

Specific Research Reports of the National Institute  
of Industrial Safety, NIIS-SRR-NO.17 (1999)  
UDC 537.2

## 8. 粒子シミュレーションによる帯電粉体のタンク搬入時の 静電気危険性評価－粒径依存性\*

大澤 敦\*\*

## 8. Evaluation of Electrostatic Hazards Caused by Charged Powders during Tank Filling Using Particle Simulation －Dependence of particle size\*－

by Atsushi OHSAWA\*\*

**Abstract** : It is well known that charge can accumulate on the powder particles during the handling and processing of insulating powders. When these charged powders enter and accumulate in a vessel, a large amount of charge can be stored and can lead to electrostatic hazards. To prevent such hazards, it is important to understand the mechanism of the formation of the hazards. Moreover although a large number of new functional powders have been developed by the recent evolution of technology, it is difficult to evaluate experimentally the hazards in an individual system. In this paper, we present a self-consistent simulation of charged powder entering a vessel for modeling electrostatic phenomena and evaluating electrostatic hazards.

The particle-in-cell technique has been used in the simulation. The motion of charged particles and the electric field inside the vessel have been solved self-consistently. The particle size distribution of the powder has also been taken into account. Four powders, each having a log-normal distribution and different mean particle sizes, have been used to investigate the dependence of particle size on hazards. The probability of incendiary discharges is considered based on calculated local electric fields and electrostatic energies.

It was found that the motion of particles and the hazards strongly depend on particle size. Lighter particles in the powders were trapped in the upper region by air drag, a self-generated and heap electric fields. Since there was no large charged cloud of dispersed powder in air space, no lightning-like discharge was likely to occur under the simulated conditions. The possibility of incendiary discharges on the top of the heap was demonstrated. The results indicate that the larger size powders, the more dangerous under the simulated conditions.

**Keywords** ; Particle-in-cell simulation, Self-consistent simulation of charged powders, Electrostatic hazards, Particle size, Particle size distribution

### 1. はじめに

絶縁性の粉体は混合や輸送などの製造・取扱工程において帯電することが良く知られている。これらの帯

電粉体がタンク等の容器に輸送される時、容器内に多くの電荷が蓄積されることになる。この蓄積された電荷により静電気障害・災害（以下障災害と略す）を招くことがある。たとえば、蓄積された電荷によって

\*1998年6月25日ESA-IEJ Symposium on Electrostatics 1998において成果の一部を発表。

\*\*物理工学安全研究部 Physical Engineering Safety Research Division

生じられる静電気障災害には静電気放電による爆発などがある。これらの静電気障災害を防止するためには静電的に危険な状態が帯電粉体によっていかにして形成されるかというメカニズムを知ることが重要である。粉体の帯電電荷は個々の粒子に蓄積されているので、静電気危険の形成メカニズムを知るためには粒子の挙動が解明されることが重要である。

一方、今日、粉体は広範囲の産業分野で盛んに利用されており、食品、薬品、プリンタのトナー、金属材料、磁性材料、ファインセラミックスなど機能化・多様化した製品が開発されている。特に、新種の粉体の場合、予期もしない静電気障災害が起こる可能性がある。粉体の静電気危険性の事前評価が重要となる。しかしながら、これらの粉体の静電気危険性を個々の設備について実験的に評価することが困難であるため、その危険性を粉体の物性などから経験的に評価しているのが現状である。

そこで、本研究では、粉体の製造・取扱工程における静電気危険性の評価および予測をするために開発したシミュレーション<sup>1-5)</sup>を用い、静電気危険の粒径の依存性について評価した。特に帯電粉体の輸送およびタンクやサイロへの投入時に障災害が多発していることから、本研究でもこれまでと同様に帯電粉体が接地された金属製容器に投入されるときに静電気現象のシミュレーションを行った。粒径依存性を調べるために平均粒径が異なり、粒径分布が対数正規分布である4種類の粉体を用いて、粒子の挙動、タンク内の電位、電界分布および蓄積される静電エネルギーを観測し、静電気危険性を評価した。

## 2. モデリングとシミュレーション

シミュレーションには粒子の運動と作用場（この場合は電場）においてself-consistent（自己無撞着）シミュレーションが可能な粒子法（particle-in-cell<sup>6,7)</sup>を採用している。この粒子法は、全粒子について運動を追跡すると計算時間とメモリの容量が膨大となり不可能であるので、個々の粒子の運動をいくつかの粒子を代表する超粒子（super particle）を用いて計算する技法を用いている。また、この方法は個々の粒子の運動を取り扱うので、粉体のように粒径分布を持った粒子のシミュレーションにも適している。

シミュレーションに用いたタンクは高さ1.0 m、半径0.5 mの金属製円筒タンクである。このタンクは接地されている。帯電電荷量の依存性を調べるために、用いた粉体は物性や帯電電荷量が同一であり、平均粒径が異なる粉体A、B、C及びDである。一般に粉体は対数正規分布をしていることが知られているので、

Table 1 The assumptions used in the simulation.  
シミュレーションで用いられた仮定

|                            |   |
|----------------------------|---|
| vessel                     |   |
| radius                     | 0.5 m                                     |
| height                     | 1.0 m                                     |
| inlet pipe diameter        | 10 cm                                     |
| powder or particle         |   |
| charge                     | 1.0 $\mu\text{C}/\text{kg}$               |
| specific gravity           | 1.0                                       |
| relative permittivity      | 2.0                                       |
| inital velocity            | 0.5 m/s                                   |
| mass flow rate             | 1.0 kg/s                                  |
| angle of repose            | 35 degrees                                |
| deposited powder           | c.c.p.*                                   |
| particle size distribution | log-normal                                |
| Powder A                   |   |
| D 50%**                    | 50 $\mu\text{m}$                          |
| D 15.9%**                  | 100 $\mu\text{m}$                         |
| surface charge density     | $2.77 \times 10^{-8} \text{C}/\text{m}^2$ |
| Powder B                   |   |
| D 50%                      | 100 $\mu\text{m}$                         |
| D 15.9%                    | 200 $\mu\text{m}$                         |
| surface charge density     | $5.54 \times 10^{-8} \text{C}/\text{m}^2$ |
| Powder C                   |   |
| D 50%                      | 500 $\mu\text{m}$                         |
| D 15.9%                    | 1000 $\mu\text{m}$                        |
| surface charge density     | $2.77 \times 10^{-7} \text{C}/\text{m}^2$ |
| Powder D                   |   |
| D 50%                      | 1000 $\mu\text{m}$                        |
| D 15.9%                    | 2000 $\mu\text{m}$                        |
| surface charge density     | $5.54 \times 10^{-7} \text{C}/\text{m}^2$ |

\* c.c.p. : cubic close-packing structure.

\*\* D 50%, D 15.9% : the 50% diameter, the 15.9% diameter of the oversize distribution of the powder, respectively.

粉体粒子は粒径分布が対数正規分布をもった球とし、乱数で粒径を決定した。粒径は粉体AがD 50%=50  $\mu\text{m}$ 、D 15.9%=100  $\mu\text{m}$ 、粉体BがD 50%=100  $\mu\text{m}$ 、D 15.9%=200  $\mu\text{m}$ 、粉体CがD 50%=500  $\mu\text{m}$ 、D 15.9%=1000  $\mu\text{m}$ 及び粉体DがD 50%=1000  $\mu\text{m}$ 、D 15.9%=2000  $\mu\text{m}$ である。ここで、D 50%、D 15.9%とはそれぞれふるい上分布の50%及び15.9%粒径を意味する。これらの粉体は材料物質の比重が1.0、比誘電率が2.0とし、粉体の電荷量は1.0  $\mu\text{C}/\text{kg}$ とした。個々の粒子の電荷は粒子の表面に分布することから、同一試料粉体の表面電荷密度を一定とした。すなわち、表面電荷密度は粉体Aでは $2.77 \times 10^{-8} \text{C}/\text{m}^2$ 、粉体Bでは $5.54 \times 10^{-8} \text{C}/\text{m}^2$ 、粉体Cでは $2.77 \times 10^{-7} \text{C}/\text{m}^2$ および粉体Dでは $5.54 \times 10^{-7} \text{C}/\text{m}^2$ となる。また、電荷の緩和や放電な

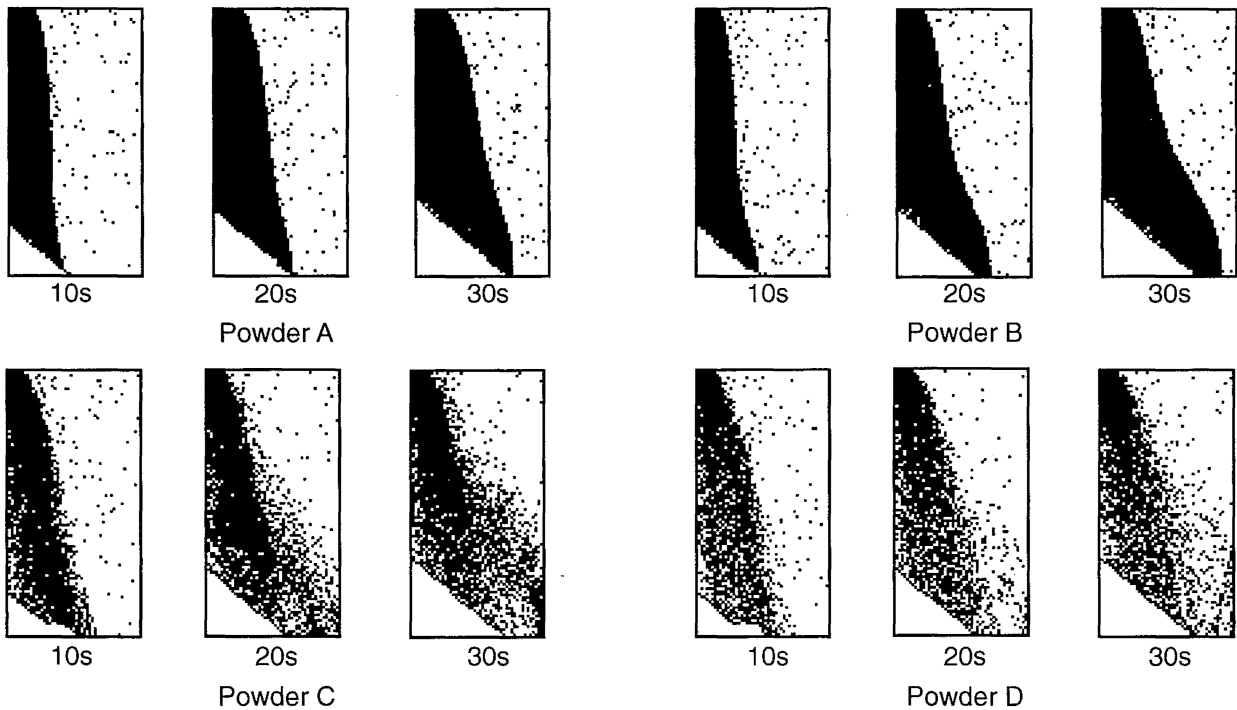


Fig. 1 Temporal evolution of particle positions in air space for Powders A-D.

粉体 A-D の粒子分布の時間変化

どを無視し、粒子の電荷量は時間的に変化しないとした。粒子は初速度 0.5 m/s (偏向角, 方位角を乱数で決め,  $r$ ,  $\theta$  及び  $z$  方向の初速度を求めた) でタンク上部の中心に開けた直径 10 cm の穴から微小時間  $\Delta t$  (1 ms) ごとに投入され, 投入量は 1.0 kg/s とした。超粒子の数は  $10^4/\text{kg}$  である。堆積する粉体の安息角は最大で 35.0 度とし, これを越えないようにヒープが形成されるようにした<sup>7)</sup>。粉体粒子に作用する力は電界, 重力及び空気との粘性によるとし, タンク内の空気の流れはないとした。また, 近接粒子とのクーロン力を考慮した場合はしない場合と比較して違いがみられないことと計算時間の大幅な短縮になるので, これを無視し, 粒子同士の衝突も無視した。また, 粒子はタンクの天井および側壁に対して弾性衝突をすることをした。Table 1 にシミュレーションの条件と仮定をまとめて示す。

微小時間  $\Delta t$  ごとのシミュレーションの概略は以下のようになる。

- (i) サンプル粉体をタンク内に投入する。
- (ii) 電荷密度分布を求めるために, 粒子の位置に従ってグリッド上にすべての粒子の電荷を配分する。各超粒子の電荷のグリッドへの配分には, 軸対称性を考慮して, 粒子の位置に依存するリング状の粒子雲を仮定した重みをかける CIC scheme<sup>6,7)</sup>を用いた。

- (iii) ポアソン方程式を適切な境界条件の下に解き, グリッド上の電界を求める。
- (iv) 上で求めたグリッド上の電界から CIC scheme を用いて個々の粒子上の電界を求める。
- (v) 各粒子の運動方程式を解き,  $\Delta t$  秒後の各粒子の新しい位置と速度を求める。

ただし, 粒子の位置がタンクの底あるいはヒープ上よりも下になったとき, その粒子はヒープとして堆積するとしている。この (i) から (v) の処理を時々刻々繰り返すことにより, self-consistent シミュレーションを達成している。なお, ここで用いているシミュレーション技術の詳細は文献 1 を参照されたい。

### 3. 結果及び検討

#### 3.1 粒子の空間分布

Fig. 1 に粉体 A-D の粒子の空間分布の時間変化を示す。各図の上, 下, 左及び右の軸はタンクの天井, 底, 中心軸および側壁に相当する。点は粒子の位置, 実線はヒープのプロファイルを示す。粒子の空間分布は粉体の粒径に大きく依存し, 粒径が大きい粉体ほど粒子コラムの広がりが増大する。ここで, 電界の影響は粒径が小さい粒子ほど大きい, たとえば, 後述するように時間 10 秒後の径方向電界は粒径が大きくなるほど低くなっている。したがって, この径方向への

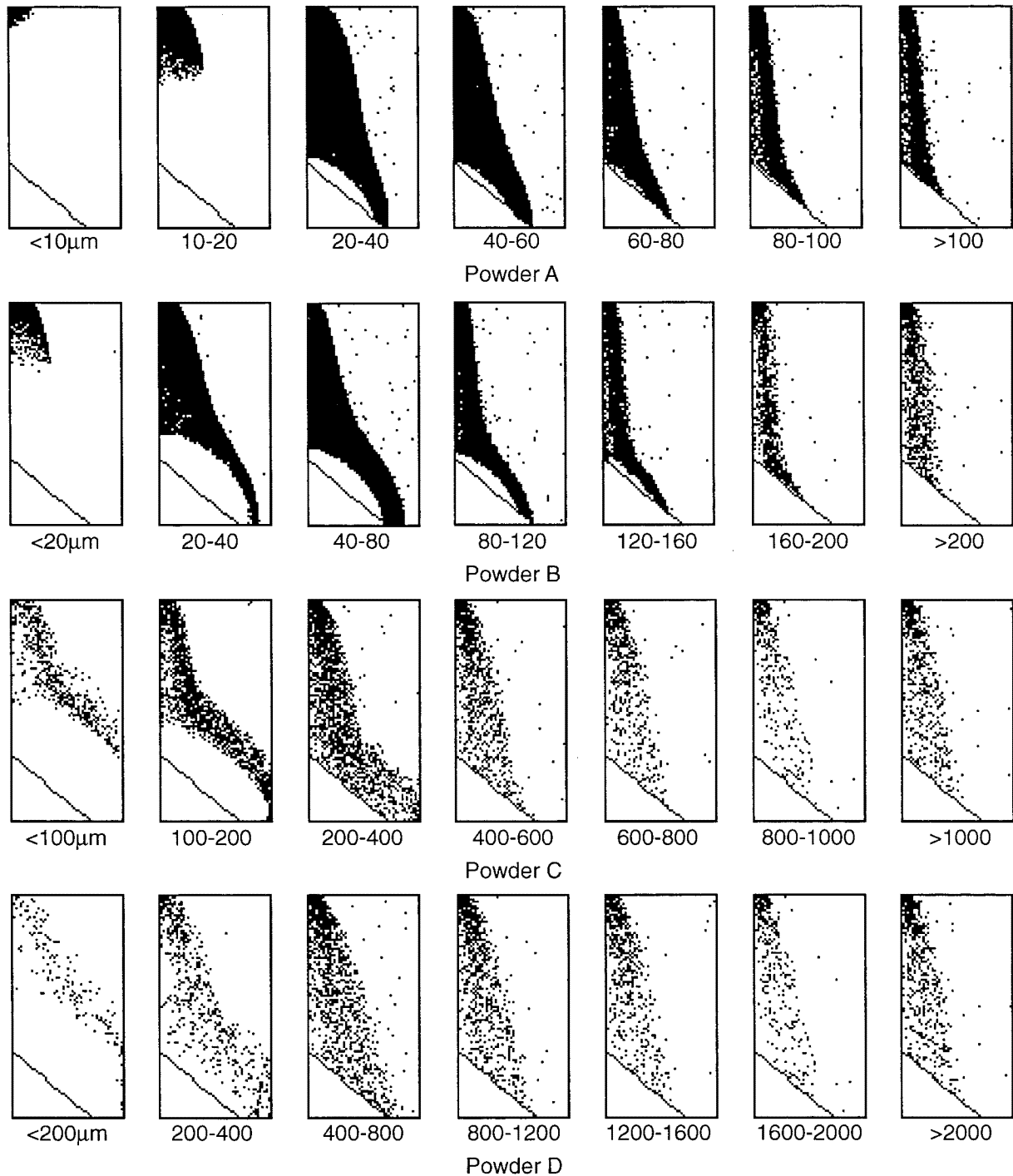


Fig. 2 Spatial particle distributions according to their diameters for Powders A-D at  $t=30$  s.  
粉体 A-D の粒径による粒径分布 (時間 30 秒)

広がり粒径の依存性は粒径の増大とともに小さくなる粘性力によるものと考えられる。また、これらの粒子コラムは時間とともに径方向に広がり、ある程度までヒープが形成されてくると粒子の一部がヒープ電界によって壁側に曲げられて落下している。

粉体内の個々の粒子の運動の粒径による相違を観測するため、粉体 A-D の 30 秒後の粒子の空間分布を

粒径で分類して再プロットした図を Fig. 2 に示す。比較的粒径の小さい粒子はタンクの上部和壁付近に存在し、粒径の大きな粒子は中心軸付近に沿って落下している。このソーティングしたような現象は小さい粒子ほど重量電荷密度（電界の影響）が大きく、かつ粘性力が大きくなるためである。特に、小さい粒子が上部に捕捉されているように見えるのは、これによって

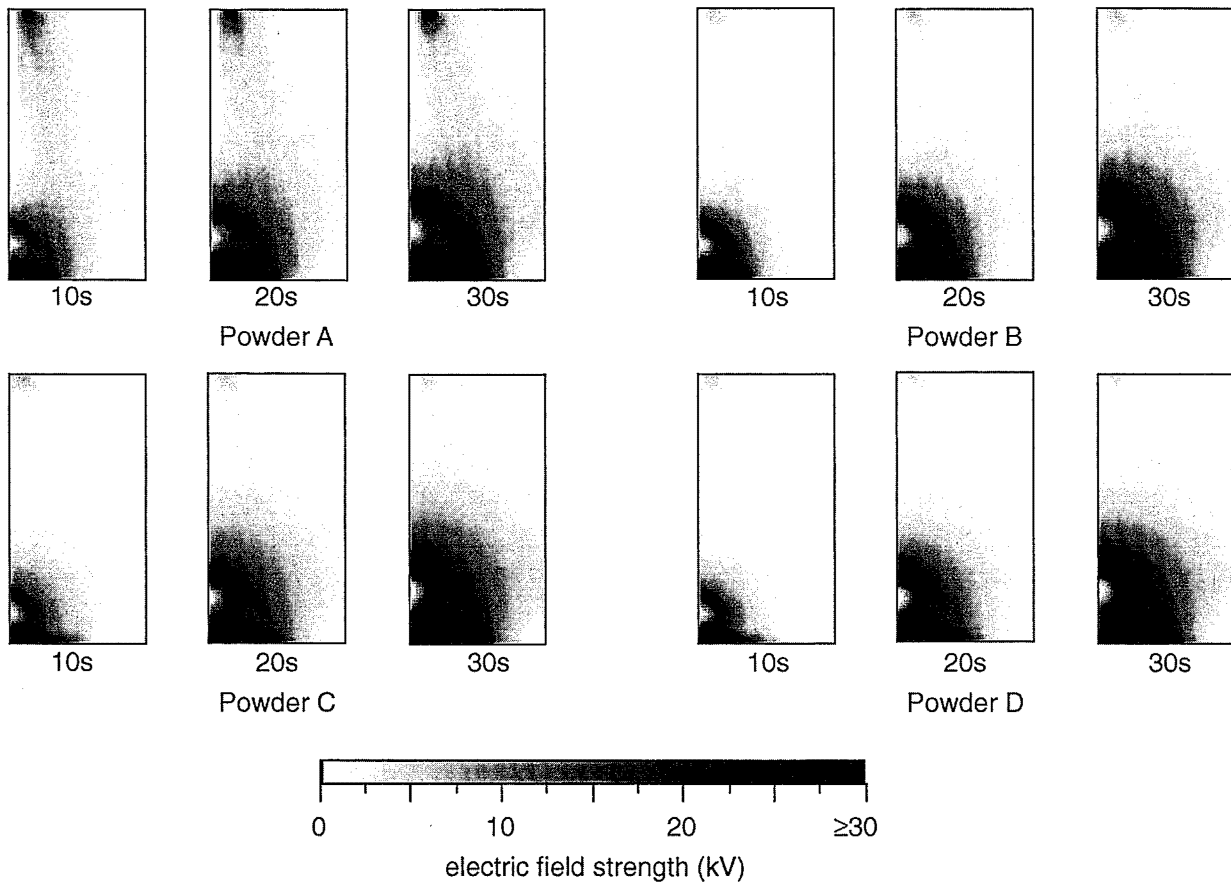


Fig. 3 Temporal evolution of electric field for Powders A-D.  
電界分布の時間進展

終端速度に近い著しく遅い速度で落下しているためであると考えられる。したがって、Fig. 1からも解るように小さい粒子の粉体ほど空間に浮遊する粒子が多くなっている。

### 3.2 電界及び電位分布

次に放電の可能性を議論するために電界強度分布をFig. 3に示す。電界強度を示すグレースケールは最大を空気の絶縁破壊電界強度 30 kV/cm で制限している。したがって、図中に示された黒い部分は 30 kV/cm 程度あるいはそれ以上であることを示している。したがって、本シミュレーション条件では放電がヒープ表面およびその近傍で起こることを示しており、比較的粒径が小さい粉体 A では粉体投入部のエッジ付近でも放電が起こる可能性がある。粒径が大きい粉体ほど速く落下し、その電荷がヒープに蓄積されるので、ヒープ表面あるいはその近傍における放電の可能性は粒径が大きくなるほど高くなる。粉体 A の投入部のエッジ付近の放電は前節で示した空間に長く滞在する小さな粒子によって形成された電界による。実際にも粉体投入時に入口付近やヒープ表面で放電が起こ

る事例があり、本シミュレーション結果はこれを実証している。

また、前述したタンク上部の空間に比較的長い時間滞在する粒径の小さい粒子群の帯電雲による強電界領域（一般に 3-5 kV/cm 以上）の広がりが大きくないことから、雷状放電が起きる可能性は本シミュレーション条件では生じなかった。これは、粒径分布を対数正規分布と仮定したため、粒径の小さい粒子の数が少ないので、これらによって形成された電荷量は比較的小さくなるためである。なお、雷状放電は直径 3 m 以下あるいは 60 m<sup>3</sup>以下までのサイロにおいて未だ実験的に確認されていない<sup>8)</sup>。しかしながら、粒径の大きな粒子に粒径の小さい粒子が多く混在する粉体の場合、空間に捕捉される電荷量がさらに増えるため雷状放電が生ずる可能性があるかもしれない。雷状放電の可能性についてはシミュレーション条件を変えて、今後、詳しく調べる予定である。

Fig. 4 に示すように時間 30 秒後のヒープ表面の電位の最大値は 400 から 800 kV までに達し、粒径が大きくなるほど大きくなる。また、小さい粒子が上部に滞在するため、粒径の小さな粉体 A (100 kV) 及び

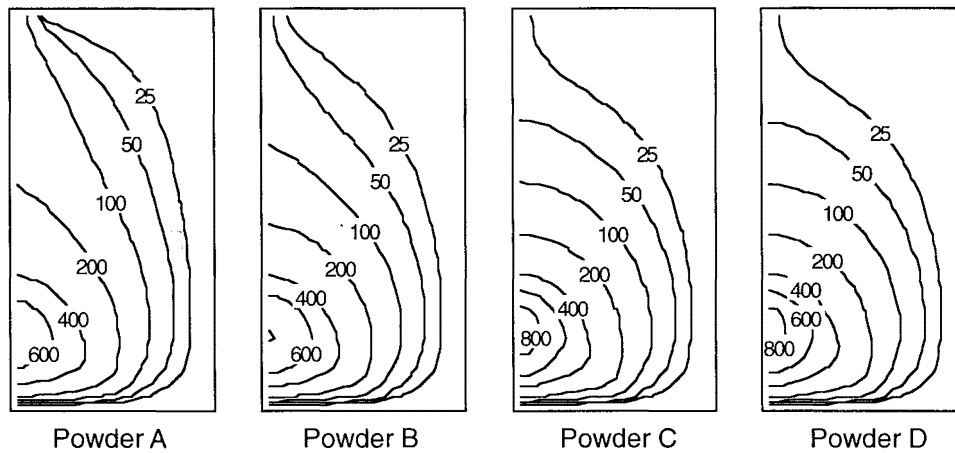


Fig. 4 Contour plots of the potential for Powders A-D after  $t=30$  s.  
The unit of values is in kV.  
電位分布 (時間 30 秒)

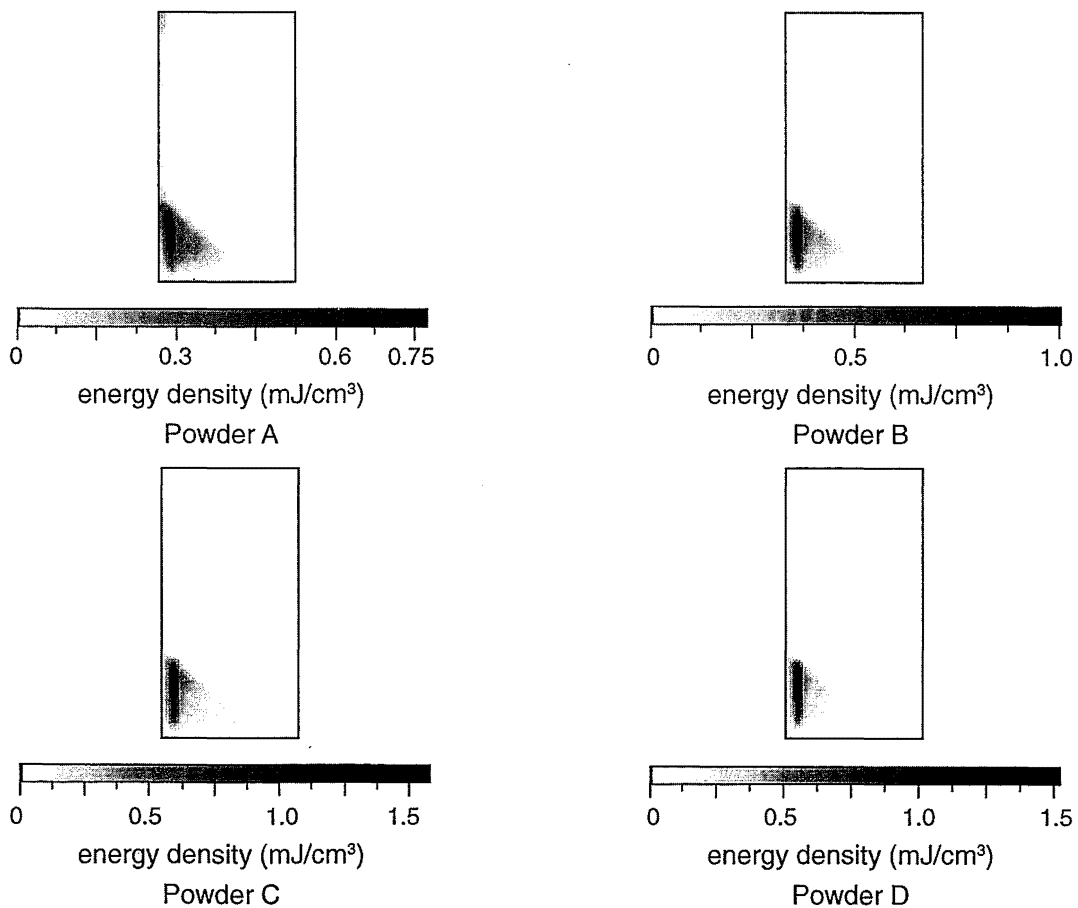


Fig. 5 Spatial distributions of electrostatic energy of the accumulated charges per unit volume for Powders A-D at  $t=30$  s.  
単位体積あたりの静電エネルギーの空間分布 (時間 30 秒)

B (50 kV) では投入口付近まで電位が比較的高くなっている。

### 3.3 静電気危険性評価

放電によって粉じん爆発が起きるためには、放電エネルギーが粉じんの着火エネルギー以上でなければな

らない。この場合の放電エネルギーは放電が起こる場所に電荷として蓄えられている静電エネルギーがもとなるので、放電エネルギーは静電エネルギー ( $0.5 \rho \phi$ , ただし、 $\rho$ : 電荷密度,  $\phi$ : 電位) で見積もることができる。Fig. 5 に時間 30 秒後の粉体 A-D の静電エネルギー密度の空間分布を示す。気相中でエネルギーが最大となる位置はヒープ表面上の中心軸付近であり、その値は粉体 A は  $0.6 \text{ mJ/cm}^3$ , 粉体 B は  $0.9 \text{ mJ/cm}^3$ , 粉体 C は  $1.6 \text{ mJ/cm}^3$  及び粉体 D は  $1.5 \text{ mJ/cm}^3$  である。この値は最大値をとる場所の近傍に比較的に着火エネルギーが低い粉体に着火を起こすに同等程度のエネルギーが保有されていることを示している。ここで、これらの静電エネルギーはエネルギー密度であるので、エネルギーを求めるためにはこれを体積で積分しなければならない。いま、ヒープ表面付近の  $30 \text{ kV/cm}$  以上の空間に保有されている静電エネルギーが放電によって放出されるとすると、このエネルギーは (A)  $0.14$ , (B)  $0.49$ , (C)  $0.64$  及び (D)  $0.75 \text{ J}$  となる。これらの値は粉体を着火するのに十分なエネルギーである。さらに、これらの近傍の電界は放電を起こすのに十分な値である。特に、粒径の大きな粉体は粒子が速く落下してより多くの電荷がヒープに蓄積されるので、静電エネルギーは粒径が大きな粉体ほど高くなっている。したがって、粒径の大きな粉体 C および D のヒープ表面上の中心軸付近で放電が起きた場合、着火を起こす可能性があることが示された。

また、本結果は粉体 A で起こりうる投入部のエッジ付近の放電では、静電エネルギーが小さいことから、着火することがないことも示している。むしろ、この放電は危険となる粉体の電荷を減少させる作用として働くと考えられる。

#### 4. まとめ

粉体の製造・取扱工程の静電気危険性の評価および予測をするため、特に災害が多発しているタンクへの帯電粉体の投入の自己無撞着シミュレーションを粒子法を適用することによって行った。粒径依存性を調べるために平均粒径が異なり、粒径分布が対数正規分布である 4 種類の粉体を用いて、粒子の挙動、タンク内の電位、電界分布及び蓄積される静電エネルギーを観測し、静電気危険性を評価した。

粒子の挙動は粒径に強く依存し、静電気危険性も粒径に依存することがわかった。さらに、興味深いことは、粒径の小さな粒子が電界と粘性により落下することが困難となり、タンク上部に長い時間滞在するようになることである。この現象は帯電雲の生成機構の解

明に役立つものと思われる。しかしながら、本シミュレーション条件ではこの帯電雲の電荷が雷状放電を誘発するほど大きくならなかった。今後は、この雷状放電の起こる条件を本シミュレーションによって考察する予定である。

電界分布の結果より、放電がヒープ表面上及びその近傍あるいは小さい粒径の粉体では投入口付近でも起こる可能性があることが示された。さらに、静電エネルギーにより放電がタンクの中心軸付近のヒープ表面で起こるとき着火の危険性があることが示唆された。さらに、本シミュレーション条件では、粒径が大きい粉体ほど粒子が速く落下してヒープに電荷が蓄積されるので、ヒープ表面で危険な放電が発生する可能性が増加することが示唆された。本シミュレーションは実際の生産プロセスの静電気危険性の評価および稼働前の事前評価 (予測) や事故の原因調査にも有効であろう。

#### 参考文献

- 1) A. Ohsawa, Self-consistent particle-in-cell simulation of charged powders entering a vessel, J. Electrostat. 43, p.187 (1998)
- 2) A. Ohsawa, Particle-in-cell simulation of charged powder in vessel, Proc. 1997 Annual Meeting of IEJ, p.209 (1997)
- 3) 大澤 敦, シミュレーションによる粉体貯槽内の静電気危険性評価, 静電気学会研究会資料 IESJ 98-1-6, p.39 (1998)
- 4) 大澤 敦, 帯電粉体のシミュレーションと静電気危険性評価, 産業安全研究所研究報告 NIIS-RR-97, p.77 (1998)
- 5) A. Ohsawa, Computational assessment of electrostatic hazards in vessel during the filling of charged powder particles, ESA-IEJ Joint Symp. Electrostat. 98 Proc., 232 (1998)
- 6) R.W. Hockney and J.W. Eastwood, Computer Simulation Using Particles, McGraw-Hill, New York (1981).
- 7) C.K. Birdsall and A.B. Langdon, Plasma Physics via Computer Simulation, McGraw-Hill, New York (1985)
- 8) P. Boschung, W. Hilgner, G. Lüttgens, B. Maurer and A. Widmer, An experimental contribution to the question of the existence of lightning-like discharges in dust clouds, J. Electrostatics 3, p.303 (1977)