の電界強度計測への影響†

野 舘 直 人*¹ 鈴木 輝 夫*¹ 崔 光 石*² 山 隈 瑞 樹*²

産業現場において、振動型静電界センサは粉体の静電気安全管理の器具として活用されている。本研究では、粉体の浸入の防止策である送風が静電界センサの計測値に及ぼす影響を調べた。帯電物体を模擬した帯電板を用意し、静電界センサ内を送風しながら、送風圧力、平行平板電極間の電界強度（計算値）、静電界表示器の計測値の3つのパラメータを用いて調べた。実験結果から、送風圧力の影響により、静電界表示器の計測値は、平行平板電極間の電界強度（計算値）と同値とはならなかった。また、送風圧力の影響により、零点がずれると共に、電界強度の検出が低下した。これらの主な原因は、チョップの振幅が送風圧力の影響を受けていることであった。

キーワード：静電界センサ、静電気、粉体、電界強度、送風

1 序論

粉体プロセスでは、粉体が容器・配管などの壁との摩擦が繰り返されて、強く帯電する場合がある。それに起因した着火・爆発事故が発生する危険性がある。そのため、静電気の安全管理が不可欠である。粉体の静電気を安全に管理する上で重要となる物理量は電荷量と電界強度である。粉体の電荷量を計測する方法として、ファラデーケージ法が挙げられる。しかし、粉体のサンプリングが必要なことや、現場においてリアルタイムで長期連続計測を実施することは容易ではない。一方、帯電粉体が形成する電界強度を計測する方法として、静電界センサ¹⁾による計測が挙げられる。静電界センサで一般に使用されているものが振動型静電界センサ²⁾である。しかし、振動型静電界センサで帯電した粉塵雲を計測する場合、粉体が静電界センサ内に紛れ込んでしまい、計測不能状態に陥ってしまうことがある。その打開策として、静電界センサ内を送風することで静電界センサ内への粉体の浸入を防ぐことにした。しかし、送風によって、静電界センサの計測値が乱れてしまうことが懸念された。ここでは、その送風による電界強度の計測値への影響を定量的に調べたので、その結果について報告する。

2 実験装置および方法

本実験に使用した振動型静電界センサの構造を図1に示す。静電界センサが測定する電界は、帯電物体と静電界センサの検出電極の間に、かつ、検出電極の表面に対して主に垂直方向に形成したものである。

電界検出の原理は、チョップが振動することによって、検出電極に入る電界が変化し、検出電極に誘導される電荷 q [C] が生じるものである。従って、 $dq/dt = I_s$ となるので、変位電流 I_s [A] が検出電極と接地間に流れることになる。 I_s を抵抗 R_s [Ω] によって、変位電圧 V_s [V] に変換する。 V_s の増幅回路、符号判断回路、平滑回路を経た後、

表示回路によって、電界強度 E [V/m] を計測する。

実験装置の概要を図2に示す。本実験装置は、主に、静電界センサ（春日電機（株）、KSF-0201（図3））、静電界表示器（春日電機（株）、KSV-800AP）、平行平板電極、直流高電圧電源（春日電機（株）、AKTP-25 1PN）、エアコンプレッサ（（株）日立製作所、7.50P-7V）、エアドライヤ（CKD（株）、RD2008-AC100V）で構成されている。

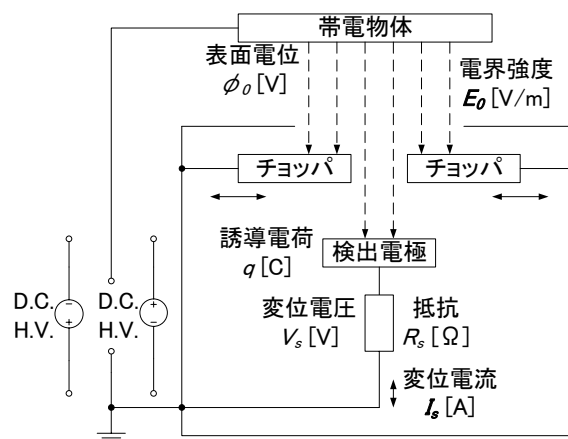


図1 振動型静電界センサの構造図

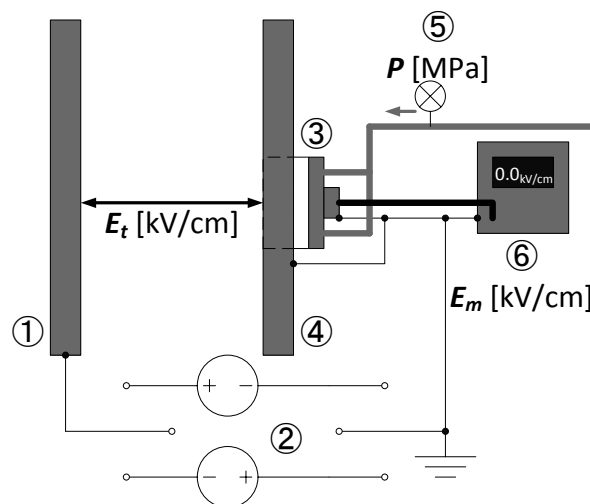


図2 実験装置の概要図（①帯電板、②直流高電圧電源、③静電界センサ、④接地板、⑤圧力計、⑥静電界表示器）

† 原稿受付 2014年10月30日

† 原稿受理 2014年12月11日

J-STAGE Advance published date: January 16, 2015

*1 春日電機株式会社

*2 (独)労働安全衛生総合研究所 電気安全研究グループ

連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園1丁目4番6号

(独)労働安全衛生総合研究所 電気安全研究グループ 崔 光石

E-mail: choiks@s.jniosh.go.jp

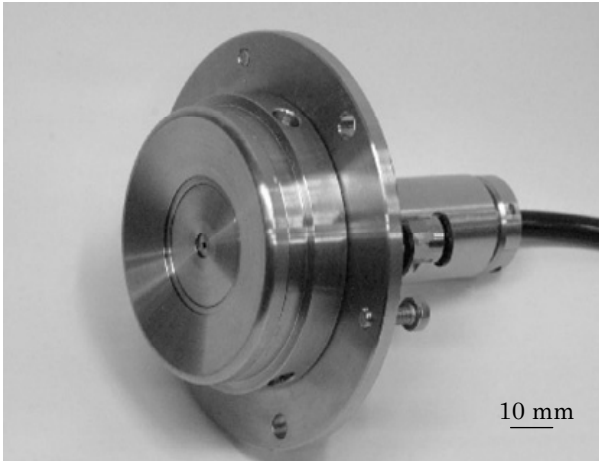


図3 振動型静電界センサ

静電界センサを平行平板電極の接地板の中央に設置した。静電界センサから出力した信号を静電界表示器で、 E として計測した。平行平板電極は帯電板と接地板からなる。帯電板は、帯電物体を模擬し、直流高電圧電源により、平行平板電極間に高電圧を印加し、電極間電圧 $V = -10.0 \sim +10.0$ kV の範囲で 2.0 kV ずつ変化させた。実験は、静電界センサ内の送風圧力 P [MPa]、平行平板電極間の電界強度（計算値） E_t [kV/cm]、静電界表示器の計測値 E_m [kV/cm] の3つのパラメータについて行った。

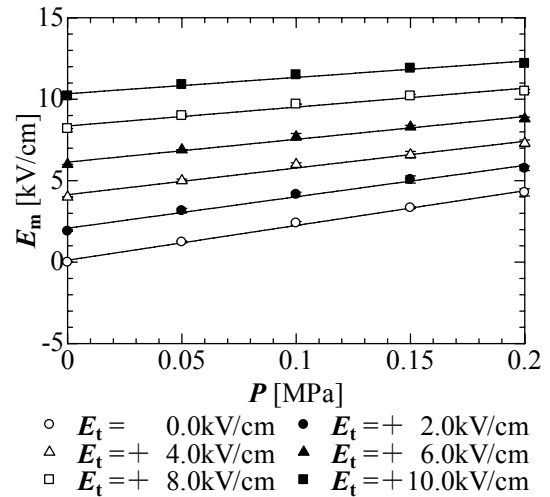
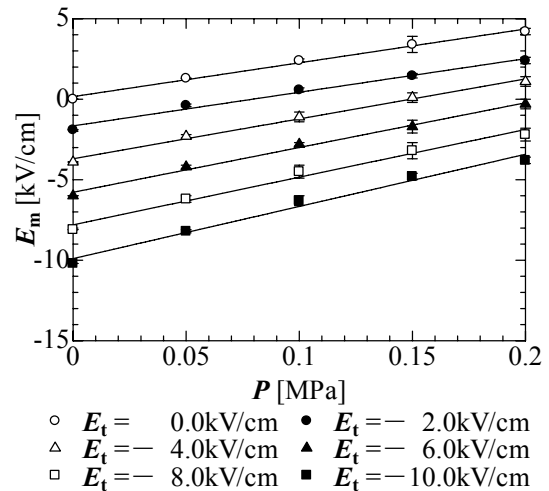
3 実験結果および考察

E_t をパラメータとして、 P を変化させた時の E_m の変化について測定した。実験の目的は、本来、 E_t と E_m が同値になるはずであるが、送風することによって、 E_m を E_t と比較すると異なる値となる可能性があるため、そのことを詳細に調べることである。

本実験では、始めに、送風なしの状態では、 E_t と E_m に関して、零点調整 ± 0.0 kV/cm を行い、その後、増幅具合の調整 $+5.0$ kV/cm、 -5.0 kV/cm を行った。較正後、実験条件で指定した E_t に固定し、連続で P を変化させながら、 E_m を測定した。それらの実験結果をまとめ、図4 (E_t ; + の領域)、図5 (E_t ; - の領域) に示す。

これらのことから、以下の3つのことが分かった。①送風を行うことにより、 E_m と E_t にずれが発生し、 P が強くなるほど、その影響が大きくなった。例えば、 $E_t = -10.0$ kV/cm では、 $P = 0.00, 0.10, 0.20$ MPa と変化させると、 $E_m = -10.2, -6.3, -3.8$ kV/cm までずれた。②本実験では、 E_t が正から負に行くほど、 E_m と E_t とのずれが大きくなった。例えば、 $P = 0.00$ MPa から $P = 0.20$ MPa に変化する時、 $E_t = +10.0, \pm 0.0, -10.0$ kV/cm の順に条件を変更すると、 E_m のずれは、 $+2.0, +4.3, +6.4$ kV/cm と変化した。③零点も送風の影響を受けた。具体的に $P = 0.00$ MPa から $P = 0.20$ MPa に変化する時、 E_m は、 $+4.3$ kV/cm のずれが発生した。

次に、上記の実験結果より、詳細に零点調整の影響を調べるために追加実験を行った。実験手順の大まかな流

図4 P に対する E_m の変化 (E_t ; + の領域)図5 P に対する E_m の変化 (E_t ; - の領域)

れは上記の実験と同様である。但し、追加手順として、 P を変化させると零点がずれてしまうので、設定した P で再度零点調整 ± 0.0 kV/cm を行った後、実験条件で指定した E_t を変化させて、 E_m を測定した。それらの実験結果をまとめ、図6 (E_t ; + の領域)、図7 (E_t ; - の領域) に示す。

これらのことから、以下の3つのことが分かった。①送風状態で零点調整を行っても、 E_m と E_t にずれが発生した。つまり、送風状態で増幅具合の調整もしなければならぬ。② E_t を大きくするほど、 E_m と E_t とのずれが大きくなった。例えば、 $P = 0.20$ MPa の条件で、 $E_t = +2.0, +6.0, +10.0$ kV/cm と変化させると、 E_m のずれは、 -0.3 (検出低下率 E_m/E_t ; 15%)、 -1.1 (18%)、 -1.6 (16%) kV/cm と変化し、検出低下率は E_t に依存しなく、2割前後であった。③ P が強くなるほど、その変化の度合いが大きくなった。例えば、 $E_t = +10.0$ kV/cm の時、 $P = 0.00, 0.10, 0.20$ MPa の順に条件を変更すると、 $E_m = +10.1, +9.2, +8.4$ kV/cm と変化した。

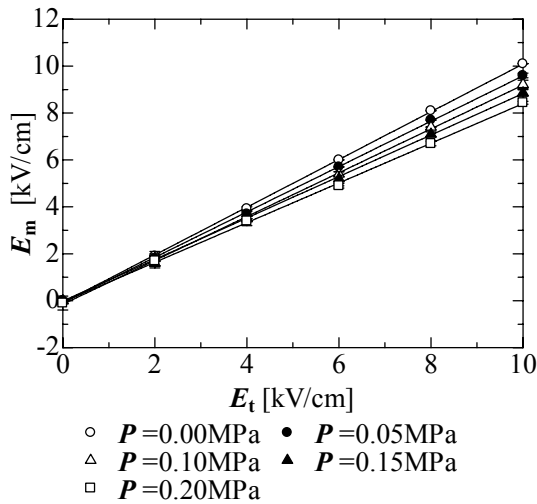


図6 E_t に対する E_m の変化 (E_t : + の領域) (指定する P の強さ毎で再度零点調整)

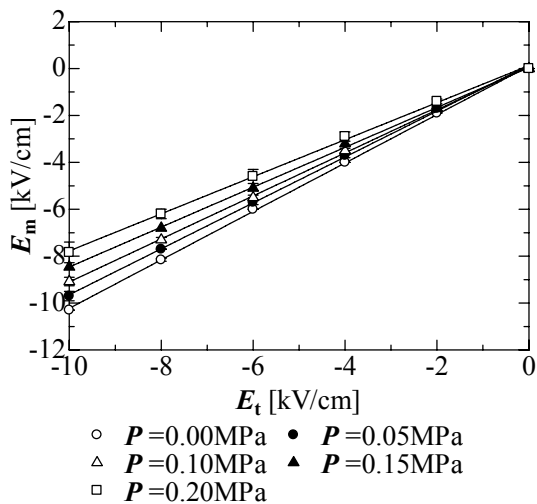


図7 E_t に対する E_m の変化 (E_t : - の領域) (指定する P の強さ毎で再度零点調整)

始めの実験と追加実験を行ったことにより、 E_m が P の影響を受けることが明らかとなったため、静電界センサからの出力信号 V_s [mV] に関する P の影響について検証実験を行った。 V_s は静電界センサの検出電極の信号をオペアンプ IC で用いた増幅回路による信号である。 V_s をオシロスコープ (RECROY (株) 製, 454) でサンプリング周波数 200 kS/s にして波形を観測した。実験結果を図 8 に示す。実験結果から、 V_s は、 P の有無に関らず共に周波数が 1 kHz であったことから、周波数には P の影響がないことが分かる。このことから、オペアンプ IC の周波数特性による増幅回路の増幅度の違いはないと判断出来る。しかし、 V_s の振幅は P の影響を受けて小さくなった。

さらに、 V_s が P の影響を受けることが明らかとなったため、チョップの動きを高速度カメラ (FASTCAM Mini UX100, (株) フォトロン) で撮影し、その振動状態について調べる検証実験を行った。チョップは図 1 に示した通り、検出電極の誘導電荷に影響を与える重要な部品

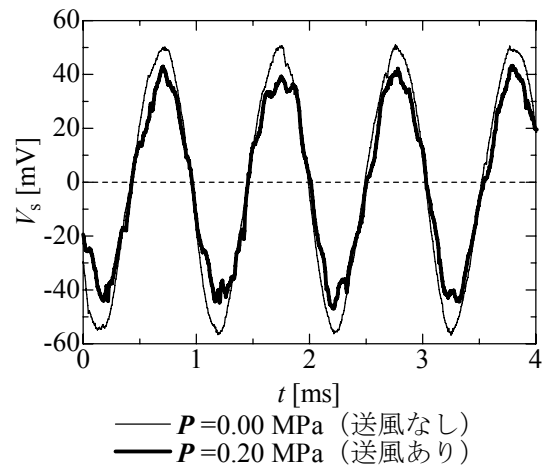


図8 P の強さに対する V_s の波形の変化 ($E_t = -10.0$ kV/cm)

である。図 9 に示すように、チョップの振動と送風の向きは垂直な関係にある。チョップ部分を拡大して、高速度カメラで撮影した動画の静止画を図 10 に示す。左右の縦型長方形がチョップである。チョップの角の上端の 2 点 (追跡点 a, 追跡点 b) の振幅状況について、動画解析ソフトウェア (PFA, (株) フォトロン) を用いて同データを 3 回解析して平均値を調べた。実験結果を図 11 に示す。チョップは矢印方向 1, 2 の動きを交互に繰り返して振動する。実際の静電界センサでは、チョップ部分が金属円筒で覆われて撮影出来ないため、可視化可能なアクリル製の円筒を被せて模擬実験を行った。実験結果より、チョップの振幅 A [mm] は 10^{-1} mm オーダーであった。また、 P が強くなるほど、 A は小さくなった。具体的に、追跡点 a の場合、 $P = 0.00, 0.01, 0.02, 0.03$ MPa と変化させると、 $A = 0.551, 0.469, 0.441, 0.397$ mm と変化した。 $P = 0.03$ MPa の A を $P = 0.00$ MPa の A と比較すると、27.9% 小さくなった。追跡点 b も追跡点 a と同様な傾向が得られた。

以上の実験結果から、 E_m が P の影響によって E_t とずれてしまった理由について述べる。 P による E_m のずれの現象は以下の 2 つが考えられる。

① E_m の検出の低下

P が強くなると、 A が小さくなり、 E_m の絶対値が小さくなる。

② 零点の移動

$E_t = \pm 0.0$ kV/cm でも、チョップを振動させる回路の影響を受けて V_s に正弦波が流れる。 P の影響を受けて A が小さくなるため、元の零点の位置からずれてしまい、零点の移動が生じる。

これらの現象から図 4, 図 5 の E_t に関しての P に対する E_m の変化の影響の受け方が異なっていた理由は、以下のように説明出来る。

- 1) $E_t = -10.0$ kV/cm は E_m の検出の低下による + 移動と、零点による + 移動によって、 E_m が大きく数値変化する。
- 2) $E_t = +10.0$ kV/cm は E_m の検出の低下による - 移動と、零点による + 移動によって、 E_m が小さく数値変化する。

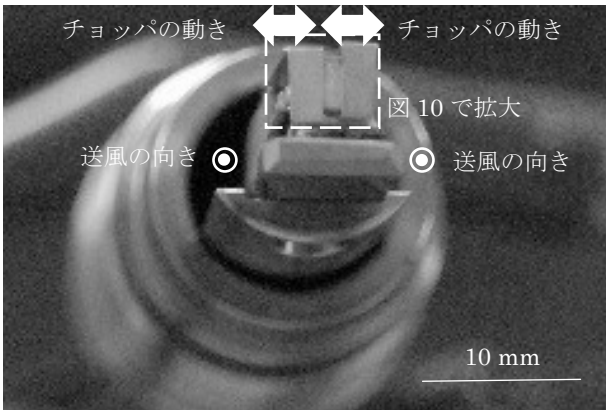


図9 チョップパの動きと送風の向きの関係

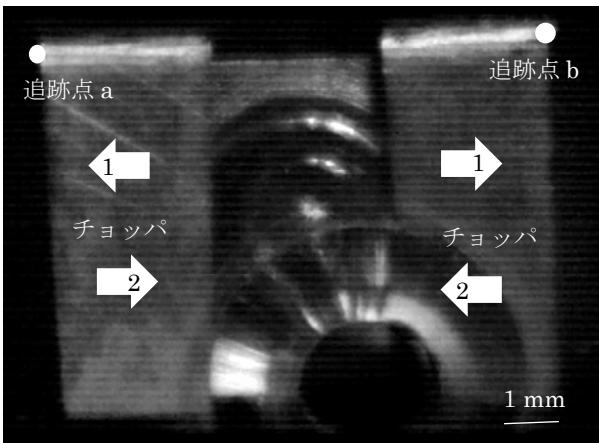


図10 チョップパの振幅を調べるための2点(追跡点 a, 追跡点 b)の位置

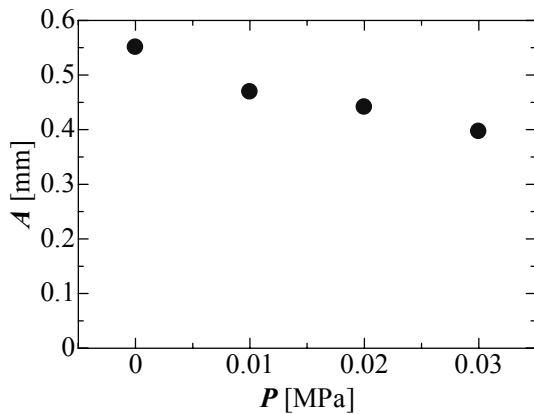


図11 追跡点 a における P に対する A の変化

4 結論

振動型静電界センサ内の送風の電界強度計測への影響について調べた。その結果、以下のことが分かった。

- 1) 送風圧力 P の影響により、静電界表示器の計測値 E_m は、平行平板電極間の電界強度（計算値） E_t と同値とはならない。
- 2) 送風圧力 P の影響により、零点がずれると共に、静電界表示器の計測値 E_m の検出が低下する。
- 3) 静電界表示器の計測値 E_m が乱れる主な原因は、送風圧力 P の影響を受けて、チョップパの振幅 A が小さくなり、その結果、誘導電荷が小さくなることである。
- 4) 本実験で使用した静電界センサは、実際の現場で扱う一定の送風圧力 P で較正することが望ましい。

今後の課題として、静電界センサのチョップパに送風が当たらない構造にする。または、送風の影響を受けづらい構造にする。その他に、静電界センサを実際の現場で静電気安全管理として適用出来るように防爆化を施すことが挙げられる。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、茨城大学名誉教授の竹内学先生にご助言を頂いたこと、誠に感謝しております。また、高速度カメラでチョップパの振動撮影に携わった(株)フォトロンの内野真喜様、田中崇司様、並びに太陽計測(株)の速水英治様に変感謝致します。

文 献

- 1) 田島泰幸, 児玉勉: 流動粒子によって形成される帯電雲の静電界検出. 産業安全研究所研究報告, RHS-PR-93(1994).
- 2) 山田博章, 小林徹也: 振動型表面電位センサ. 静電気学会誌 第10巻第4号(1986).

Experimental study of influence on electrostatic field measurement from air applied to electrostatic field sensor

by

Naoto NOGERA ^{*1}, Teruo SUZUKI ^{*1}, Kwangseok CHOI ^{*2}, and Mizuki YAMAGUMA ^{*2}

Electrostatic charges and/or discharges on powders bring about ignition and explosion of powders. Electrostatic problems that occur on powders must be taken care of in the industry. We have developed an electrostatic field sensor which measures electrostatic hazards. This sensor was supplied with compressed air, in order to protect powder particles from getting into it. This paper is related to how the compressed air affects the performance of the electrostatic field sensor. As a result, the performance of the electrostatic field sensor was affected by the compressed air. Namely, the experimental and theoretical values were not the same. This is because movement of the choppers inside the electrostatic field sensor was disturbed by the compressed air.

Key Words: electrostatic field sensor, electrostatic charges, powders, compressed air.

*1 Kasuga Denki Inc.

*2 Electrical Safety Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health, Japan