Research Reports of the National Institute of Industrial Safety, NIIS-RR-97 (1998) UDC 537.2

帯電粉体のシミュレーションと静電気危険性評価

大澤 敦\*

# Self-Consistent Simulation of Charged Powders and Its Application to Evaluating Electrostatic Hazards

by Atsushi Ohsawa\*

**Abstract**: During the handling and processing of powders, it is well known that charge accumulate on the powder particles. 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. 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 to simulate charged powders entering a vessel. 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. The probability of incendiary discharges is considered based on calculated local electric fields and electrostatic energies.

It was found that the motion of particles strongly depends on particle size. Lighter particles in the powder were trapped in the upper region by a self-generated and heap electric fields. Since there was no large charged cloud of dispersed powder in air space, no lightning-like discharge is likely to occur under the simulated conditions. The position of the strongest electric field was initially in vicinity of the inlet pipe until the heap is formed or on the heap from the heap is completely formed. The possibility of incendiary discharges on the top of the heap is demonstrated.

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

### 1. はじめに

今日,粉体は食品,薬品,プリンタのトナ,金属材料,磁性材料,ファインセラミックスなど機能・多様化し,広範囲の産業分野で利用されている。これらの粉体の製造・取扱工程ではその帯電電荷による静電気危険性が潜在的にあり,これが原因による粉じん爆発災害は未だに絶えることがない。本研究の目的は,静電気による粉じん爆発災害を防止する基礎技術を開発することであり,特に生産プロセスで帯電した粉体によって,タンク内等に形成される帯電雲の生成機構の

解明とこれが生起する着火性放電の危険性評価,なら びに静電気放電が原因となって発生する粉じん爆発の 防止に関する基盤技術を提言することである。具体的 には,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のシミュレーションを開発するこ とである。特に帯電粉体の輸送およびタンクやサイロ への投入時に障害・災害が多発していることから,こ こでは帯電粉体が接地された金属製容器に投入される ときの静電気現象をシミュレートすることにした。

帯電粉体が投入されるときの静電気による主な危険 には、タンク内で発生する放電があり、これらの放電に は brush discharge (突起金属あるいは帯電絶縁物など との放電で投入口付近に多く観測される),堆積した粉

<sup>\*</sup>物理工学安全研究部 Physical Engineering Safety Research Division

体(ヒープ)表面で起こる propagating brush discharge (コーン放電ともいう)および気相空間中の帯電雲の電 界によるタンク壁との lightning-like discharge (雷状放 電)などが考えられている<sup>1-4)</sup>。これらの放電のエネ ルギーが粉じんの着火エネルギーよりも十分大きいと き,爆発雰囲気の粉じんを着火・爆発させることにな る。したがって,静電気危険性の評価あるいは予測は 放電の可能性と放電エネルギーがわかれば可能となる。

これらの静電気放電を防止することを目的として, 現在までに帯電粉体をサイロに搬入する際の放電を実 験的に観測した報告があるが5-7),シミュレーション に関しては、一つの帯電粒子とヒープを模擬した帯電 球体との相互作用に基づいたモデル<sup>8)</sup>があるのみであ る。このモデルはタンク内に存在する多数の他の帯電 粒子の空間電荷の影響を無視しているが、帯電粒子の 挙動を正確に表現するためには、この帯電粒子群によ る空間電荷を無視することはできない。すなわち、こ の空間電荷によって形成された電界が帯電粒子の運動 に影響し、さらに、この帯電粒子の移動によって空間 電荷分布が変化するからである。したがって、この系 の自己無撞着 (self-consistent) 解を得るためには、粒 子の運動方程式と場(ポアソン)の方程式を時々刻々 に連立させて解かければならない。この問題の解決の 一つの方法として, 粒子群を巨視的に見た流体モデル がある。流体モデルは静電噴霧の液滴<sup>9)</sup>,タンク内の液 体流10),静電ドリップ11)に適用されているが、個々の 粒子の運動の追跡や粉体の粒径分布を考慮することは 不可能である。しかしながら、ここで採用する粒子法 (particle-in-cell)<sup>12,13)</sup>を用いれば、これらの問題も解決 することができる。粒子法は粒子の運動と作用場(こ の場合は電場)において自己無撞着なシミュレーショ ンが可能な技法であり、プラズマ、天体物理、分子動 力学などの広い分野で適用されており、数多くの成果 をあげている。この粒子法では、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 (superparticle) を用いて計算する技 法を用いている。

ここでは、帯電粉体のタンク投入時の静電気危険性 の評価・予測のために、粒子法を用いた自己無撞着シ ミュレーション<sup>14)</sup>を行った。さらに、一般に粉体の粒径 には分布があるので、粒径分布も考慮している。本シ ミュレーションにより粒子の挙動、タンク内の電位、電 界分布および電荷によって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。

なお、ここで示した結果は一例であり、本シミュレー ションは大きさの異なるタンクおよび物性や粒径の異 なる粉体に対しても適用が可能であることを付記して おく。

### 2. モデリングとシミュレーション

シミュレーションに用いたタンクは高さ 1.0m, 半径 0.5m の金属製円筒タンクであり、このタンクは接地さ れている。このタンクのrおよび z方向それぞれを 20 および40個のメッシュに分割した。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。この粉体は比重が 1.0, 比誘電率が 2.0 の物質と した。粉体の粒径分布は Dp50%=100µm, Dp15.9%= 200 µm である。ここで、Dp50%とはふるい上分布の 50%粒径を意味する。粉体の電荷量は1.0 µC/kgとし, 個々の粒子の電荷は粒子の表面に分布することから、そ の表面積に比例するとし、そ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, θおよび z方向の初速度を求めた)で タンクの上部の中心に開けた直径 10 cm の穴からΔt 秒 ごとに投入された。なお、投入量は1.0 kg/s、超粒子の 数は1×10<sup>4</sup>/kg, 堆積する粉の安息角は35度とし, 気 相の流れはないものとした。Table 1 に本シミュレー ションに用いた仮定をまとめて示しておく。

シミュレーションは軸対称二次元 (r, z),速度空間を  $r, \theta$ および z方向の三次元で粒子法に用いて行った。具体的には、Fig. 1 に示すようにある時間での全超粒子

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

vessel	
radius	0.5m
height	$1.0\mathrm{m}$
inlet pipe diameter	$10  \mathrm{cm}$
powder or particle	
charge	$1.0~\mu{ m C/kg}$
specific gravity	1.0
relative permittivity	2.0
initial velocity	$0.5 \mathrm{~m/s}$
mass flow rate	$1.0 \ \mathrm{kg/s}$
angle of repose	35 degrees
deposited powder	c.c.p.*
particle size distribution	log-normal
D50%**	$100~\mu{ m m}$
$D15.9\%^{**}$	$200~\mu{ m m}$

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

\*\*D50%, D15.9%: the 50% diameter, the 15.9% diameter of the oversize distribution of the powder, respectively. の位置に従って各グリッド点上に超粒子の電荷を配分 し電荷密度分布を求め、その電荷密度分布によって生 ずる電界を求め、これを加味して各超粒子の運動方程 式を解き、各超粒子の運動を求める。これを微少時間 Δtごとに繰り返すことによって、自己無撞着なシミュ レーションが可能となる。

具体的なシミュレーションの概略的な手順は以下の ようになる。まず、 $\Delta t$ ごとに超粒子群をタンクに投入 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<sup>14)</sup>をかける CIC scheme<sup>12,13)</sup>を用 いた。これにより、電荷密度分布が求まるので、適切 な境界条件のもとでポアソン式

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \tag{1}$$

および

1

$$\boldsymbol{E} = -\mathrm{grad}\phi \tag{2}$$

を解くことによって、グリッド上の電界 Eが求まる。 ここで、 $\phi$ はグリッド上の電位、 $\rho$ はグリッド上の電荷 密度、 $\epsilon$ は空気の誘電率である。次に、この電界より、 先に用いた CIC scheme を用いて、各粒子上の電界を内 挿により求める。粒子にかかる力を電界によるクロー ン力と粒子の速度に比例する空気の粘性および重力と すると、粒子の運動方程式は

$$m\frac{d^2r}{dt^2} = qE_r - 6\pi\eta a\frac{dr}{dt} + m\frac{v_\theta^2}{r},\tag{3}$$

$$m\frac{d^2z}{dt^2} = qE_z - 6\pi\eta a\frac{dz}{dt} + mg,$$
(4)

$$n\frac{dv_{\theta}}{dt} = -6\pi\eta av_{\theta} - m\frac{1}{r}\frac{dr}{dt}v_{\theta},\tag{5}$$

となる。ここで、m は粒子の質量、qは粒子の電荷量、 a は粒子の半径、 $E_r$ 、 $E_z$ は電界の各成分、 $\eta$ は空気の粘 性係数である。この運動方程式を解くとき、計算精度 をよくするため $\Delta t$ 秒間に移動する距離がメッシュの間 隔を越えないように $\Delta t$ の時間をさらに適当な整数で分 割した。したがって、 $\Delta t$ 秒後の粒子の速度と位置はこ れらの運動方程式をその整数回分だけ積分することに より求められる。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。粒子はタンクの天井 および側壁と弾性衝突をするとした。

粒子の位置がタンク底あるいはヒープ上のとき,そ の粒子が代表する粉が堆積するとした。堆積する粉は



Fig. 1 Flow of the simulation for one time step. シミュレーションの1タイムステップのフロー

r方向をいくつかの円環状に分割したセル内に堆積する とし、分割された堆積粒子群の隣同士の高さが安息角 (35 度)を越えないように新しく堆積する粒子(超粒 子が代表した粒子群)が隣の分割へと移動し(滑り落 ち)堆積するようにした<sup>14)</sup>。さらに、堆積した粉体の 電荷をグリッド上に配分した。また、堆積する粉体粒 子群の個々の粒子同士が立方最密充てん格子状になる としてその堆積粉体の体積および誘電率を決定した。

時間 30 秒 (30 kg の粉が投入される) までシミュレー ションが行われ,最終的にタンク内に投入された超粒 子の総数は 30 万個である。

#### 結果および検討

Fig. 2 に粉体の粒子分布の時間変化を示す。各図の 上,下,左およ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。粒子コラムは時間とともに 径方向に広がっているのがわかる。これは,粉体粒子 によって形成された空間電荷による電界とヒープ表面 の電界によって径方向に粒子が運動するためと考えら れる。粒径分布の影響については後に議論する。

電界分布の時間的進展を Fig. 3 に示す。この図において電界強度をカラーで表示しているが,最も高いカラーレベルである赤は空気の絶縁破壊電界 30 kV/cm で制限して表示している。したがって,赤で表示された部分は 30 kV/cm 以上の電界であることを示しており,赤い領域の気相中では放電が生ずる可能性があることを示している。したがって,本シミュレーション



Fig. 2 Temporal evolution of particle positions. (a) 5s, (b) 10s, (c) 15s, (d) 20s, (e) 25s, (f) 30s. 粒子分布の時間変化



Fig. 3 Temporal evolution of electric field. (a) 5s, (b) 10s, (c) 15s, (d) 20s, (e) 25s, (f) 30s. 電界分布の時間変化

条件では放電がヒープ表面およびその近傍で起こるこ とを示している。もっとも電界が高い場所は粉体が堆 積する前までは投入口のエッジ部分であり,堆積後は 徐々にヒープ表面付近(ヒープ内は除く)であること がわかる。また,図中の電界のベクトルを示した矢印 からもわかるようにヒープ電界は上向きであり,粉体 の落下を抑制する方向に働いている。

粉体投入時に入口付近で放電が起こる事例があるが、 この程度の電荷の粉体では投入口付近では放電が起こ らないことも示された。

**Fig. 4** に粒径の影響を見るため、30 秒後の粒子分布 (**Fig. 2(f**)) を粒径で分類して再プロットした図を示 す。粒径の小さい(軽い)粒子ほど粘性とヒープ電界 により、ヒープ上に落下できなくなっており、それらの 一部が径方向に広がって落下している。特に粒径が 25  $\mu$ m 以下(Fig. 4(a))の粒子はタンクの上部にトラッ プされることが示された。一方、粒径の大きな(重い) 粒子は中心軸に沿って落下している。これは、粒子の 電界 Eによる加速度 $\alpha$ は粒子の表面電荷密度を $Q_s$ 、密 度を $\rho_V$ とすると

$$\alpha = \frac{q}{m}E = \frac{4\pi a^2 Q_s}{\frac{4}{3}\pi a^3 \rho_V}E = \frac{3Q_s}{a\rho_V}E \tag{6}$$

で表され、粒径の小さいほど電界の影響を受けやすい



Fig. 4 Spatial particle distributions according to their diameters at t = 30s. (a) diameter  $D < 25 \mu$ m, (b)  $25 \le D \le 50 \mu$ m, (c)  $50 \le D < 100 \mu$ m, (d)  $100 \le D < 200 \mu$ m. 粒径による粒子分布 (時間 30s)

ためである。したがって, Fig. 2 に示された粒子分布 の空間的(径方向への)広がりの時間的進展は,電界 により比較的粒径の小さい粒子が径方向に移動するこ とによって起こっており,この電界に影響される粒径 が時間的に増大するヒープ電界によって大きくなるた めと解釈できる。また,粒径の大きな粒子ほど中心軸 に沿って落ちることは,ヒープの電荷密度が中心ほど 高くなることを示している。

このタンク上部の空間にトラップされた比較的粒径 の小さな粒子の帯電雲によってLightning-like discharge が起きる可能性が本シミュレーション条件では生じな かった。これは、電荷量が粒子表面積に比例するため、 粒径の小さい粒子によって形成された電荷量は比較的に 小さくなるためである。なお、lightning-like discharge は直径 3m 以下あるいは 60m<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>5)</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存在する粉 体の場合あるいはシミュレーションをさらに長い時間 継続した場合、空間にトラップされる電荷量がさらに 増えるため lightning-like discharge が生ずる可能性が あるかもしれない。これについてはシミュレーション 条件を変えて詳しく調べる必要がある。

### 4. 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 となるので,放電エネルギーは静電エネルギーで見積 もることができる。この静電エネルギー e を電荷密度  $\rho$ と電位 $\phi$ および  $e = 0.5\rho\phi$ より求めた結果を Fig. 5 に



Fig. 5 Spatial distribution of electrostatic energy of the accumulated charges per unit volume at t = 30s.
 電荷に蓄積されている単位体積当たりの静電エネルギーの分布(時間 30s)

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、その値は約1 mJ/cm<sup>3</sup>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。さら に、Fig. 3 よりその近傍の電界は放電を起こすのに十 分な値である。したがって、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。

— 81 —

## 5. 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行っ た。シミュレーションには粒子法を適用することによっ て粒径分布も考慮した。

粒子の挙動は粒径に強く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タンク 上部に電界によりトラップされることである。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 雲は Lightning-like discharge を誘発するほど大きくは なかった。

電界分布および静電エネルギーにより,本シミュレー ション条件では,放電がヒープ表面上およびその近傍 で起こる可能性が示され,さらに,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る。

#### 謝 辞

本研究は平成8年度科学技術庁科学技術振興調整費二 国間型国際共同研究で行われた研究の一部である。

#### 参考文献

- M. Glor, Hazards due to electrostatic charging of powders, J. Electrostat. 16 (1988) 181.
- M. Glor, Electrostatic Hazards in Powder Handling, John Wiley & Sons, New York (1988).
- T. B. Jones and J. L. King, Powder Handling and Electrostatics: Understanding and Preventing Hazards, Lewis Publishers, Michigan (1991).
- G. Lüttgens and N. Wilson, Electrostatic hazards, Butterworth Heinemann, Oxford (1997).

- P. Boschung, W. Hilgner, G. Lüttgens, B. Maurer and A. Widmer, An experimental contribution to the question of the exsistence of lightning-like discharges in dust clouds, J. Electrostat. 3 (1977) 303.
- B. Maurer, M. Glor, G. Lüttgens and L. Post, The rig for reproducible generation of discharges from bulked polymeric granules, J. Electrostat. 23 (1989) 25.
- 7) M. Glor, G. Lüttgens, B. Maurer and L. Post, Discharge from bulked polymeric granules during the filling of silos-Characterzation by measurements and influencing factors, J. Electrostat. 23 (1989) 35.
- M. Glor, Conditions for the appearance of discharges during the gravitational compaction of powders, J. Electrostat. 15 (1984) 223.
- A. F. Artamonov and I. P. Vereshcagin, Mathematical model of electrostatic air sprayinf and some numerical experiments results, J. Electrostat. 23 (1989) 463.
- 10) K. Yamane, K. Yoshida and I. Aya, Numerical analysis of electric field in a closed space injected with charged fluid, J. Electrostat. 33 (1994) 43.
- G. S. Wright, P. T. Krein and J. C. Chato, Selfconsistent modeling of the electrohydrodynamics of a conductive meniscus, IEEE Trans. Ind. Appl. 31 (1995) 768.
- R. W. Hockney and J. W. Eastwood, Computer Simulation Using Particles, McGraw-Hill, New York (1981).
- C. K. Birdsall and A. B. Langdon, Plasma Physics via Computer Simulation, McGraw-Hill, New York (1985).
- A. Ohsawa, Self-consistent particle-in-cell simulation of charged powders entering a vessel, J. Electrostat. in press (1998).

(平成 10 年 2 月 2 日受理)