

# 振動型静電界センサのパージェアが電界強度計測に及ぼす影響†

崔 光石\*1, 鈴木 輝夫\*2, 山隈 瑞樹\*1

近年、化学、製薬、食品関連工場などの産業現場において、高分子材料、医薬品や食品材料を粉体で取り扱うことが増えている。特に、絶縁性が高い粉体では、静電気が蓄積しやすく様々な静電気の障害・災害が発生している。これらの静電気に関する障害・災害を防止するためには、粉体の静電気帯電状況をリアルタイムで正確に把握し、安全対策を施すことが肝要である。そのため産業現場においては、静電気安全管理の器具としてエアパージ方式の振動型静電界センサが活用されている。本研究では、このエアパージ方式のセンサの粉体の侵入の防止策であるパージェアが静電界センサの計測値に及ぼす影響を定量的に調べた。本実験では帯電物体を模擬した帯電板を用意し、パージェアの圧力、平行平板電極間の電界強度（計算値）、静電界表示値（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、パージェアの圧力の影響により、計測値は、計算値と同値とはならなかった。具体的には、零点がずれると共に、電界強度の計測値が低下した。これらの主な原因は、チョップパの振幅が送風圧力の影響を受けていることであることが分かった。

**キーワード:** 静電界センサ, 静電気, 粉体, 電界強度, パージェア

## 1 序論

粉体の輸送、乾燥、冷却、反応工程などに使用されている空気輸送設備、流動層、集塵機などのように、大量の粉体（浮遊粒子）を取り扱う装置は、静電気障害・災害を引き起こす可能性が高い。そのため、各工程において静電気帯電レベルを正確に測定・評価して安全管理を行うことが不可欠である。粉体の静電気に関する安全管理を行う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、現場の状況などによって粉体を直接サンプリングし、電荷量そのものを測定すること、リアルタイムで長期連続計測を実施することが困難な場合がある。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、静電界センサによる計測が挙げられる。一般に使用されている静電界センサは振動型静電界センサである。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侵入してしまい、計測不能状態に陥ってしまうことがある。その対策として、静電界センサ内をエアでパージして内圧を高くすることで静電界センサ内への粉体の侵入を防いでいる。しかし、パージェアによって、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。本報では、エアパージによる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、検出電極の表面に対して主に垂直方向に形成するものである。

電界検出の原理は、チョップパが左右振動することによって、静電界センサの検出電極に入る電気力線が時間的に変化し、検出電極が受ける電界をチョップパによって時間的に変化させることにより、検出電極に誘導される電荷量  $q$  [C] を変化させている。従って、 $dq/dt = I_s$  は変位電流として、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、平滑回路を経て、電界強度  $E$  [V/m] を表示している。

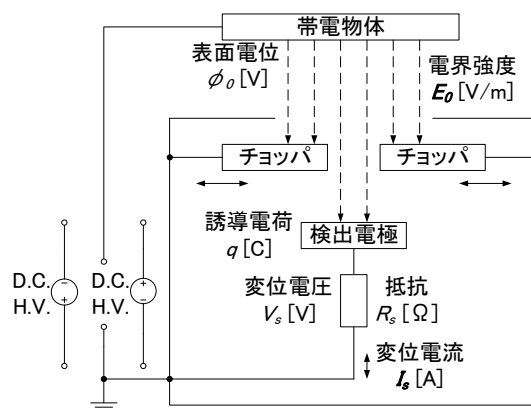


図1 振動型静電界センサの構造図

実験装置の全体の概要を図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（SUS、50 cm × 50 cm）、直流高電圧電源（春日電機（株）、AKTP-25 1PN）、圧力計、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）などで構成されている。平行平板電

† 本報は労働安全衛生研究、Vol.8, No.1, pp.49-53 の記述に追記を行い、まとめ直したものである<sup>1)</sup>

\*1 労働安全衛生総合研究所 電気安全研究グループ

\*2 春日電機株式会社

連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6

労働安全衛生総合研究所 電気安全研究グループ 崔 光石\*1

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

極は帯電板と接地板からなり、この間に平等電界を形成する。静電界センサを平行平板電極の接地板の中央に設置して、平等電界を検出した。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。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（距離：1cm）に高電圧を印加し、電極間電圧  $V$  を  $-10.0 \sim +10.0$  kV の範囲で  $2.0$  kV ずつ変化させた。実験は、静電界センサ内のパーズ圧力  $P$  [MPa]、平行平板電極間の電界強度  $E_t$  [kV/cm]（計算値）、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検討した。

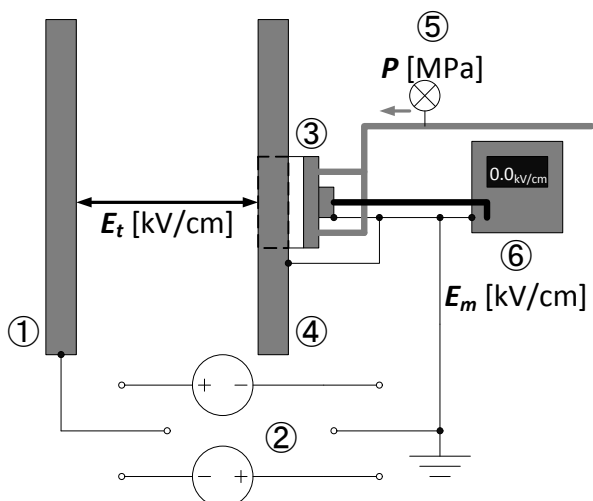


図 2 実験装置の概要図(①帯電板, ②直流高電圧電源, ③静電界センサ, ④接地板, ⑤圧力計, ⑥静電界表示器)



(a) 前面



(b) 背面

図 3 振動型静電界センサ

### 3 実験結果および考察

先ず実験は  $E_t$  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。本実験では、始めに、パーズなしの状態、 $E_t$  と  $E_m$  に関して、零点調整を行った。この較正後、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図 4 ( $E_t$ :+ の領域) と、図 5 ( $E_t$ :- の領域) に示す。

これらの結果から、以下の 3 つのことが分かった。

- ①センサにエアパーズを行うことにより、 $E_m$  と  $E_t$  にずれが発生し、 $P$  が高くなるほど、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平行平板間の電界強度  $E_t$  が正から負に行くほど、 $E_m$  の  $E_t$  とのずれが大きくなった。例えば、 $P = 0.00$  MPa から  $P = 0.20$  MPa に変化するとき、 $E_t = +10.0, \pm 0.0, -10.0$  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。
- ③零点もエアパーズの影響を受けることが分かった。具体的には  $P = 0.00$  MPa から  $P = 0.20$  MPa に変化するとき、 $E_m$  は、 $+4.3$  kV/cm のずれが発生した。

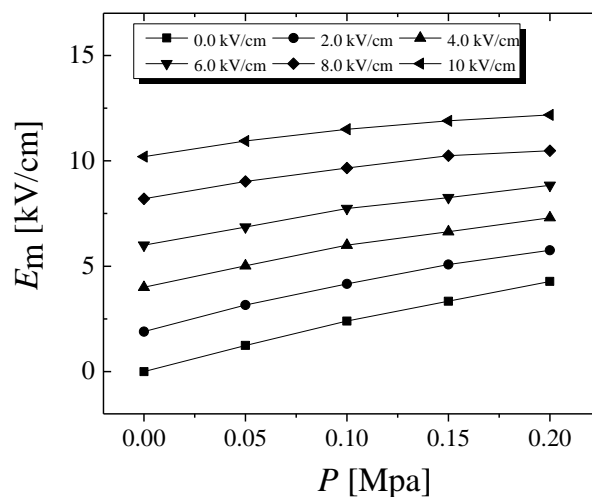


図 4  $P$  に対する  $E_m$  の変化 ( $E_t$ :+ の領域)

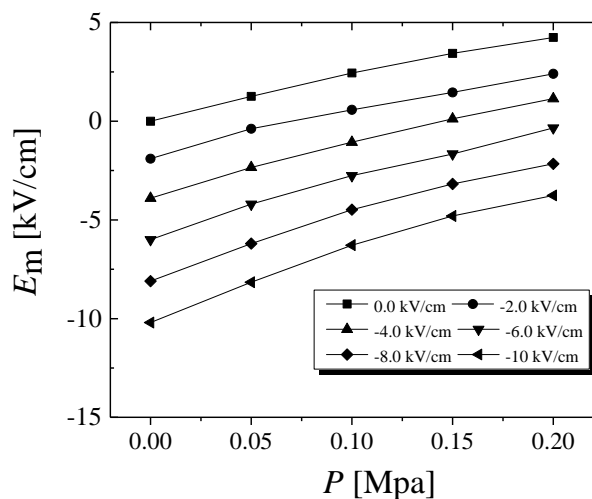


図 5  $P$  に対する  $E_m$  の変化 ( $E_t$ :- の領域)

次に、上記の実験結果より、パーズエアによって零点調整の影響を詳細に調べるために追加実験を行った。実験手順の大まかな流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 $P$ で再度零点調整を行った後、 $E_t$ を変化させて、 $E_m$ を測定した。それらの実験結果を図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エアパーズの状態で零点調整を行っても、 $E_m$ と $E_t$ にはずれが発生した。つまり、エアパーズ状態で増幅度の調整もしなければならないことがわかった。② $E_t$ を強くするほど、 $E_m$ の $E_t$ 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、 $E_m$ とのずれは、 $-0.3$  (感度低下率  $E_m/E_t$ ; 15%),  $-1.1$  (18%),  $-1.6$  (16%) kV/cmと変化し、感度低下率は $E_t$ に依存しなく、2割前後であった。③ $P$ が高くなるほど、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。

追加実験の結果より、 $E_m$ 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を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1kHz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 $P$ 増加の影響を受けて小さくなった。

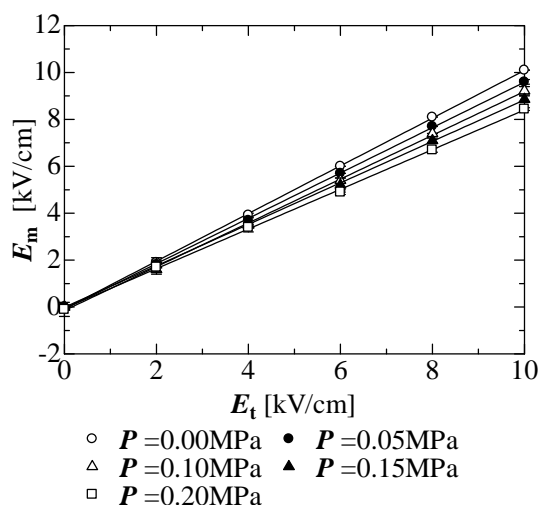


図6  $E_t$ に対する $E_m$ の変化 ( $E_t$ ; +の領域) (指定する $P$ の強さ毎で再度零点調整)

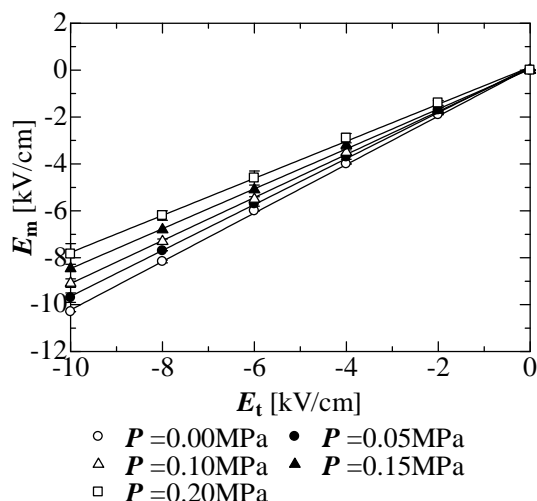


図7  $E_t$ に対する $E_m$ の変化 ( $E_t$ ; -の領域) (指定する $P$ の強さ毎で再度零点調整)

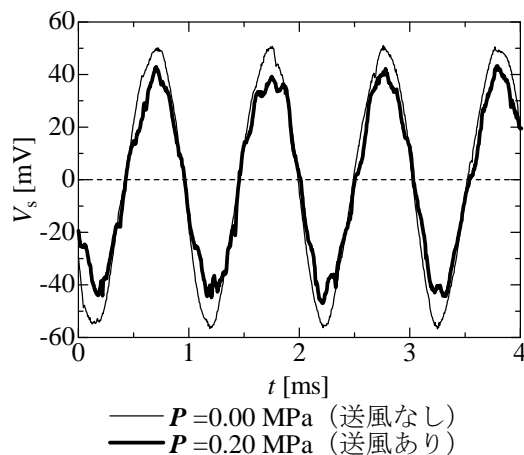


図8  $P$ の強さに対する $V_s$ の波形の変化 ( $E_t = -10.0$  kV/cm)

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量に影響を与える重要な部品である。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面を図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 オーダであることが分かった。また、 $P$ が高くなるほど、 $A$

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考察する。 $P$  による  $E_m$  のずれの現象は以下の 2 つが考えられる。

①  $E_m$  の感度の低下

$P$  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

$E=0.0$  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、以下のように説明が出来る。

- 1)  $E_t = -10$  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)  $E_t = +10$  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。

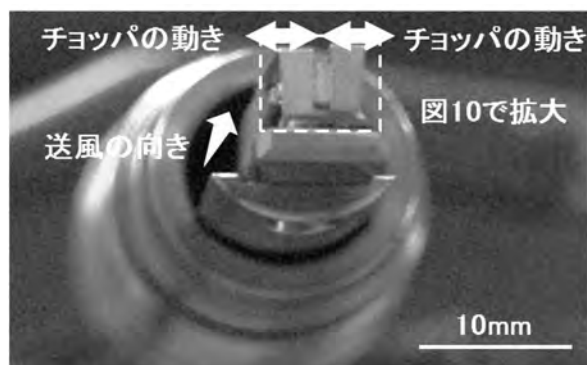


図 9 チョップの動きと送風の向きの関係

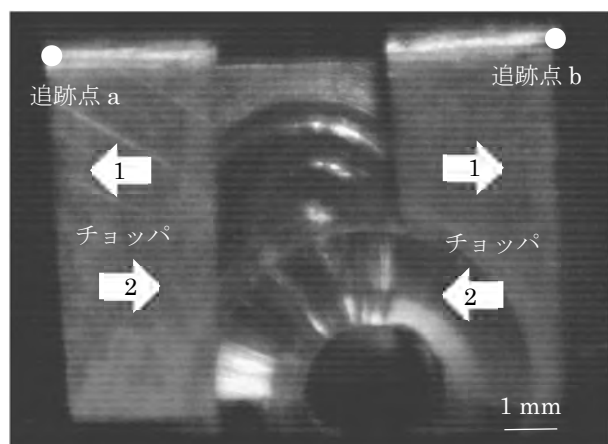


図 10 チョップの振幅を調べるための 2 点 (追跡点 a, 追跡点 b) の位置

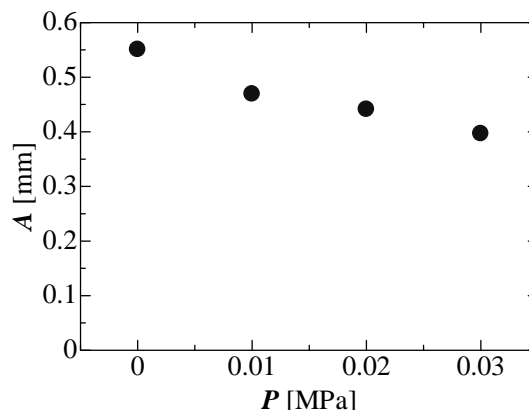


図 11 追跡点 a における  $P$  に対する  $A$  の変化

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、 $E_m$  の感度が低下する。
- 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ことが挙げられる。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も検討する必要がある。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、(元)春日電機の野藤直人様にご協力を頂いたこと、大変感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 労働安全衛生研究、Vo.8, No.1, pp. 49-53
- 2) Goodfellow HD, Graydon WF. Photochromatic system of an acid-sensing porphyrin. Can. J. Chem. Eng. 1998; 46: 120-125.
- 3) 山田太郎. 職場での浮遊粉じんとその人体への影響. 産業衛生学会雑誌. 1994; 18: 15-20.