Research Reports of the Research Institute of Industrial Safety, RIIS-RR-93, 1994
UDC 537.1,621.317.32,621.319.74

流動粒子によって形成される帯電雲の静電界検出

田畠泰幸*, 児玉　勉*

Detection of Electrostatic Field Diverged from Charged Cloud Formed by Fluidized Particles

by Yasuyuki TABATA* and Tsutomu KODAMA*

Abstract; Electrostatic activities of charged particles often encountered in powder processing or liquid atomizing must be measured to assess quantitatively electrostatic hazards in industry. Therefore, technologies for measuring electrostatic activities such as charge, electrostatic potential and electric field strength have been studied and some of them applied to instrumentation systems for static electricity. However, practical technologies for measuring electrostatic charge of particles but one per unit mass have been hardly found, because major difficulties such as an adhesion of particles on an electrostatic sensor have not been solved yet in the measurement of the charge of paritcles.

From the background described above, a study has been made on the measuring technology to develop an electrostatic detector applicable to the charged particles. Simple analyses and experiments were tried to investigate a few problems about the detection of the charge of particles: as a result, they indicated that the detection of electrostatic field strength gave available information for evaluating electrostatic hazards caused by charged particles since the strong electric field was produced by the charged cloud at the wall of a vessel in which the fluidized particles grew up in the charged cloud.

Consequently, a new electrostatic detector has been developed for measuring the electric field strength produced by charged cloud in the vessel such as a silo and fluidized bed. The new detector developed consists of an electric field sensor, electronic system for arranging singnals picked up by sensor and air blow-off hole for avoiding the adhesion of particles and sweeping away them from the sensor. The new detector is also worked out with a design for the real time measurement of electric field strength and manufactured as a trial for performance tests. Tests were carried out on operating characteristics of the detector to examine a sensitivity, linearity and responsibility using a fluidized bed. It has become clear from various tests that the electrostatic detector developed surveys fairly steadily and accurately the electrostatic field strength produced by charged cloud in the vessel where behaviours of the charged particles are irregular. It has been also made sure through experiments that the detector is possible to be used for monitoring whether the charged cloud formed in the vessel exacerbates the electrostatic hazards or not. The specifications, structure of the detector developed and its operating characteristics obtained from tests are presented in this paper.

Keywords; Static electricity, Measurement, Electric field strength, Particle, Powder

*電気研究部 Electrical Safety Research Division

1. はじめに

粉体の輸送，サイロへの充填，流動乾燥，あるいは液体の噴霧，霧化等の工程においては，粉体や液滴に静電気が帯電する。また，帯電した粉体，霧化した液滴（以下，これらを総称して粒子という。）が空間に浮遊すると，粒子群によって帯電雲が形成される。この帯電雲は，雷状放電のようなエネルギーの大きな放電を起こすことがあり，時には，爆発，火災，電磁ノイズ障害等の静電気による災害・障害（以下，災障害という。）の原因となる[1)]。

このように，帯電した粒子群によって形成される帯電雲は静電気災障害を誘発するため，帯電雲の静電気危険については，災障害防止の目的から，過去にも種々の研究が実施されている。例えば，高分子粉体を貯蔵するサイロの中に形成される帯電雲から発生する放電特性が実規模実験によって調べられ，帯電雲の電荷密度，大きさ等の条件によっては，可燃性ガスの着火源になる危険な放電が発生することもあったと報告されている[2)]。しかし，災障害を防止する基本技術の一つは，帯電した粒子群あるいは帯電雲の静電気を定量的に測定し，それに基づいて災障害の発生有無を判断することである。

以上のような着眼のもとに，ここでは帯電雲の静電気を測定する目的で，帯電雲によって生起される静電界（以下，単に電界という。）の検出を試みた。具体的には，帯電粒子群が形成される工程の静電気安全制御技術を確立するために，帯電雲によって生起される電界をリアルタイムで検出する静電界検出器の開発・試作を試み，その性能を実験によって検証した。また，実際の生産工程において実施したモニタ測定によっても，試作した静電界検出器が目的に適した動作をすることが確認された。

以下に，新しく開発した静電界検出器とその動作特性について報告する。

2. 帯電雲の静電界検出

帯電した粒子群が存在する工程の静電気安全を目的として，静電気の測定・検出をするとき，対象になる物理量としては電荷量（電荷密度），電位，電界等が考えられる。

これらの中で，電荷量の測定には，既に，ファラデーケージによる技術が確立されており，これは静電気の本質的な物理量を測定する手法であるため，静電気の測定技術として，種々の面に広く活用されている。しかし，この手法は，浮遊・流動工程で生起される帯電粒子群あるいは帯電雲の静電気を，安全制御の目的で，リアルタイムで測定・検出するには対象物体のサンプリングなどに測定困難な面が多く，不適である。

一方，帯電雲の電位についても，これを測定するいくつかの研究が試みられている[3)]。例えば，リアルタイムで電位を測定・検出する方法として，非接触式の電位プローブが考案されている[4)]。しかし，この方法は，プローブを帯電雲に接近させるため，これによって，前者が後者へ擾乱を与えたり，また，測定機器からの電気火花の発生や，帯電雲とプローブ間で放電が生ずるという新たな危険源を生起するおそれがある[5)]。したがって，安全制御を目的とする測定・検出方法として問題がないとはいえず，実用化を進める上でも一つの障害になっている。

帯電雲の静電界検出は，上記のような問題点に対する考慮，ならびに本研究目的にできるだけ合致するように検討した結果到達した手法であり，静電界検出器の開発にあたっては，以下に示す事項を検討した。

1) 静電気災障害を誘発する要因は，通常，帯電した個々の粒子よりも，粒子群である確率が高いため，粒子群の静電気を検出の対象にする。
2) 帯電した粒子群を対象にして過去の災障害事例を分析すると[6)]，危険源の多くは粒子群によって形成される帯電雲であり，これらは通常サイロ，流動乾燥機のような閉空間に形成されるので，このような状態の帯電雲の静電気を検出する。
3) 帯電雲の静電気を検出するとき，望ましくは電荷量あるいは電荷密度の検出であるが，電荷密度は電界と密接に関与しており，また，電荷によって生起される物理量が電界であるため，電界を検出する。
4) 電界は，静電気災障害を誘発する要因の一つとして注目しなければならない危険な静電気放電の発生条件とも関係しており，本研究目的にも合致する妥当な物理量である。
5) 帯電雲が形成される閉空間の状態を乱すことなく電界を検出し，また，閉空間に生起される電界の最大値を安全に検出することを狙いとして，電界は，閉空間における境界領域である接地されたサイロ，流動乾燥機等の壁面で検出する。

3. 試作した静電界検出器

帯電粒子，粒子群あるいは帯電雲を対象とした場合リアルタイムによる検出は，電界の検出に限らず，過去にはほとんど試みられていない。その主な理由は，検出する対象が不規則な運動をしており，検出対象が特定できないこと，ならびに帯電粒子が検出器のセンサに付着し，信頼性の高い検出値が得られないからである。特にセンサへの帯電粒子の付着は，開発にあたって解消しなければならない必須の課題である。

電界の検出は，原理からすると，電束密度の検出である。しかし，電束密度を検出するトランスデューサは，まだ開発されていない。したがって，現状では，止むを得ず，電束を検出しているのが実状である。そのため，検出感度は主としてセンサの大きさに依存しており，それが小さくなると検出感度は必然的に低下する。

このようなことから，粒子のセンサへの付着を避けるためにセンサを小さくすると，電束が検出できないことにもなるが，ここでの課題は，帯電粒子のセンサへの付着による検出誤差を小さくすることが最優先であるため，形状の小さなセンサ（開口直径 8 mm）を選定した。また，形状が小さくなることによって派生する検出感度の低下を補正するために，信号を高い S–N 比で増幅，変換するように考慮した。

Table 1　Main specifications of electrostatic field detector developed.
開発した静電界検出器の主な仕様

Item	Specifications
Method of detection	Chop of electric field by tuning fork vibrator
Sensor	Transducer: ferro-eletric-piezo (effective diameter, 8 mm)
Air blast	Blow-off hole: 35 mmϕ Air pressure: 2.5 kgf/cm^2
Detector	Sensitivity: 100 V/cm Measurement range: 0.1～20 kV/cm Responsibility: 50 Hz Output signal: ± 200 mV

具体的には，Table 1 の仕様に示すように，トランスデューサには，音叉振動子から構成される誘電圧電素子を選定した。また，Fig. 1 にセンサ部の構造を示すように，帯電粒子の付着を回避する目的で，センサハウジングを設け，センサの前面には，粒子の挙動を乱さない程度のエアパージの機構を，センサの面と垂直に設けた。また，センサの面と平行に，エアカーテンの機構を設けた。

ただし，それらのエアパージおよびエアカーテンの仕様については，後述する静電界検出器の動作特性に関する実験結果を検討して定めた。

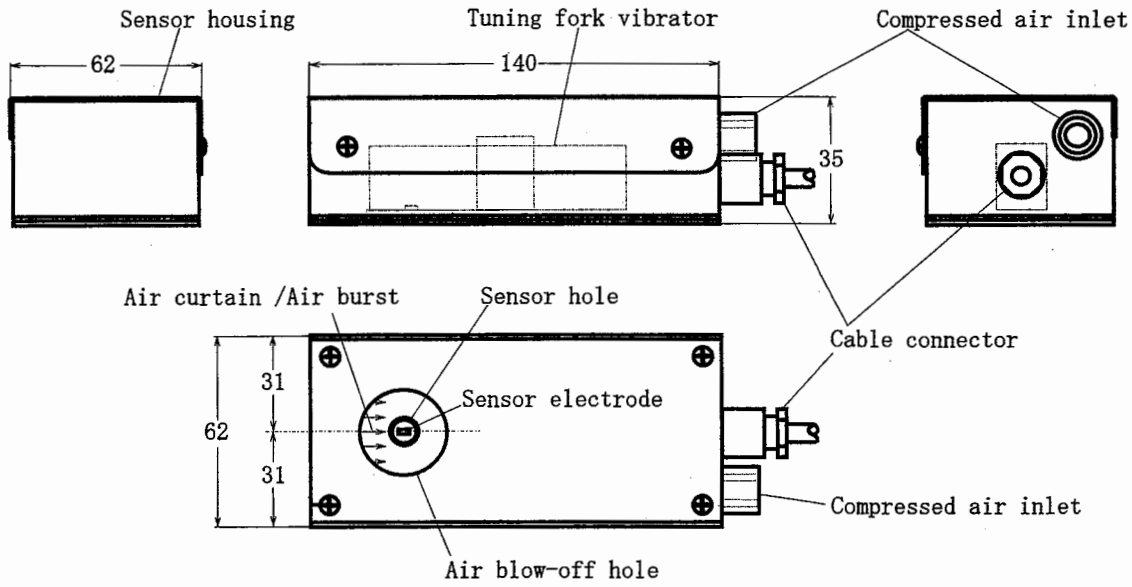

Fig. 1　Structure of electrostatic field sensor and its housing.
静電界センサおよびハウジングの構造

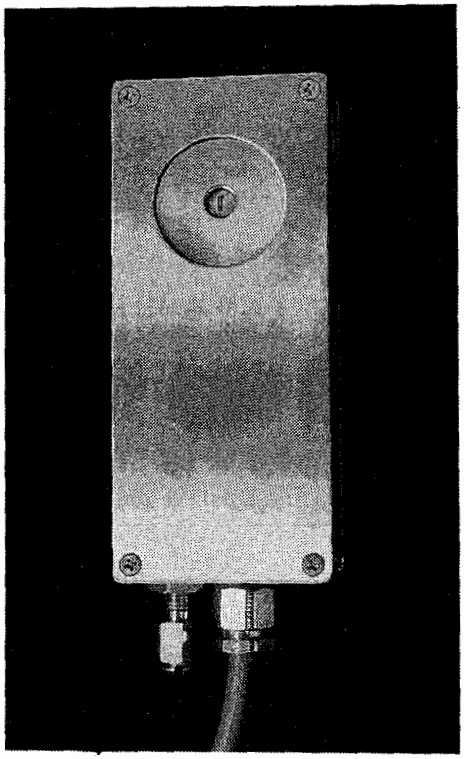

Fig. 2　Photograph of electrostatic field sensor developed.
開発した静電界センサの外観

一方，Table 1 の仕様のうちの応答性についても，粒子の挙動を実験によって調べた結果を参考にして決定した。また，検出感度とレンジは，帯電雲によって生起される危険な静電気放電の発生レベルをもとに，帯電雲が形成される閉空間の中に生起される絶縁破壊電界を考慮して定めた。

なお，Fig. 2 は，試作した静電界検出器のセンサ部の外観である。

開発した静電界検出器の構成は，Fig. 3 に示すとおりで，主としてセンサとその信号を処理する電子回路からなる。ここで，センサと種々の電子回路との間に設けた安全保持器は，静電界検出器が万一異常な動作状態になっても，可燃性粒子の着火源になることを防止するために設けたもので，そこには本質安全防爆の技術が導入されている[7]。また，自動零点調整回路は，長時間のリアルタイム・オンライン測定によるドリフトを補正するとともに，一定の時間間隔で動作状態をチェックするために設けたものである。

なお，この自動零点調整機能は，センサが検出した信号をもとに，閉空間の帯電状態を判断するマイクロコンピュータとの連動によって動作するように設計されている。

4.　静電界検出器の動作特性

4.1　基本検出特性

試作した静電界検出器の基本特性を調べるために，モデル実験装置によって既知の大きさの電界を生起させ，検出感度の線形性（入出力特性），応答性，検出誤差等の動作特性を調べた。

Fig. 4 は，2 枚の金属平板 (500×500 mm) から構成されるモデル実験装置の概要図で，2 枚の金属平板は距離 L を隔てて相い対向し，平行に設置されている。このうち，一方の金属平板には高電圧が印加されており，他方には中央部に直径 D の円形窓が設けられ，こちらは接地されている。

一方，静電界検出器のセンサは，Fig. 4 に示すように，円形窓のある金属平板の背後に，原則としてセンサの中心が円形窓のそれに一致するように設置されている。Fig. 4 に示すように，円形窓のある金属平板の内面とセンサハウジング表面との間の距離を x とする。

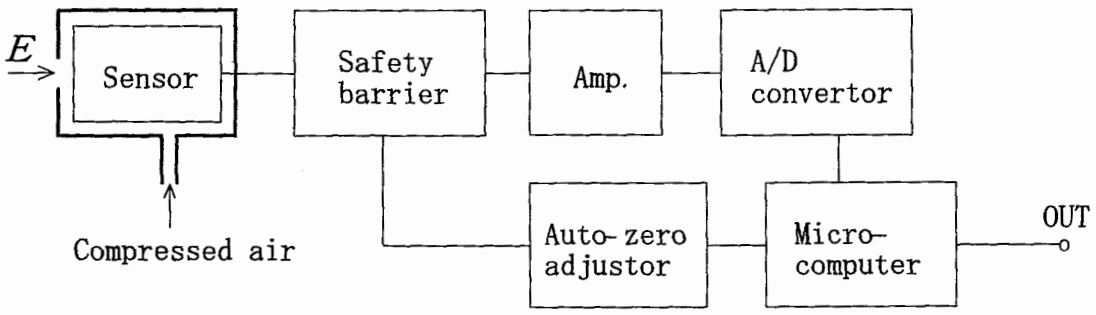

Fig. 3　Block diagram of electrostatic field detector developed.
開発した静電界検出器の構成図

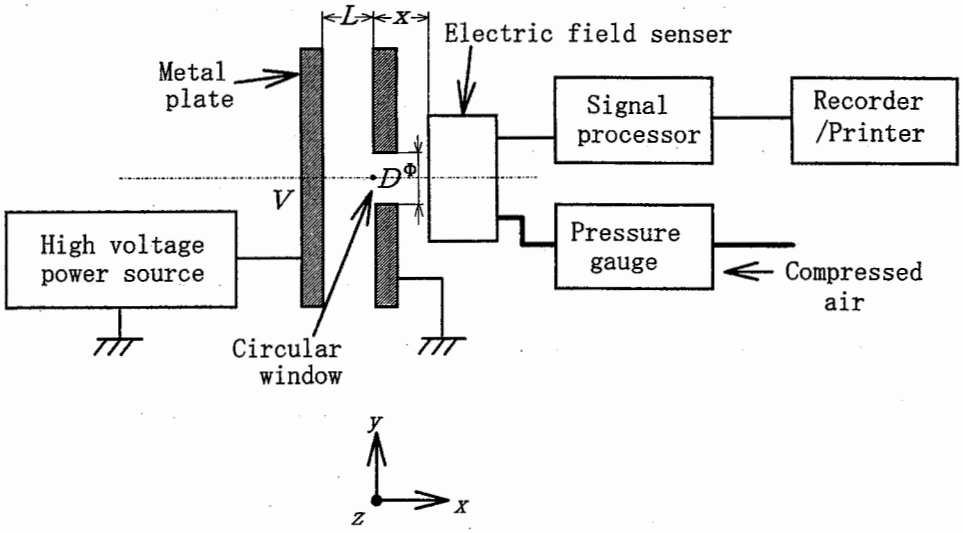

Fig. 4　Apparatus for model experiments on electrostatic field detection.
静電界検出モデル実験装置

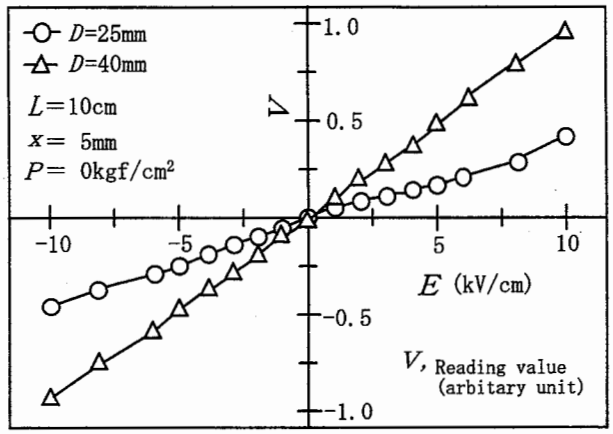

Fig. 5　Example of output characteristic curves obtained by electrostatic field detector.
静電界検出器の出力特性の一例

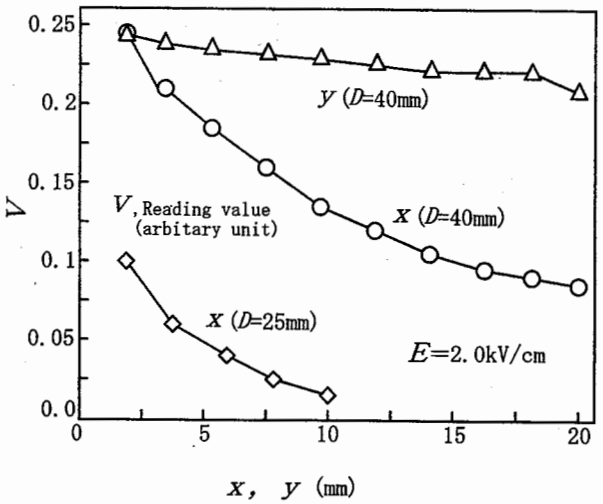

Fig. 6　Influence of setting position of sensor on output characteristics of electrostatic field detector.
センサの設置位置が静電界検出器の出力特性に及ぼす影響

実験では，金属平板に既知の電圧 V の高電圧を印加して，2 枚の金属平板の間に，既知の平等電界 $E = V/L$ を生成させ，その電界を静電界検出器で検出し，信号はペンレコーダ，ディジタルオシロスコープ等で読みとった。

Fig. 5 は実験結果の一例であり，縦軸はセンサの出力電圧の読取値 V を任意単位で示してある。ここで，P はエアパージとエアカーテンのために供給する圧縮空気の圧力で，Fig. 5 に示す $P = 0$ は，それが供給されていないことを意味している。

Fig. 5 によると，試作した静電界検出器の検出特性は，センサの実効開口面が直径 8 mm という小さな円形といえども，センサの位置から 5 mm (x) だけ前方というわずかな距離に位置している接地金属平板の円形窓の大きさ (D) に大きく依存している。これは，接地金属平板の円形窓の大きさが電界分布に少なからず影響を及ぼしているからで，この結果は，センサと金属平板の円形窓との位置のずれも，結

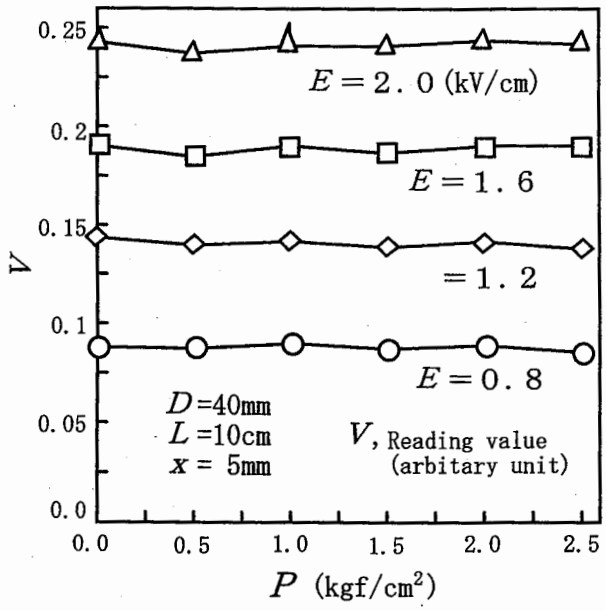

Fig. 7　Influence of air pressure in sensor housing on output characteristics of electrostatic field detector.
センサハウジング内の空気圧力が静電界検出器の出力特性に及ぼす影響

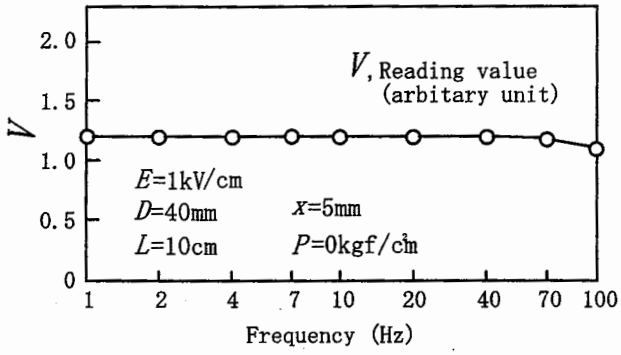

Fig. 8　Responsibility of electrostatic field detector.
静電界検出器の応答性

果的には電界分布に影響を及ぼし，検出特性に波及することを示唆している。

上記のような推測から，検出特性に及ぼすセンサと金属平板の円形窓との位置のずれの影響についても実験によって調べた。Fig. 6 はその実験結果であり，予測されたとおり，円形窓の中心とセンサのそれとの位置関係が検出特性に影響を及ぼすことが判明した。特に，センサが金属平板の背後の方向に数 mm というわずかな距離だけ移動しても（Fig. 4 に示す x 方向への移動），検出特性はその距離に大きく依存することが判明した。換言すれば，静電界検出器のセンサをサイロ，流動乾燥機等の壁面に設置するとき，壁面の厚さが大きいと，検出出力が大きく低下すること，また，それに伴って S-N 比が減少し，検出誤差の要因の一つになることが示唆された。しかし，センサと円形窓の中心の多少のずれ（Fig. 4 に示す y あるいは z 方向のずれ）に対しては，円形窓の直径が 40 mm の場合，検出特性が大きな影響を受けないことが確認された。

試作した静電界検出器の特徴は，粒子がセンサに付着することを防止するために設けたエアパージならびにエアカーテンの機構である。これらの機能が安定したものとなるように，センサは圧縮空気のタンクとなる内容積約 200 cm^3 のハウジングの中に設置され，センサの前面に常に空気流が形成されるように設計されている（Fig. 1 参照）。しかし，圧縮空気の供給，貯蔵，流出に伴うセンサの機械的振動が音叉振動子の動作に影響を及ぼし，さらには，検出特性にも影響を及ぼすおそれがあるため，動作特性に及ぼす圧縮空気の影響についても実験によって調べた。

実験は，ハウジングに供給する圧縮空気の圧力に対する検出感度について，検出電界をパラメータにして調べた。Fig. 7 はその実験結果であり，空気圧力の検出特性への影響は，圧力が 2.5 kg/cm^2 以下であればほとんどなく検出誤差の範囲内であることが確認された。すなわち，圧縮空気の影響は無視できる程度であって，設計にはほとんど考慮しなくてもよいことが判明した。

一方，検出の対象は，帯電雲というバルクに近い状態の帯電粒子群によって生起される電界であるが，それを生起する根源の帯電粒子は，一般に不規則な運動をしている。換言すれば，検出しなければならない電界は，必ずしも時間的に緩慢な変化でなく，粒子群の時間的変動に伴った変化をしていると想定される。したがって，試作した静電界検出器の応答性も無視できない基本特性であり，これについても実験によって調べた。

実験は，Fig. 4 に示す金属平板に方形波パルスの高電圧を印加して変動電界を生起させ，それに対する検出特性を測定した。Fig. 8 は，実験結果の一例であり，実験装置の制約から詳細なデータは得られなかったが，この実験結果から，数十 Hz までの応答

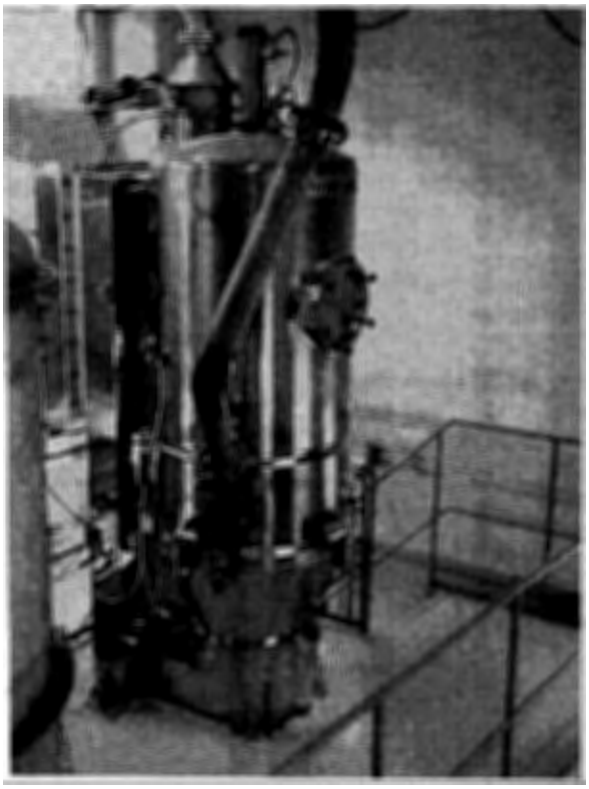

Fig. 9　Fluidized bed used in experiments.
実験に用いた流動槽

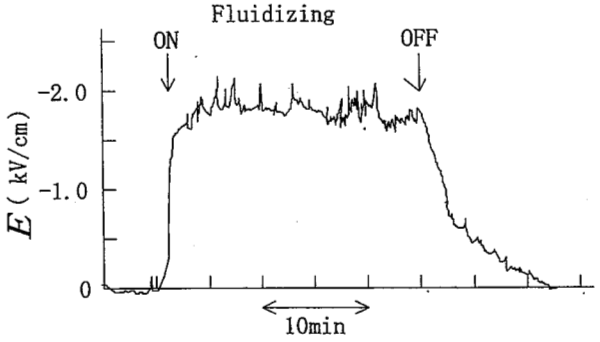

Fig. 10　Example of detection of electrostatic field diverged from charged cloud in fluidized bed.
流動内の帯電雲によって生起された静電界の検出例

性があることが確認された。

さらに，大きな電界に対する応答性について検証するため，金属平板にステップ状の 100 kV の高電圧を印加したときの応答性をディジタルオシロスコープで測定した。その結果，立ち上がり時間 10 ms までのステップ電圧には，十分応答していることが検証され，これは先に得られた実験結果を裏付けるものであった。

4.2　帯電雲の検出特性

モデル実験装置を用いて実施した基礎実験の結果によると，試作した静電界検出器は本研究で目的とする動作特性をほぼ満たしていた。そこで次に，帯電粒子群によって形成される実際の帯電雲にこれを適用した場合の問題点と動作特性についてさらに検討する目的で，帯電雲によって生起される電界の検出特性を調べた。

実験は，主として Fig. 9 に示す流動槽を用いて実施した。この流動槽は実規模大の粉体帯電実験設備に付設されているもので，胴部が円筒状（円筒部の内径 0.9m, 内容積約 0.21m^3）で，上部の空間には，導電性繊維を混入した布製の帯電防止バグフィルタが設置されている。試作した静電界検出器は，流動槽の側壁の上部，中部および下部の 3 箇所に設けた直径 40 mm の開口部に設置し，センサへの実験試料の付着を防止するため，ハウジングへは 2.5 kg/cm^2 の圧縮空気を常時供給した。

実験に用いた試料は平均粒径約 72 μm の塩化ビニル粉体約 40 kg で，これを流動槽の最下層から，原則として温度 30°C，相対湿度 40%，連続供給風量 15 m^3/min の空気によって流動させ，帯電雲を形成させた。

なお，試料の流動状態については，流動槽の側壁にある観測窓（約 6.5 cm × 27 cm）から，モニタ TV あるいは目視によって観測した。

Fig. 10 は，実験結果の一例で，帯電防止バグフィルタ底部の下方約 50 cm の位置に形成される帯電雲によって生起される電界を，流動槽の中部に設置した静電界検出器によって検出した結果である。この検出結果と試料の流動状態を観測した結果とを合わせてみると，試料は流動用空気の供給とともに流動し，供給を停止すると同時に下層に落下しており，帯電雲は試料の挙動に同期して形成されているようである。また，検出された電界は，Fig. 10 にみられるように，先頭値がパルス的に変動することから，帯電粒子群により生起される電界は，帯電雲を形成する試料粉体の挙動（分布の変化など）に依存して短い周期で振動的に変化することがほぼ確認された。

次に，エアパージおよびエアカーテンによる粒子のセンサへの付着防止効果を調べるため，流動槽を最大 5 時間にわたり連続運転して測定した結果，試料が落下する流動槽の下部に設置したセンサのみに

は，目視によると，粒径数 μm の粉体が数個付着していた。

このエアパージおよびエアカーテンの効果については，低密度ポリエチレン粉体を乾燥する生産現場においても，大型流動乾燥機を 4 日間連続して稼働させ，試作した静電界検出器によるモニタ測定を実施し，付着防止効果と付着による検出特性への影響を調べたところ，同様に数個の粉体の付着は観測されたが，粉体の付着や剥離による検出特性への影響は自動零点調整回路の動作によって補正され，1 分以上の時間平均でみると，無視できる程度であることが確認された。

一方，エアパージとエアカーテンによる粒子の挙動への影響については，目視による判断では，圧縮空気の圧力が 2.5 kg/cm^{2}になると粒子の挙動に変化が観察されたが，この圧力での電界検出結果は，圧縮空気の供給を一時的に停止した場合のそれと大差なく，結論的にはエアパージとエアカーテンの検出特性への影響は無視できる程度であることが判明した。

以下，流動槽内の帯電雲が生起する電界について，塩化ビニル粉体および低密度ポリエチレン粉体を試料として，試作した静電界検出器を用いて調べた結果の概略について述べる。

帯電極性は，塩化ビニル粉体の場合が負極性，低密度ポリエチレン粉体の場合が正極性で，電界の大きさは前者がやや大きい傾向であった。これは，それぞれの粉体をスパウトを通して落下させ，そのときの電荷密度をファラデーケージで測定した結果と一対一に対応している (Table 2 参照)。

次に，試料を流動させる空気の風量を変化させ，その影響を調べたところ，半定量的ではあるが，静電界検出器によって検出された電界は，帯電雲が生起する電界として風量に応じた妥当な結果であった (Table 3 参照)。ここで，流動させる空気の風量が 9 m^3/min 以下になると，検出電界が風量とは独立にほぼ一定になることから，この風量では流動による粉体の帯電は小さいことが示唆される。

また，帯電防止バグフィルタの設置位置における電界を，その位置の側壁に設置した静電界検出器によって検出したところ，帯電防止バグフィルタの静電遮蔽効果によって，数百 V/cm 以下の電界しか検出されなかった。

このように，試作した静電界検出器の動作特性は，粒子群によって形成される帯電雲の静電気現象に対応させてみたとき，定性的，半定量的には妥当な結果であり，帯電雲が生起する電界を的確に検出していると判断される。

Table 2　Example of results obtained from experiments using fluidized bed or spout.
流動槽およびスパウトによる実験結果の一例

Sample	Electric field[1] (kV/cm)	Charge density[2] (μC/kg)
Polyvinyl chloride	−2.0～−2.5	−3.0～−5.0
Low density polyethylene	1.0～2.0	0.9～2.1

Note 1) Obtained from experiments using a fluidized bed.
2) Obtained from experimetns using a spout.

Table 3　Relation between electrostatic field diverged from charged cloud and air flow rate for blowing away particles.
流動風量と帯電雲が生起する電界の関係

Sample	Air flow rate (m^3/min)	Electric Field (kV/cm)
Polyvinyl chloride	5.0	−0.9～−1.5
	9.0	−0.9～−1.5
	12.5	−1.2～−2.5
	15.0	−2.0～−3.5
Low density polyethylene	5.0	0.9～1.2
	9.0	0.9～1.2
	12.5	1.0～2.2
	15.0	1.7～2.9

ちなみに，低密度ポリエチレン粉体を流動槽で流動させ，試作した静電界検出器によってその帯電現象を観測したところ，帯電極性が粒径や流動させる空気の湿度にも依存して変化する傾向が示された。たとえば粉体の粒径については，それが数十μm 以下であると正極性に，数百μm のように大きいと負極性に帯電した。湿度については，これが高いときは正極性に，低いときは負極性に帯電する傾向を示した。これらの理由は不明であるが，同様な結果は他の研究者によっても報告されている[8]。

4.3　動作特性と仕様の考察

前節までに述べたように，試作した静電界検出器に関して大別して二つの実験を行った。その一つは，

モデル実験装置によって既知の電界を生起させ，試作した静電界検出器の動作特性を調べる定量的な実験である。

その実験結果によると，センサをサイロや流動乾燥機の側壁に設置するときの最大の留意点は，側壁に設ける開口部であることが判明した。換言すれば，静電界検出器の動作特性は，電界の検出が目的ではあるものの，電束とその分布に大きく依存していることが明らかになった。したがって，センサの近傍に存在する帯電粒子が生起する電界の検出には，少なからず誤差を伴うことは避けられないであろう。しかし，接地された側壁に生起される電界は，主として閉空間に存在する帯電雲によるものであるため，定量的には調べていないが，電界の読取値は既知の電界によって較正していることからして，検出誤差は大きくないと判断される。また，設計にあたっては，検出感度，電界分布の乱れ，危険な静電気放電の発生要因である電界の大きさ，応答性等を考慮し，開口部の大きさに関する仕様は，直径 40 mm が妥当であると判断した。

前節で実施した他の一つの実験は，粉体によって実際に帯電雲を形成し，それによって生起される電界の検出特性を調べるものであった。これは，設計にあたって考慮したセンサへの粒子の付着防止効果を始め自動零点調整回路等の機能を検証するとともに，問題点等を考察することが目的であった。

この実験でも，前節で考察したように，試作した静電界検出器の動作特性は，大きな問題点のないことが確認された。換言すれば，この実験結果とモデル実験によって得られた定量的な実験結果とを合わせて考察すると，帯電雲が生起する定性的な静電界現象の検出はもちろんのこと，定量的な検出特性にも大きな問題がなく，試作した静電界検出器動作特性は，本研究目的を満たすものであることが検証された。したがって結果的に，最適の設計であるかどうかは未検討であるが，センサへの粒子の付着を防止するためにセンサのハウジングに供給する圧縮空気の圧力仕様は 2.5 kg/cm^2, また，応答性の仕様は 50 Hz と決定した。

5. むすび

粉体や液滴を取り扱う多くの工程では，帯電雲の形成を避けることができない。このような背景から，これらの工程の静電気安全制御技術の一つとして，帯電雲が生起する電界をリアルタイムで検出する静電界検出器の開発を試み，その動作特性について調べたところ，以下に示す結果が得られた。

1) 試作した静電界検出器は，帯電した粉体や液滴によって形成される帯電雲が生起する電界を，帯電雲が形成される境界領域において検出するもので，検出によって帯電雲の挙動を乱すことがないために，これを設置しても，工程の危険性が大きくなる可能性は極めて少ない。
2) 静電界検出器は，帯電雲が形成される境界領域に設置するものであるが，これを設置するために設ける開口部と設置条件によって動作特性が変化する。したがって，設置にあたっては，これに留意するとともに，指示値の較正が必要である。
3) 粒子群によって形成される帯電雲が生起する電界を検出するとき，センサに粒子が付着することは避けられない。したがって，それを抑制するために，センサにエアパージおよびエアカーテンの機構を設けたが，これらは検出器の動作特性にほとんど影響を及ぼさない。
4) 帯電雲が生起する変動電界を検出する目的で試作した，応答特性が 50 Hz の静電界検出器を用いると，パルス的に変動する電界が検出でき，帯電雲の静電気現象をほぼ定量的に検出することが可能である。
5) 静電界検出器の最大検出レンジは，20 kV/cm であるため，これは，危険な静電気放電の発生を未然に防止するための電界検出，ならびに帯電雲が形成される工程での安全制御に応用できる。

なお，ここで開発した静電界検出器は，まだ一次試作で，実用化にあたっては，検出誤差の詳細な検討，無着火性の定量的確認等の課題が残されている。しかし，本検出器は，ガス・蒸気・粉体の濃度検出器と併用することにより，さらに有効な安全制御・測定管理システムに進展できると考えられる。

最後に，本研究の実施にあたり試作にご協力頂いた春日電機（株）の八木新治部長，実験にご協力頂いたパウレック（株）の坂本浩主席研究員，ならびに研究生の鈴木輝男氏（現，産業安全技術協会）に謝意を表す。

（平成 6 年 5 月 12 日受理）

参考文献

1) 例えば，T.B. Jones: Powder Handling and Electrostatics, (1991), 47, Lewis Publishers.
2) M. Glor: Electrostatic Hazards in Powder Handling, (1988), 59, Research Studied Press.
3) 静電気学会編：静電気ハンドブック，(1981), 347, オーム社.
4) T.B. Jones: Powder Handling and Electrostatics, (1991), 30, Lewis Publishers.
5) 労働省産業安全研究所：静電気安全指針，RIIS-TR-87-1 (1988).
6) 田畠泰幸・児玉勉：産業安全研究所技術資料，RIIS-TN-74-2 (1974).
7) 労働省産業安全研究所：工場電気設備防爆指針，RIIS-TR-79-1 (1979).
8) J.A. Cross: Electrostatics: Priciples, Problems and Applications, (1987), 343, Adam Hilger.