

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に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に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の放電で投入口付近に多く観測される)、堆積した粉

*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¹⁻⁴）。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、爆発雰囲気中の粉じんを着火・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⁸）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なければならない。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⁹）、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）^{12,13}）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¹⁴）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 $Dp50\%=100\mu\text{m}$ 、 $Dp15.9\%=200\mu\text{m}$ 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 $1.0\mu\text{C}/\text{kg}$ 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 $1 \times 10^4/\text{kg}$ 、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, θ 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 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		0.5m
height		1.0m
inlet pipe diameter		10 cm
powder or particle		
charge		$1.0\mu\text{C}/\text{kg}$
specific gravity		1.0
relative permittivity		2.0
initial 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
D50%**		100 μm
D15.9%**		200 μm

* 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。これを微小時間 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、 Δt 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¹⁴⁾をかける CIC scheme^{12,13)}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

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

および

$$E = -\text{grad}\phi \quad (2)$$

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、 ϕ はグリッド上の電位、 ρ はグリッド上の電荷密度、 ϵ 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ーロ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

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

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

$$m \frac{dv_\theta}{dt} = -6\pi\eta a v_\theta - m \frac{1}{r} \frac{dr}{dt} v_\theta, \quad (5)$$

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、 η 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 Δt 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 Δt の時間をさらに適当な整数で分割した。したがって、 Δt 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

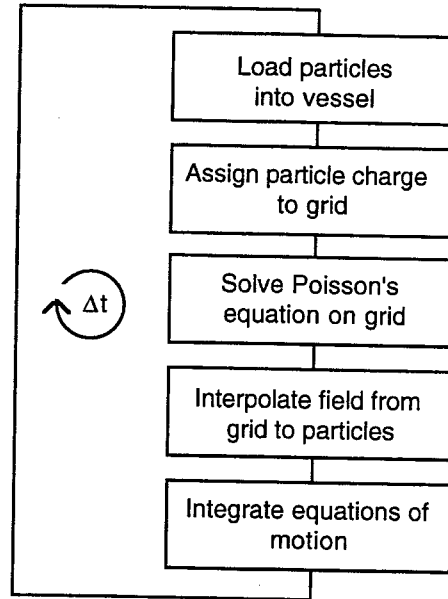


Fig. 1 Flow of the simulation for one time step.
シミュレーションの1タイムステップのフロー

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¹⁴⁾。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。

3. 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

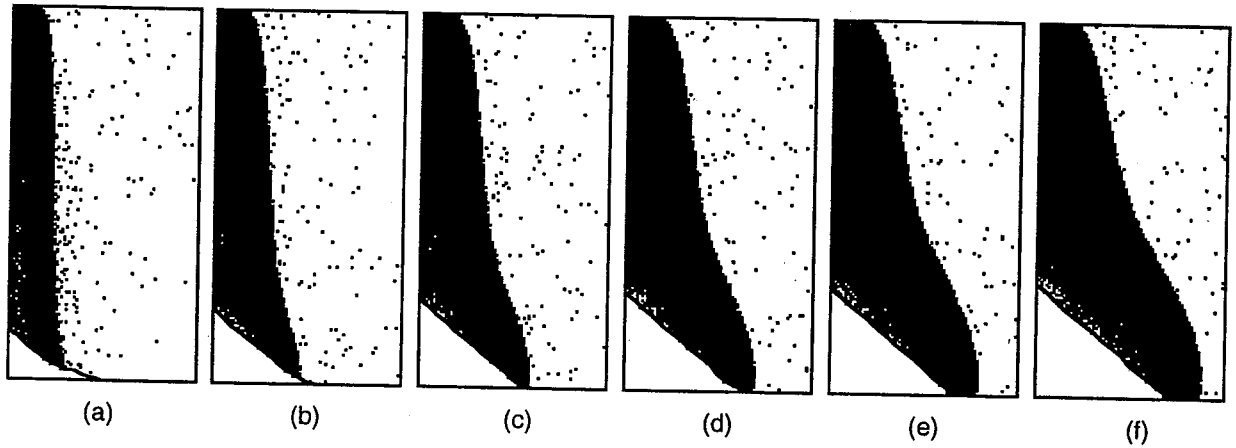


Fig. 2 Temporal evolution of particle positions. (a) 5s, (b) 10s, (c) 15s, (d) 20s, (e) 25s, (f) 30s.
粒子分布の時間変化

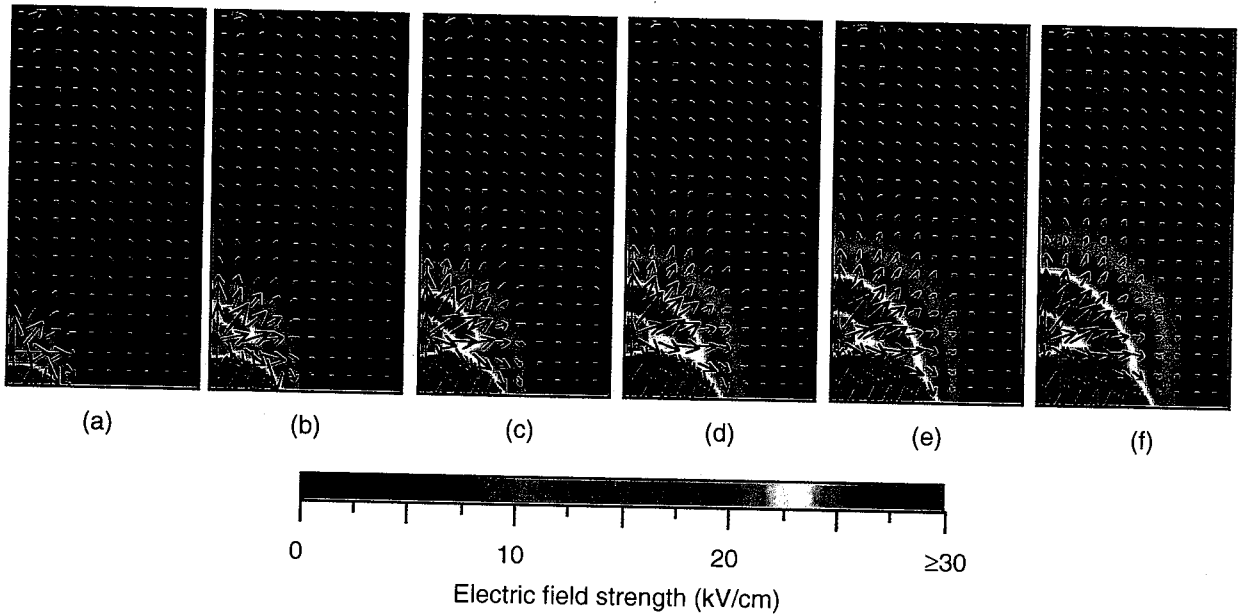


Fig. 3 Temporal evolution of electric field. (a) 5s, (b) 10s, (c) 15s, (d) 20s, (e) 25s, (f) 30s.
電界分布の時間変化

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 μm 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 α は粒子の表面電荷密度を Q_s 、密度を ρ_V とすると

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

で表され、粒径の小さいほど電界の影響を受けやすい

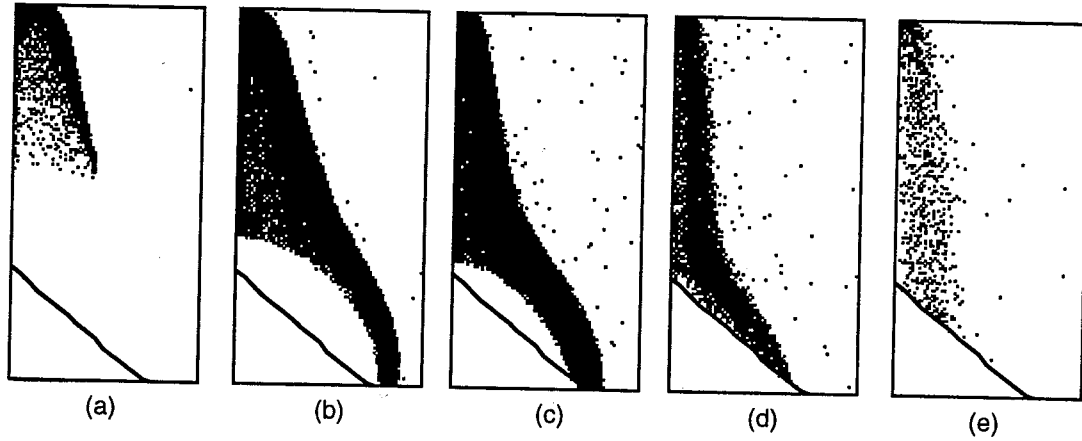


Fig. 4 Spatial particle distributions according to their diameters at $t = 30s$. (a) diameter $D < 25 \mu m$, (b) $25 \leq D \leq 50 \mu m$, (c) $50 \leq D < 100 \mu m$, (d) $100 \leq D < 200 \mu m$.
粒径による粒子分布 (時間 30s)

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）広がりや時間的進展は、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 $60m^3$ 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⁵⁾。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 ρ と電位 ϕ および $e = 0.5\rho\phi$ より求めた結果を Fig. 5 に

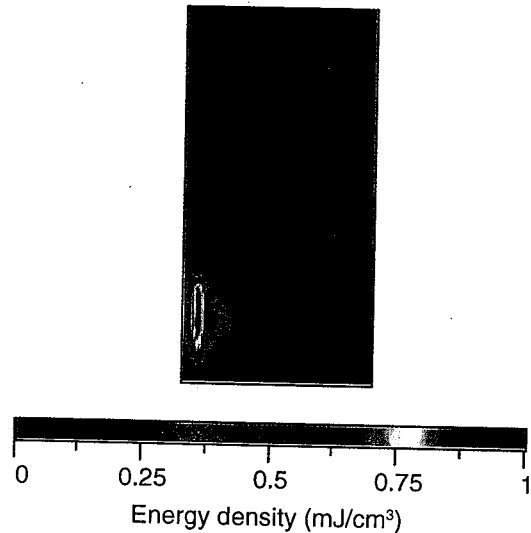


Fig. 5 Spatial distribution of electrostatic energy of the accumulated charges per unit volume at $t = 30s$.
電荷に蓄積されている単位体積当たりの静電エネルギーの分布 (時間 30s)

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^3 である。この値は最大値をとる場所の近傍に比較的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。

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、放電がタンクを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

- 1) M. Glor, Hazards due to electrostatic charging of powders, *J. Electrostat.* 16 (1988) 181.
- 2) M. Glor, *Electrostatic Hazards in Powder Handling*, John Wiley & Sons, New York (1988).
- 3) T. B. Jones and J. L. King, *Powder Handling and Electrostatics: Understanding and Preventing Hazards*, Lewis Publishers, Michigan (1991).
- 4) G. Lüttgens and N. Wilson, *Electrostatic hazards*, Butterworth Heinemann, Oxford (1997).
- 5) 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. Electrostat.* 3 (1977) 303.
- 6) 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-Characterization by measurements and influencing factors, *J. Electrostat.* 23 (1989) 35.
- 8) M. Glor, Conditions for the appearance of discharges during the gravitational compaction of powders, *J. Electrostat.* 15 (1984) 223.
- 9) 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.
- 11) G. S. Wright, P. T. Krein and J. C. Chato, Self-consistent modeling of the electrohydrodynamics of a conductive meniscus, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 31 (1995) 768.
- 12) R. W. Hockney and J. W. Eastwood, *Computer Simulation Using Particles*, McGraw-Hill, New York (1981).
- 13) C. K. Birdsall and A. B. Langdon, *Plasma Physics via Computer Simulation*, McGraw-Hill, New York (1985).
- 14) 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)