

粉体プロセスのコンピュータシミュレーションによる静電気危険性評価*

大澤 敦**

Computational Assessment of Electrostatic Hazards in Silo Filling Operations*

by Atsushi OHSAWA**

Abstract: It is well known that charges accumulate on powder particles by frictional contact electrification during the handling, processing and transport of powders. In filling operations with the charged powder, charges stored in vessels can lead to electrostatic hazards. This is because the charges often build up strong electric fields to produce electrostatic discharges including incendiary discharges that can induce ignition of any flammable powder dusts or vapors present in vessels. To prevent such electrostatic discharge (ESD) hazards, it is important to understand the mechanisms of the formation of the strong electric fields and the occurrence of the incendiary discharges. Computer simulation may be powerful to explore the mechanism and to assess the ESD hazards because it is easy to change the conditions of operations and the properties of powder in simulations rather than experiments.

This paper presents the computational assessment of electrostatic hazards associated with filling processes with charged powder. Since the particle-in-cell technique has been used in the simulation, the simulation has been able to give self-consistent solutions for both the motions of charged particles and the electric fields inside the vessels. However, in the previous model of the simulation, charge dissipation processes were assumed to be ignored. The assumption caused an overestimation of the electrostatic hazards because the charge dissipation processes, i.e., charge relaxation of powder heap and discharges, reduce the electrostatic hazards as long as discharge energies are low. Therefore, in this paper we propose models of the charge dissipation processes and present a simulation for a vessel of 1 m in diameter and a monodisperse powder of 1 mm in diameter and of 1 $\mu\text{C}/\text{kg}$ in charge-to-mass ratio. The models gave a much truer simulation than the previous ones and the results of the simulation were comparable with those of experiments. Under the simulation conditions studied in this paper all discharges occurred on a heap surface, and the simulation estimated that incendiary discharges could be produced.

Keywords: Particle-in-cell simulation, Charged powder, Filling operation, Electrostatic discharge, Charge relaxation, Electrostatic hazards

* Powder Technology 135-136 (2003) 216-222に一部発表

** 物理工学安全研究グループ Physical Engineering Safety Research Division

1. はじめに

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^{1)・4)}、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および危険電界の形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コンピュータ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、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。

帯電粉体が投入されるときに静電気による主な危険は、帯電粉体で形成される電界によって発生する静電気放電^{1)・4)}であり、放電危険性に関する実験的観測^{5)・9)}や除電器による帯電防止^{10)・11)}などが研究されているが、コンピュータシミュレーションに関しては著者の研究のみである。シミュレーションはサイズ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変更が実験に比べて容易であるので、静電気危険性の予測・評価の有力な手段である。

静電気放電のエネルギーがタンク内の粉じん雰囲気^{12)・13)}の着火エネルギーよりも大きいとき、着火・爆発することになる。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そのときの放電エネルギーがわかれば可能となる。したがって、放電を考慮することによって、これまで著者が行ってきたシミュレーション^{12)・13)}を改良した。これまでの放電を無視したシミュレーションでは放電の危険性を過大に評価していた。今回の改良で、より実用的な評価が可能になった^{14)・15)}ので、その一例を報告する。

2. モデリングとシミュレーション

モデルの詳細は文献^{12)・15)}に譲るが、粒子のシミュレーションには粒子法 (particle-in-cell : PIC)^{16)・17)}を採用している。この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 (self-consistent) シミュレーションが可能な技法である。

また、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。

シミュレーションの主な流れはFig. 1 のようになり、

- (1) 帯電粉体の投入
 - (2) 個々の粉体の電荷と位置によるグリッド電荷密度の計算
 - (3) グリッド上での電界の計算
 - (4) 3の電界分布による個々の粒子の運動の計算
 - (5) ヒープ形成の計算
 - (6) 堆積粉体の電荷緩和
 - (7) 放電
- が時々刻々と計算され、これらを繰り返し計算することによって帯電粉体のサイロ充填のシミュレーションが行われている。(2)-(4)はPIC法に基づいている¹²⁾。(5)では堆積した粉体は安息角以内になるようにヒ-

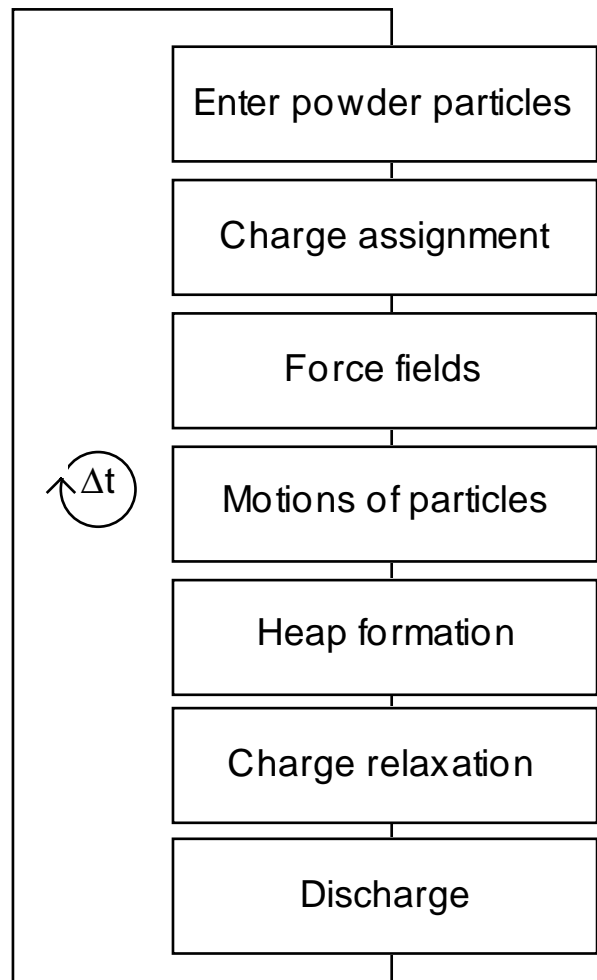


Fig. 1 A cycle of one time step of the simulation. シミュレーションのフロー

```

if local electric field > 30 kV/cm then
  Determine the target particles by using the mpf-drift mode
  Obtain the two initial charges
if not obtain the initial values then
  Determine the target particles again by using the streamer model
  Obtain the two initial charges
end if
repeat
  Obtain discharged charge by bisection method
  Charge assignment & Solve field
  if the field is still high then restore the charge
until the local field < 30 kV/cm and charge within 1% error
Assign discharged charge obtained to the target particles
end if

```

Fig. 2 Computer model of discharge.
放電モデル

ブが形成される¹²⁾。(6)の電荷緩和は個々の粒子の電荷が線形に緩和することを仮定している¹⁵⁾。ここでは改良された(7)の放電についてモデルを説明する。

2.1 放電モデル

放電自体を模擬することは電子、イオンに関する計算を追加させることになるので計算時間が膨大となる。そこで、空気の絶縁破壊電界30kV/cm以上になると放電が起き、絶縁破壊電界以下になるための中和電荷を計算することによって放電を模擬した。これは静電気放電が蓄積された電荷による静電エネルギーをソースとして起こるものであり、放電電荷は中和した電荷分に相当することに基づいている。また、放電による電荷の中和は粉体の電荷と反極性の電荷のイオンが粉体と衝突することによる。したがって、局所的電界が空気の絶縁破壊電界以上になったとき、その場所で放電が開始するとした。また、放電領域は、粉体との衝突を考慮して、粉体電荷と反極性のイオンがそのドリフト方向にどのくらい遠くに飛行できるかを計算することによって求めた。この飛行距離はイオンと粉体粒子が衝突する際の局所的な平均自由行程で決定し、この平均自由行程が今計算しているグリッド間隔 dr 、 dz よりも大きい場合、その反極性のイオンがドリフトする方向に放電が隣接するグリッドに拡張されるとした。これを各グリッド毎に繰り返すことによって放電領域が決定されるので、その領域内にある粒子にその放電開始位置からの距離で決まる重率（サイロの大きさのCloud-in-cell）をもとに絶縁破壊電界以下にする最適な（誤差1%以下の）放電電荷を二分法により求めるという放電モデルを採用した¹⁵⁾。

さらに、いまだに発生の可能性が解明されていない雷状放電^{1)・5)}を模擬するため、上記の方法によって求めた放電領域のほかストリーマ放電の自続電界である5 kV/cm¹⁸⁾以上の連続する領域とした方法（ストリーマ放電モデル）を採用し、上記の平均自由行程・ドリフトモデルで絶縁破壊電界以下にする放電電荷が計算できないときにこの方法によって放電を計算するようにした。

Table 1 Simulation conditions studied.
シミュレーション条件

Diameter of vessel	1 m
Height of vessel	1 m
Diameter of inlet pipe	0.1 m
Mass flow rate	1 kg/s
Initial velocity of particles	0.5 m/s
Charge to mass ratio	1 μ C/kg
Particle diameter (monodisperse)	1 mm
Specific gravity	1 g/cm ³
Bulk volume ratio	0.741
Repose angle	20°
Relative permittivity of powder material	2
Charge relaxation time	10 ⁴ s
Number of superparticles	10 ⁴ kg ⁻¹
Grid separation Δr and Δz	2.5 cm
Computational time step Δt	1 ms

ここで、堆積粉体内部では絶縁破壊電界が大きくなることと実際にも観測されないことから¹⁹⁾、堆積粉体内部での放電は無視しているが、表面で起こる場合の深さは堆積粉体による平均自由行程から決定された。この深さは粉体粒径と粉体粒子密度に依存するが、ほぼ粒径のオーダーである。

この放電モデルの主な流れはFig. 2のようになる。放電エネルギーはエネルギー保存則から、この各放電の前後の全静電エネルギーの差で求めることができる。

3. 結果および検討

シミュレーションに用いたタンクは高さ1.0m、直径1.0m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。このタンクの半径および軸方向それぞれを計算のため20および40個のメッシュに分割した。粉体粒子は任意の粒径分布をもった球とし、乱数で粒径を決めることもできるが、今回は放電モデルの検証も目的であるので、解析が簡便になるように単一粒径（直径1 mm）の粉体とした。この粉体は比重が1.0、比誘電率が2.0の物質とした。粉体の電荷量は1.0 μ C/kgとした。粒子は初速度0.5m/s（偏向角、方位角を乱数で決め、 r 、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10cmの穴から1秒毎に投入された。なお、投入量は1.0kg/s、超粒子の数は

$10^4/\text{kg}$ 、堆積する粉の安息角は 20° とした。堆積粉体の電荷緩和時間は、放電モデルの検討と絶縁物を原料とする体積抵抗率が 10^{13} m 以上の典型的な粉体の緩和時間が 10^4s 以上であることから²⁰⁾、 10^4s とした。シミュレーションは投入から200sまで行われた。Table 1 にシミュレーション条件をまとめて示しておく。

3.1 粒子分布

粉体粒子の空間分布とヒープの時間的進展をFig. 3 に示す。ヒープ表面の形状は10sまでは円錐状にならないが、それ以降は与えた安息角でほぼ円錐状に堆積された。また、この時間は粉体の電荷量に依存し、電荷量が大きくなると自分自身で形成される電界の増加のため粉体粒子が径方向に大きく広がり、円錐状になる時刻も遅くなった。

3.2 電界と電位

Fig. 4 は最大の電界と電位（ヒープ内部を除く）の時間変化を示している。最大電界・電位はヒープが形成されてからはヒープ表面上にあり、多くの放電が発生するまでは上昇し続けた。ひとたび放電が開始する

と連続的に放電が起こり、最大電界は絶縁破壊電界近傍で変化し、電位はほぼ 645kV の定常の電位になった。このことは、ヒープ表面近傍での電位あるいは電界の観測が放電の有無のモニターとして有効であることを示している。参考に定常に達したときのヒープ表面上の平均電界は 26.8kV/cm であり、平均電位は 460kV である。

以前のバージョンでは放電を無視していたので、電位・電界とも上昇し続け、このようなデータを得ることができなかった。この点でもシミュレーションは改良されている。

電界分布と電位分布の時間変化をFig. 5 に示す。電界分布を示すグレースケールの最大値は空気の絶縁破壊電界 30kV/cm で制限して示している。電位分布の等高線上の数値の単位は kV である。また、参考のためヒープ表面の形状を併記して示している。ヒープ内部を除いて電界が高くなるのはヒープ表面付近であり、ヒープ表面付近で放電が起こりうることを示唆している。

上部の粉体投入口付近の電界も高くなっていることも興味深い。粉体電荷を $5 \mu\text{C/kg}$ で行ったシミュレーションでは、投入口付近でも絶縁破壊電界以上の電界を形成して放電が起こるが、着火性の放電が起こることはなかった。

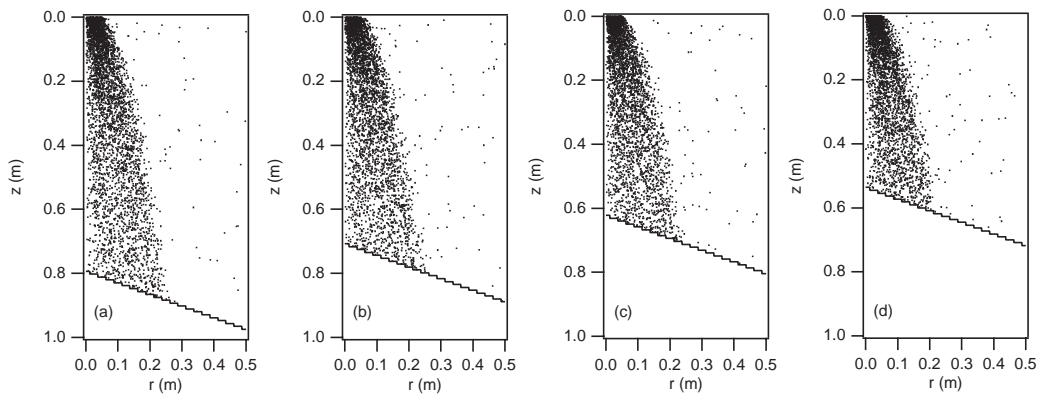


Fig. 3 Powder particle positions in space and heap profiles at time (a) 50s, (b) 100s, (c) 150s and (d) 200s. 粉体粒子の空間分布とヒープの時間的進展

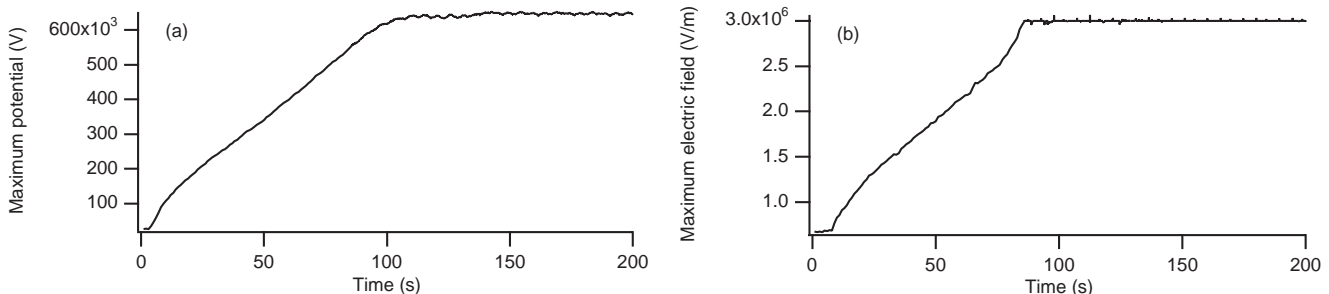


Fig. 4 Time variation of (a) maximum potential and (b) maximum electric field except inside heap. 最大電位 (a) と最大電界 (b)

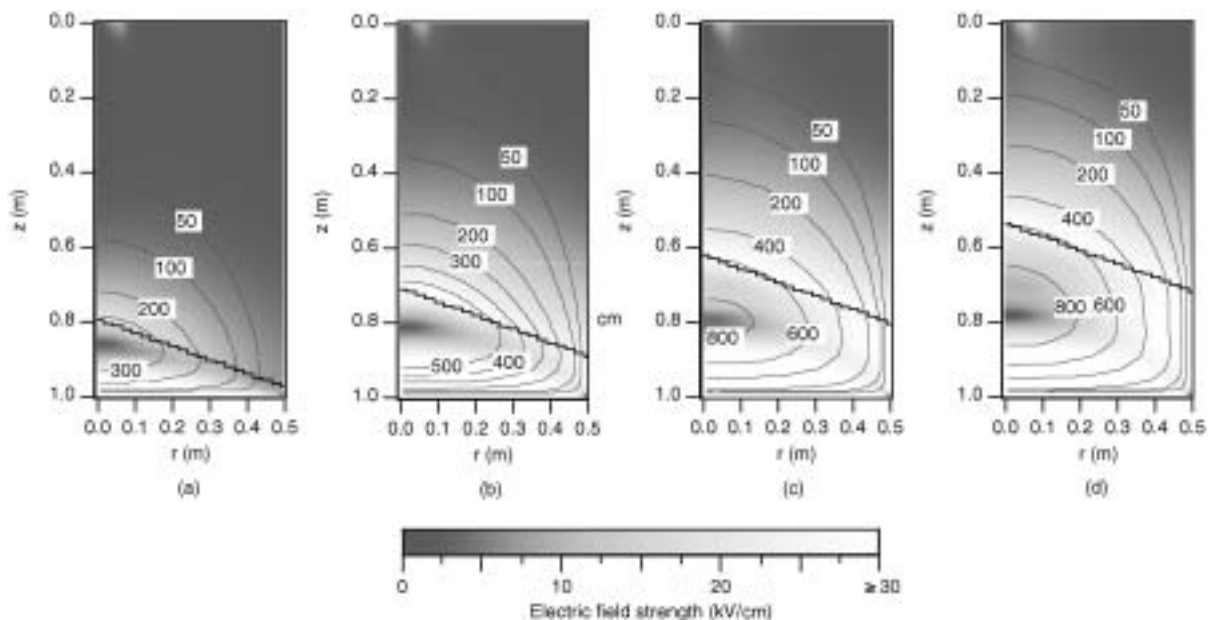


Fig. 5 Distributions of electric fields and contour plots of potentials at (a) 50s, (b) 100s, (c) 150s, and (d) 200s. The unit of values on equipotential curves is in kV. Solid discrete lines indicate the profiles of powder heaps.
電界分布と電位分布

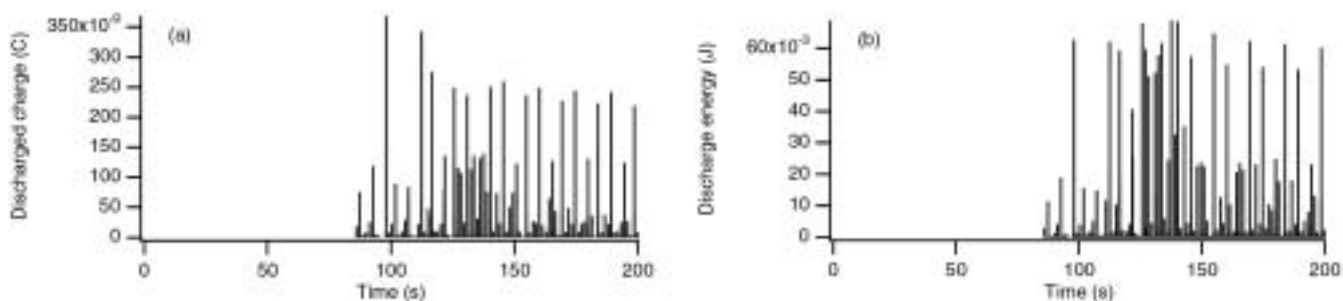


Fig. 6 Charge discharged (a) and discharge energy (b) of each discharge with time.
放電電荷と放電エネルギー

2.2 放電

Fig. 6 は放電が起きたときの各放電の放電電荷と放電エネルギーを示している。実験では不可能な粉体サイロ内で起こる放電のエネルギーも求められることはシミュレーションの利点である。

ひとたび放電が起こると断続的に多くの放電が発生しているのがわかる。全放電回数は154,312であった。放電の開始は85.951sであり、これは、粉体電荷量だけではなく、電界分布を変える要因でもある安息角にも依存した。たとえば、安息角を35度にしたとき、放電開始は41.121sであった。すべての放電はヒープ表面で起こったが、電荷量を高くすると前にも示したように投入口のエッジ付近でも放電が観測される。このときのエネルギーは0.1mJ以下で危険な放電が起きることはなかった。このことは実験でも試行されている

ように^{10),11)}、投入口付近での除電は有効であること示唆している。

平均放電電荷は0.47nCであり、平均放電エネルギーは0.135mJであった。多くの放電は1mJ以下であり、蓄積した電荷を安全に減少させる放電であるが、着火の危険がともなうと予想される10mJ以上の放電は55回起こった。最大の放電電荷は369nCであり、最大放電エネルギーは68.7mJであった。このような大きな放電電荷は直径2mのサイロで行われた実験で400-670nCという放電電荷が観測されている⁹⁾ことから妥当であろう。これらの放電は堆積粉体表面で起こり着火の原因ともなるコーン放電¹⁾⁻⁴⁾に相当するであろう。

雷状放電¹⁾⁻⁵⁾の発生の可能性はいまだに解決されていない課題であるが、今回のシミュレーションではストリーマ放電モデルのルーチンを使用することがなかった。求めた放電領域はすべてヒープ表面近傍であり、

Table 2 List of values obtained from the simulation.
シミュレーション結果

Beginning time of discharge	85.951 s
Number of discharges	154312
Number of incendiary discharges (≥ 10 mJ)	55
Average potential over heap surface at steady state	460 kV
Average electric field over heap surface at steady state	26.8 kV/cm
Average charge discharged	0.47 nC
Maximum charge discharged	369 nC
Average discharge energy	0.135 mJ
Maximum discharge energy	68.7 mJ

堆積粉体の上方の空間に広がることはなかった。発生する多くの放電が雷状放電の発生を阻止していると考えられる。

得られた結果をTable 2 にまとめて示す。

4. 結論

放電と堆積粉体の電荷緩和モデルを考案し、これをシミュレーションに導入することによって、帯電粉体のサイロ充填のシミュレーションを改良した。今回の改良で、より現実的なシミュレーションが可能となり、現実的な評価にも応用できるようになった。結果は実験ともよく一致し、ヒープ表面で着火性放電が起きることが証明された。

今後の包括的なシミュレーションは静電気の危険性評価に重要な情報を与えるものであろう。

参考文献

- 1) Glor, M., J. Electrostat. 16, pp.175-91 (1988)
- 2) Glor, M., Electrostatic Hazards in Powder Handling, John Wiley & Sons, New York (1988)
- 3) Jones, T.B. and King, J.L., Powder Handling and Electrostatics: Understanding and Preventing Hazards, Lewis Publishers, Michigan (1991)

- 4) Lütgens, G. and Wilson, N., Electrostatic hazards, Butterworth Heinemann, Oxford (1997)
- 5) Boschung, P., Hilgner, W., Lüttgens, G., Maurer, B. and Widmer, A., J. Electrostat. 3, pp.303-10 (1977)
- 6) Maurer, B., Glor, M., Lütgens, G. and Post, L., J. Electrostat. 23, pp.25-34 (1989)
- 7) Glor, M., Lütgens, G., Maurer, B. and Post, L., J. Electrostat. 23, pp.35-43 (1989)
- 8) Glor, M., J. Electrostat. 15, 223-15 (1984)
- 9) Glor, M. and Schwenzfeuer, K., J. Electrostat., 40 & 41, pp.511-6 (1997)
- 10) Kodama, T., Suzuki, T., Mogami, T. and Watano, S., Proceedings World Congress on Particle Technology 4, pp.326 (2002)
- 11) Kodama, T., Suzuki, T., Mogami, T. and Watano, S., Powder Tech. 135-136, pp.209-15 (2003)
- 12) Ohsawa, A., J. Electrostat., 43, pp.187-201 (1998) 187.
- 13) Ohsawa, A., J. Electrostat., 46, pp.153-61 (1999)
- 14) Ohsawa, A., Proceedings World Congress on Particle Technology 4, 329 (2002)
- 15) Ohsawa, A., Powder Tech. pp.135-136, pp.216-22 (2003)
- 16) Hockney, R.W. and Eastwood, J.W., Computer Simulation Using Particles, McGraw-Hill, New York (1981)
- 17) Birdsall, C.K. and Langdon, A.B., Plasma Physics via Computer Simulation, McGraw-Hill, New York (1985)
- 18) Raizer, Y.P., Gas Discharge Physics, Springer-Verlag, Berlin, (1991)
- 19) Ohsawa, A., Morrow, R. and Murphy, A. B., J. Phys. D:Appl. Phys., 33, pp.1487-92 (2001)
- 20) Boschung, P. and Glor, M., J. Electrostat., 8, pp.205-19 (1980)

(平成15年12月26日受理)