

論 文

超音波霧化を利用した制御された電荷を持つ
固体微細粒子の生成

平川 弘幸*, 村田 雄司*

(1997年7月28日受理)

Generation of Ultra-Fine Solid Particles with Controlled Electrostatic
Charge Using Ultrasonic Atomization Technique

Hiroyuki HIRAKAWA* and Yuji MURATA*

(Received July 28, 1997)

In order to generate charge-controlled and size-controlled ultra-fine solid particles, we made a new system composed of an ultrasonic atomization system and a drying system. Atomized droplets were generated from liquid ink using an ultrasonic transducer, and were charged by a corona discharger. Charged droplets obtained from this process were dried up using a microwave oven and they became ultra-fine solid particles. The mode diameter of ultra-fine solid particles could be controlled to the extent between 0.27 and 0.97 μm by adjusting the concentration of the liquid ink. The charge to mass ratio of ultra-fine solid particles ranged from +1,900 to -2,000 $\mu\text{C/g}$. Using these ultra-fine solid particles generated by this system, very fine latent electrostatic image was faithfully developed.

1. はじめに

固体表面に分布した目に見えない静電荷を、帯電した微細粒子を用いて可視像に変える手段は、様々な応用範囲で利用されている。

絶縁板上に形成された放電路を、粉体を用いて可視化したりヒテンベルグ像などは古くから知られた例であり、帯電電荷および放電進展の観測に利用されてきた。電荷を可視像とする手段は、接触・摩擦などで帯電した絶縁体表面やエレクトレット表面などに存在する静電荷の解析に利用可能であり、また強誘電体のドメイン構造を明らかにするのに応用可能である。

この手段を利用した最も一般的な機器が、コピー機に代表される電子写真システムである。カールソンプロセスを利用したほとんどの電子写真システムは、静電潜像を可視化するのにトナーと呼ばれる帯電した固体粒子を利用して、現在主流の乾式現象法に用いられるトナー粒子の平均粒径は7~12 μm 、平均比電荷量は正または負の数十 $\mu\text{C/g}$ である。

このトナーの実現する解像度は通常のシステムで1 mm 当り10本、高精細のもので20~40本であり¹⁾、画像を構成するトナー粒子の微細化が、線幅およびエッジの画質を向上させるための重大な要因となっている。しかしながら微細化は粒径5 μm 程度²⁾に留まり、さらに細かいトナーを作ることは粒子同士の凝集・付着を招き、高画質に向けた十分な性能を発揮できなくなる。

キャリアや金属ブレードなどとの接触・摩擦によるトナーの帯電特性は、トナー材料の選定や帯電制御剤の使用により制御されている。しかし帯電のメカニズムが明確にされていないため材料の選択に試行錯誤の部分が多く、多大な労力が必要とされている。このような状況から、素材固有の特性に左右されない、しかも容易な粒子の電荷量制御法が求められている。

本研究は帯電液滴発生装置と乾燥装置からなるシステムを用いた、制御された電荷量を持つ微細な固体粒子を発生させる装置に関するものであり、電子写真用のトナーとして利用した結果を最後に示す。このシステムでは、固形物の溶解した液体から超音波霧化³⁾を利用して生成した液滴が、コロナ放電を用いた電界荷電による帯電プロセスと、マイクロウェーブの照射による乾燥プロセスとを経て、電荷を持った微細な固体粒子となる。

本方式では、電荷量の制御および固体粒子の製造過程のすべてを空間で行うため、粒子の微細化による粒子同士の

キーワード：超音波霧化、液滴径、微粒子の帯電、帯電液滴の乾燥、トナー

* 東京理科大学理工学部電気工学科 (278 野田市山崎 2641)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Science University of Tokyo, 2641, Yamazaki, Noda 278, Japan

凝集がきわめて発生しにくくなっている。また、得られた微細な固体粒子の帯電量は物質固有の特性によらず、容易に制御可能であることも特徴の一つである。

2. 実験装置

2.1 制御された電荷量を持った固体粒子発生システム

本実験装置は、液滴生成部と液滴帯電部からなる帯電液滴発生装置、そして帯電液滴にマイクロウェーブを照射する乾燥装置とで構成されている。

固形物を溶解した液体は超音波霧化現象を利用した液滴生成部で微細な液滴となる。帯電部へ搬送された液滴は、コロナ放電で発生したイオンにより帯電し、乾燥装置に送られる。そこで帯電液滴は水分を失い、電荷を持った微細な固体粒子となる。

2.2 帯電液滴発生装置

帯電液滴発生装置の断面を図1に示す。装置の液滴生成部には超音波振動子が用いられている。この振動子は加湿器などに用いられている市販のPCM圧電セラミック素子(松下電子部品製, EFEHEV-1R7M52)であり、液体試料の入るカップの底部に固定されている。素子の直径は30 mm, 共振周波数は1.63 MHz, 静電容量は2,350 pFである。

生成した液滴は、超音波振動子の音圧によって発生する水柱の上昇を抑制する目的で設置されたステンレスメッシュ下面と、液体試料表面との間の空間に漂うこととなる。この液滴は装置底部から流量を制御した搬送空気を流入させることでメッシュを通過し、液滴帯電部へ上昇する。

帯電液滴発生装置の液滴帯電部では、針電極に直流高電

圧を加えてコロナ放電を起こし、発生したイオンと液滴とを衝突させることで液滴は帯電する。

帯電した液滴は装置側面の開口部から排出され、乾燥装置に搬送される。帯電液滴発生装置と次の乾燥装置との間はビニールパイプで繋がれ、帯電液滴はその中を通り乾燥装置へ移動する。すべての実験は断りのない限り、2.0 L/minの搬送空気流量で行った。

2.3 乾燥装置

乾燥装置には電子レンジに使われているマイクロウェーブ発生装置を利用した。液滴を乾燥させるには電気炉を用いる方法もあるが、前者の方法ではヒートアップの待ち時間がなく、必要なときのみ電力を供給すれば良いことや、装置の廃熱処理を簡略化できることなどメリットが大きい。マグネトロンが発信周波数は2,450 MHz, 定格高周波出力は500 Wである。

マイクロウェーブは直径230 mmの球状庫内に照射される。庫内には直径6 mm, 全長500 mmのポリエチレンパイプが通され、このパイプ内部を帯電液滴が通過する。液滴の水分はこのパイプ内部で蒸発し、固体粒子となる。

3. 測定方法

3.1 液滴の粒径

液滴の粒径は、光学顕微鏡を用いて測定された。液滴は、帯電液滴発生装置から内径8.0 mmのビニールパイプの中を900 mm搬送された先で排出され、シリコンオイルを塗布したガラス板表面に付着する。ガラス板表面に達した液滴の粒径は、付着した瞬間から0.1 s以内に測定された。この測定のために、光学顕微鏡に取り付けたCCDカメラの出力をVTRで録画し、そのVTR画像をコンピュータで処理した。ガラス板表面に到達直後に測定した理由は、液滴粒子の乾燥による縮小および、後続粒子の衝突による液滴の成長の影響を排除するためである。

また乾燥して固体となった微細な粒子は、一度アルミ板表面に堆積させられる。この堆積した粒子の粒子像は電子顕微鏡を用いて写真に撮影され、粒径の測定に用いられた。粒径は、写真画像をコンピュータに取り込んだ後、液滴と同様な方法で測定された。

3.2 液滴の電荷量分布と比電荷量

液滴の電荷量分布は、直流平等電界中での帯電粒子が並進運動⁴⁾するときの移動速度から求められた。電界を形成する間隔10 mmの平行平板電極間に帯電液滴を導入すると、帯電液滴は電界方向に沿ったクーロン力と空気の粘性抵抗力との釣り合いにより電界方向に等速運動する。この運動が重力の影響を受けない状態にあるときの粒子の速度 V [m/s] は次式で表される。

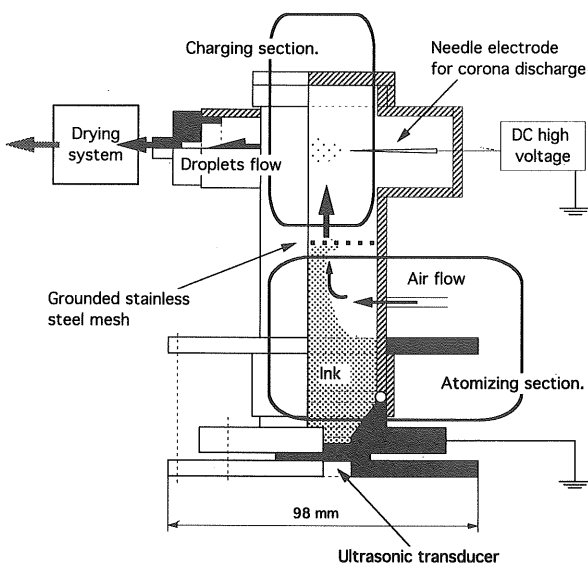


図1 帯電液滴発生装置

Fig. 1 Generating system for charged and atomized droplets.

$$V = \frac{qE}{6\pi\eta r} \quad (1)$$

ここで、 η [Pa·s] は媒質の粘性係数、 r [m] は粒子半径、 q [C] は液滴電荷量、 E [V/m] は液滴位置での電界である。シャッター速度 0.0165 s の CCD カメラで撮影した電界中を移動する帯電液滴の飛翔軌跡から、電界方向の移動距離 l [m] を求め液滴の終端速度を求めると、式 (1) から液滴の電荷量 q は、次式で表すことができる。

$$q = \frac{6\pi\eta r l}{0.0165 E} \quad (2)$$

コロナ放電を利用した帯電液滴発生装置内の液滴の電荷量は、針電極へ印加する電圧の上昇と共に増加する。式 (1) から導かれる電荷量を保持した帯電液滴の電界方向の移動速度は、電荷量の増加に比例して増加する。それゆえ、電荷量の大きな液滴は電気力線に沿って帯電部内壁や対向電極に付着しやすくなり、装置外部へ搬送される液滴量の極端な減少を招く。したがって電荷量の大きな帯電液滴を液滴帯電部の外まで搬送するには、搬送空気流の搬送速度を上昇させなくてはならない。

粒子の帯電特性を得るために $-9.0 \sim +9.0$ kV, 1 kV 間隔で放電電極へ電圧を印加し実験を行った。印加電圧が ± 4.0 kV を超える辺りから、電荷量の増加した帯電液滴が装置内壁へ付着する現象が顕著となり、搬送空気流の搬送速度を上昇させなくてはならなくなった。しかしながら、電界中での帯電液滴の速度を決定する搬送流量が前述した 2.0 L/min を超えると、帯電液滴の移動軌跡を撮影する CCD カメラは、その軌跡を明瞭に捕らえることができなくなった。この一粒子ごとの電荷量が測定不可能な条件では、吸引式ファラデーケージを用いて電荷量を平均比電荷量として求めた。ファラデーケージの静電容量は 1,200 pF, 吸引時間は 30 s 一定である。

3.3 試料液体

実験に使用したインクは、無機系顔料を用いた黒色の顔料インク (ホルベイン社: BLACK I354) である。帯電液滴発生装置に注入する試料液体は、このインクを純水で希釈したものである。試料液体に占めるインクの比率をインク濃度と呼ぶこととし、1~20%の範囲でインク濃度を変化させた試料液体が、実験に用いられた。この無機系顔料の顔料成分は、水や他の媒質に対する溶解性がない物質であり、インクを乾燥させると、カーボンブラックの他にメタクリル酸メチルとアクリル酸ブチルの共重合体が主に残留する。この固形物質の比重は 1.397 g/ml であった。

本実験では液体中に溶解性のない固体物質を含有する顔料インクに加え、液体に完全に溶解している染料インク (CI 42040) についても同様の実験を行ったが、顔料イン

クとの結果と特に違いが見られなかったため、その結果は割愛した。

粒径および電荷量分布を得るために測定した粒子数は、各測定ごとに 350~450 個であった。なお、超音波霧化現象で得られた液滴粒径の代表値は、最頻出粒径を示すモード径⁵⁾とした。

4. 結果

4.1 液滴および固体微細粒子の粒径

図 2 は試料液体のインク濃度に対する比重および表面張力の関係を示すものである。インク濃度を 1~20% まで変化させたとき、比重は 1.027~1.034 g/cm³ の間で増加し、表面張力は 51.5~38.8 dyn/cm の範囲で直線的に減少した。

図 3 は針電極へ電圧を印加しない場合と、印加電圧の値が放電開始電圧以上である -5.0 kV, -9.0 kV を印加した場合の液滴径分布である。試料液体はインク濃度 10% のものを使用した。ここで得られた液滴径の分布および最頻出

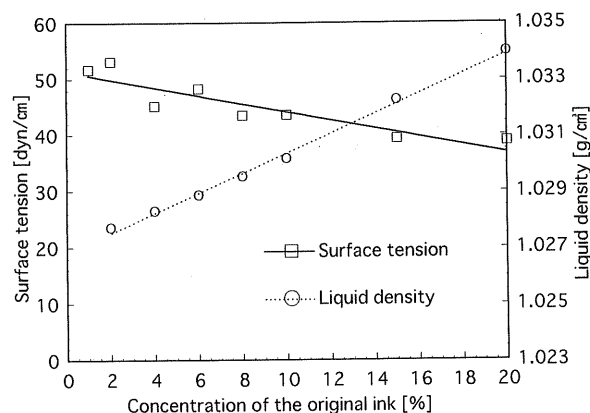


図 2 インク原液の各希釈割合に対する表面張力と比重の関係

Fig. 2 Surface tension and liquid density for various concentration of the original ink.

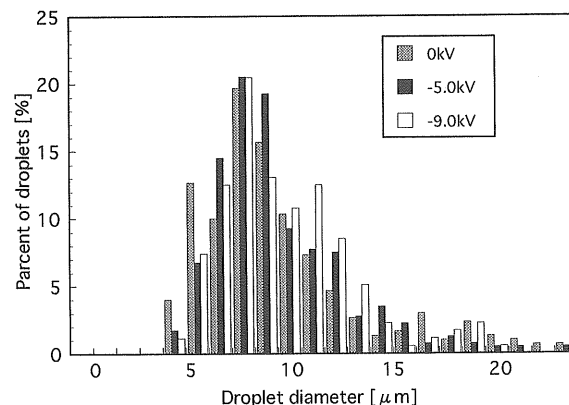


図 3 針電極への印加電圧を 0, -5.0 , -9.0 kV としたときの液滴の粒径分布

Fig. 3 Diameter distribution of atomized droplets for 0, -5.0 , -9.0 kV application to needle electrode.

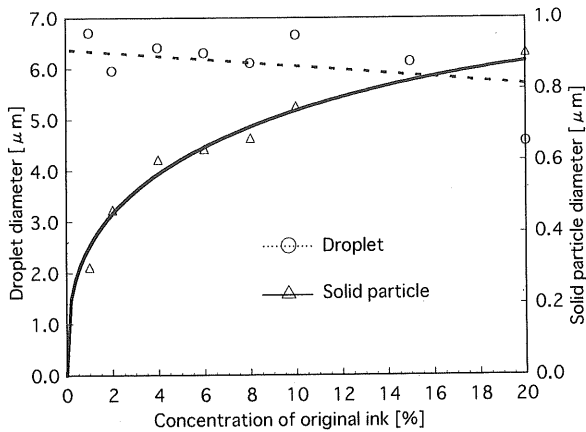


図 4 希釈割合に対する最頻出液滴粒径と微細固体粒子の関係

Fig. 4 The most frequently occurring droplet diameters and solid particle diameters for various concentration of original ink.

粒径は、市販の加湿器を利用した霧化ユニットを用いた小川の実験結果⁶⁾ときわめて良く一致するものであった。コロナ放電を開始し液滴を帯電させたときの粒径分布は、電圧を印加しなかったときと比べてほとんど変化が見られなかった。

図 4 は、インク濃度を 1~20% の範囲で変化させたときの液滴径と、これを乾燥して得られた固体微細粒子の最頻出粒径を示す。液滴径はインク濃度の増加に伴い小さくなっていく。これはインク成分の増加による、試料液体の表面張力の低下と比重の増加から生じた結果である。また固体微細粒子の粒径は、インク濃度の小さな範囲で変化する割合が大きく、インク濃度の増加に従いその変化は緩慢になっていった。この結果から本実験で用いたインクでは、試料液体に占めるインクの比率を 1~20% の範囲で変えることにより、固体微細粒子の大きさを 0.27~0.97 μm の範囲で任意に制御できることがわかった。

4.2 液滴の電荷量

針電極へ電圧を印加せず、液滴に対して電界荷電を行わなかったときの霧化液滴の電荷量分布を図 5 に示す。試料液体はインク濃度 10% のものを使用した。液滴の電荷量は 0 C を中心に左右両極にほぼ等しく分布し、 $\pm 40 \times 10^{-18}$ C の範囲に電荷量分布の 91% が分布した。

電界荷電による帯電が始まる -3.0 kV の電圧を針電極へ印加したときの液滴の電荷量分布を図 6 に示す。分布全体が針電極と同じ負極性へ偏り、帯電量の最頻出値が 187.5×10^{-18} C と放電による電界荷電がなかった場合に比べて一桁大きな電荷量となった。

針電極に ± 9.0 kV の範囲で電圧を加えたときの液滴の帯電特性を図 7 に示す。この図は針電極へ加える印加電圧に対する液滴の比電荷量として示している。放電開始後、

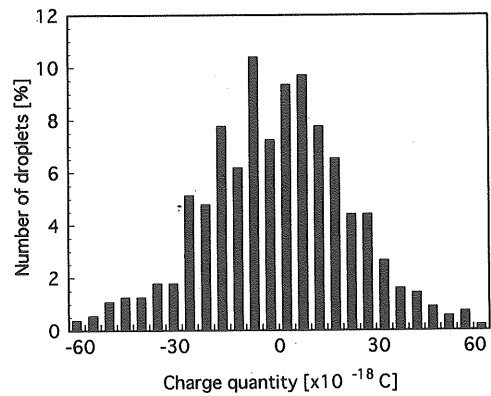


図 5 針電極へ電圧を印加しなかったときの霧化液滴の電荷量分布

Fig. 5 Charge distribution of atomized droplets in the case of 0 kV application.

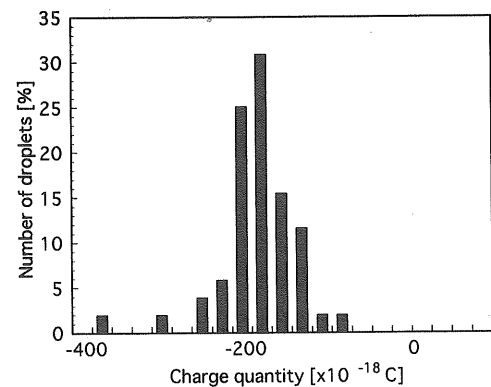


図 6 針電極へ -3.0 kV 印加したときの霧化液滴の電荷量分布

Fig. 6 Charge distribution of atomized droplets in the case of -3.0 kV application.

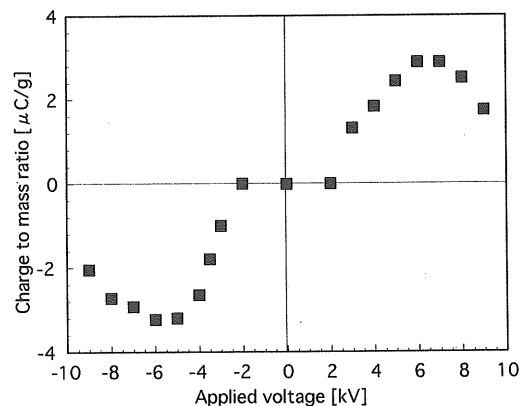


図 7 針電極へ加える印加電圧に対する液滴の比電荷量

Fig. 7 Charge to mass ratio of a droplet versus applied voltage to needle electrode.

印加電圧の上昇に伴い液滴の比電荷量の増加が予測されるが、 ± 5.0 kV の印加電圧付近から比電荷量の増加する割合は減少し、 ± 6.0 kV 印加時の結果をピークにして、液

滴の電荷量は減少していった。

これは、次のような現象が原因となって生じると考えられる。針電極への印加電圧が高くなるにつれて、電荷量の大きな液滴に働くクーロン力は大きくなる。このような帯電液滴は、搬送流で帯電部を離れるよりも早く、アース電極あるいは容器の内壁に付着する。このため比較的電荷量の小さな液滴だけが帯電液滴発生装置から排出され、図7に見られるような比電荷量の頭打ちが起こるのである。

印加電圧の増加が液滴の電荷量の増加に比例しないという現象は、Lawの行ったジェットノズルを用いた液滴の誘導帯電の実験⁷⁾でも説明されている。

5. 考察

5.1 液滴および微細固体粒子の粒径

超音波霧化現象で得られた液滴の粒径 D_w [cm] は振動する液体表面のキャピラリー波の波長 λ [cm] との間に次のような関係が成り立つ⁹⁾。

$$D_w = a\lambda \quad (3)$$

$$\lambda = \left(\frac{8\pi T}{\rho f^2} \right)^{1/3} \quad (4)$$

ここで、 a は比例定数、 f [Hz] は振動子の励振周波数、 ρ [g/cm³] は試料液体の比重、 T [dyn/cm] は試料液体の表面張力である。式(3)の D_w/λ は液滴のモード径およびメジアン径どちらに対しても、励振周波数や液体の特性によらずほぼ一定の値を取ることが実験で示されている⁹⁾。Langによればこの値は $a=0.34$ であった¹⁰⁾。また、単位時間当りの霧化量の増加が、発生した液滴の衝突や凝集などを原因とする粒子の成長を招くことも述べている。Mochidaは液滴径と霧化量との関係から実験式を求めており、比例定数 a が霧化量に依存することを述べている¹¹⁾。

図4に示した最頻出液滴径の測定結果は、 $a=0.83$ としたときの(3)式の描く実線カーブときわめて良く一致した。これは霧化によって得られた液滴の大きさが、試料液体表面に発生するキャピラリー波の波長の0.83倍になるといふことである。

次に、液滴を乾燥して得られる微細固体粒子の粒径 D_s [cm] は、液滴の含有する固形成分の量から予測可能であり、(3)式で定義した液滴径 D_w との間に次式の関係が成り立つ。

$$D_s = D_w \left(\frac{\rho_w k}{\rho_s} 2.49 \times 10^{-4} \right)^{1/3} \quad (5)$$

ρ_w [g/cm³] は試料液体の比重、 $\rho_s=1.397$ [g/cm³] は乾燥後に残った物質(固形物)の比重である。 k [%] はインク濃度である。

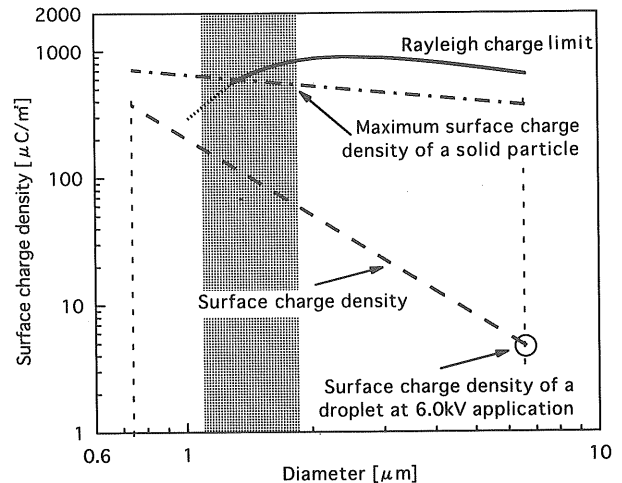


図8 液滴の表面電荷密度とレイリー限界、および球形粒子の保持できる最大表面電荷密度と粒径との関係

Fig. 8 Maximum surface charge density calculated by Rayleigh charge limit, by Schumann's equation and that obtained in this experiment for 6.0 kV application versus particle diameter.

図4の実線が式(5)を表している。この結果から、乾燥後に得られる微細固体粒子の大きさは、蒸発により固形物として残留する物質の割合から予測可能であり、理論的に求めることができる。

5.2 液滴および固体粒子が保持できる最大電荷量

図8は希釈割合10%の試料液体を用いたときに得られた直径 $6.64 \mu\text{m}$ の液滴に、本システムで得られた電荷量の最大値 $6.1 \times 10^{-16} \text{ C}$ を与えたときの、粒径に対する表面電荷密度を示している。直径 $6.64 \mu\text{m}$ の液滴が乾燥し最終的に直径 $0.75 \mu\text{m}$ の固体微細粒子となる間に、表面電荷密度は破線のように上昇していく。液滴の表面電荷密度があまりに高くなると、表面電荷の反発力は表面張力に打ち勝ち、わずかな擾乱によって液滴を分裂させてしまう。この限界を与える電荷量 q [C] はレイリー限界 (Rayleigh charge limit)¹²⁾ として次式で示される。

$$q = 8\pi \sqrt{\epsilon_0 \Gamma} r^3 \quad (6)$$

ここで、 r [m] は液滴の半径、 Γ [N/m] は液滴の表面張力、 ϵ_0 は真空の誘電率である。

直径 $6.64 \mu\text{m}$ の液滴は、乾燥してその直径が $1.3 \mu\text{m}$ となったときにインク濃度100%となる。同図斜線部に該当する液滴径の範囲では、粒径の縮小に伴いレイリー限界が図8の実線のように減少する。この減少は試料液体の表面張力の低下に起因するものである。粒径が $1.3 \mu\text{m}$ 以下で破線となっているのは、試料液体がインク原液以上に濃くなった場合の表面張力を測定できなかったためである。外挿した破線は直径 $0.9 \mu\text{m}$ 付近でレイリー限界と交差し、液滴の分裂が起こりうることを示す。しかしながら乾燥の

進んだ液滴はもはや純粋に液体ではなく、直径 $0.9 \mu\text{m}$ という値は最終的に達する大きさと比較しても固体として扱った方が現実的である。半径 $r[\text{m}]$ の固体球形粒子が大気中で安定に保持できる最大表面電荷密度 $\sigma_{\text{max}}[\text{C}/\text{m}^2]$ は、Schumann の式 (7) を用いて表される¹³⁾。

$$\sigma_{\text{max}} = (100r)^{-0.3} \frac{10}{3} \times 10^{-5} \quad (7)$$

この式の与える最大表面電荷密度は、図 8 中に一点鎖線で示してある。実験で得られた粒子の表面電荷密度は、Schumann の与えた最大値を超えない値であることがわかる。つまり今回実験した粒径と電荷量の範囲内では、液滴の状態で得た電荷量は乾燥過程で失われることなく、固体粒子上にすべて残ると考えられる。± $40 \times 10^{-18} \text{C}$ の範囲内にある電荷量を持った液滴粒子の場合、乾燥前後でその電荷量に変化のないことが実験的に確かめられている¹⁴⁾。

5.3 電界荷電による帯電

コロナ放電を用いた場合の電荷量は、Pauthenier の式¹⁵⁾を用いて計算することができる。これはイオンが電気力線に沿って球形粒子と衝突する機構から導かれた理論式であり、粒子の飽和電荷量 $q_{\text{max}}[\text{C}]$ は粒子が導体であることから、次式で与えられる。

$$q_{\text{max}} = 12\pi\epsilon_0 r^2 E \quad (8)$$

ここで $r[\text{m}]$ は粒子半径、 $E[\text{V}/\text{m}]$ は帯電する位置の電界強度である。

図 9 は、針電極へ 3 kV の電圧を印加したときの空間電界を解析した結果である。実験に用いた先端の曲率半径が

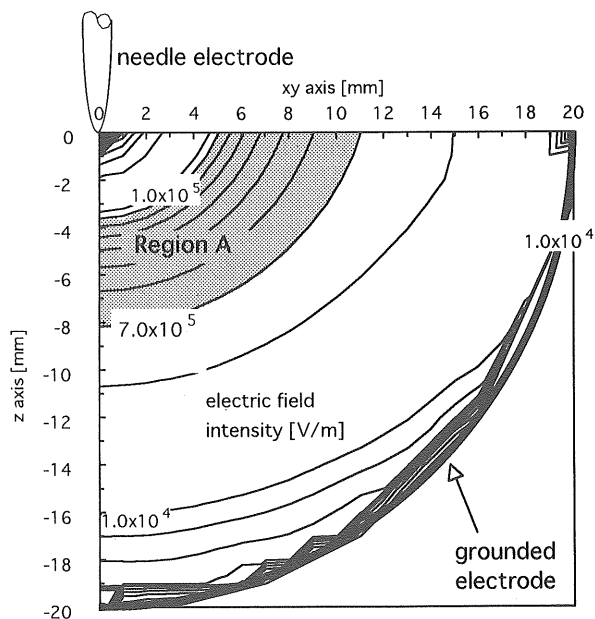


図 9 針電極へ 3 kV 印加したときの、帯電部の空間電界

Fig. 9 Electric field intensity in the case of 3 kV application.

$36 \mu\text{m}$ の針電極に対し、針先端を囲む半径 20 mm の半球殻のアース電極を仮定し、そのときの空間電界を示した。

空間を格子状に分割し、各点の電界強度から式 (8) を用いて飽和電荷量を求める。この電荷量を図 8 に示した電荷量分布と比較すると、実験で得られた帯電液滴の分布は領域 A の位置で飽和電荷量に達した液滴の電荷量に一致する。また、コロナ放電により生成されるイオンは空間に広がる液滴群に捕まり、領域 A の外側の領域にまで達していないことがわかる。

5.4 電子写真用トナーとしての評価

本実験で得られた微細固体粒子の比電荷量は、直径 $0.6 \mu\text{m}$ の固体粒子の比電荷量として換算すると +1,900 ~ -2,000 $\mu\text{C}/\text{g}$ の範囲で制御可能であり、この範囲で任意の比電荷量の微細固体粒子を得ることができる。乾式トナーの比電荷量が数十 $\mu\text{C}/\text{g}$ であることから、非常に大きな比電荷量の範囲で制御可能であることがわかる。静電潜像の可視化という点から見た場合、潜像へ付着するトナー粒子の数は潜像の表面電位が等しいとき、トナーの比電荷量が大きいほど減少し、現像画像の光学濃度の低下を招く。またトナーの比電荷量が小さいと、潜像との間に発生するクーロン力に十分な大きさが期待できなくなるため、同様に現像画像の光学濃度の低下を招く。

比電荷量の理想的な値は現像方法および装置との兼ね合いで判断しなければならない条件であるが、本装置の比電荷量の制御可能範囲がきわめて広いという結果は、現像装置に柔軟に対応できる固体トナーを生成する装置として、本装置の有益性を示すものである。

本実験で得られた微細固体粒子を静電潜像の現像に用いた結果が図 10 である。これは厚さ $30 \mu\text{m}$ のポリエチレン

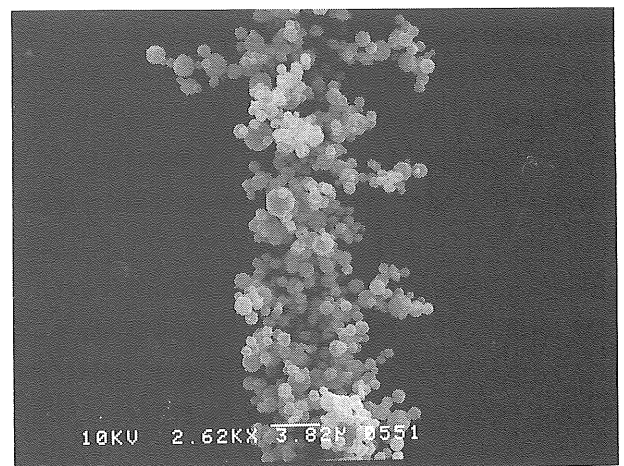


図 10 微細固体粒子を用いて得られた現像画像の SEM 写真

Fig. 10 SEM photograph of developed image obtained using ultra-fine solid particles.

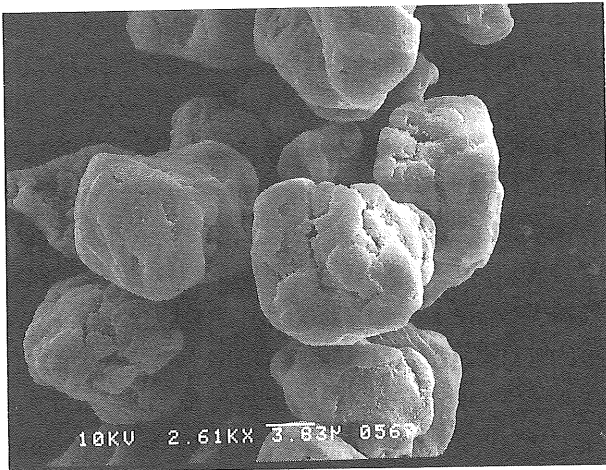


図 11 一般的な電子写真用トナーを用いて得られた現像画像の SEM 写真

Fig. 11 SEM photograph of developed image obtained using general toner for electrophotography.

テレフタレートフィルム上に形成した、幅約 $10\ \mu\text{m}$ の直線を成す静電潜像を約 $1.6 \times 10^{-16}\ \text{C}$ の電荷量を持つ微細固体粒子を用いて可視化した結果である。図 11 は同じ静電潜像を、市場に出回っている一般的なトナーを用いて可視化した結果である。本実験で得られた制御した帯電量を持つ微細固体粒子が、解像度の向上にいかにも有用かが伺える。

6. 結 論

超音波霧化を利用して得られた霧化液滴に電荷を与え、その帯電液滴の水分を蒸発させ固体とすることで、任意に制御可能な電荷量と粒子径を持つ、きわめて微細な固体粒子を得ることができた。

固体微細粒子の表面電荷密度が Schumann の式の満たす表面電荷密度の限界以下であれば、液滴に与える電荷量を制御することで、最終的に得られる固体微細粒子の電荷量を制御することができる。

本実験の帯電液滴発生装置および乾燥装置とで得られたきわめて微細な固体粒子は、生成プロセスを空間で行うため、凝集の影響もなく静電潜像の現像に利用可能であった。

超音波霧化現象を利用して得られる液滴の大きさは、試料液体表面に発生するキャピラリー波の波長の 0.83 倍となった。この液滴に含まれる固形物の量を制御することで、直径 $0.27\sim 0.9\ \mu\text{m}$ の範囲で任意の大きさの微細固体粒子が得られた。

コロナ放電による微細固体粒子の比電荷量は、直径 $0.6\ \mu\text{m}$ の粒子の場合 $+1,900\sim -2,000\ \mu\text{C/g}$ の範囲で制御可能であった。

参考文献

- 1) 山岡亜夫：電子写真学会誌, **35** (1996) 209
- 2) 木村正利：静電気学会・電子写真学会ジョイントシンポジウム論文集, p. 6 (1995)
- 3) H.S. Fogler and K.D. Timmerhaus: *J. Acoust. Soc. Am.*, **39** (1966) 515
- 4) 増田閃一：静電気ハンドブック, p. 268, 静電気学会編, オーム社 (1981)
- 5) 今木清康：粉体工学演習, p. 14, コロナ社 (1987)
- 6) 小川豊彦：超音波工学, p. 265, 日本電子機械工業会編, コロナ社 (1993)
- 7) S.E. Law: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **19** (1983) 163
- 8) O.K. Ėknadiosyants: *Physical Principles of Ultrasonic Technology*, Volume 2, ed. L.D. Rosenberg, Part V, Chapter 2, p. 17, Plenum Press, New York (1973)
- 9) Yu. Ya. Boguslavskii and O.K. Ėknadiosyants: *Sov. Phys.-Acoust.*, **15** (1969) 16
- 10) R.J. Lang: *J. Acoust. Soc. Am.*, **34** (1962) 6
- 11) T. Mochida: *1st International Conference on Liquid Atomization and Spray System*, p. 193, Fuel Soc., Japan (1978)
- 12) L. Rayleigh: *Phil. Mag.*, **14** (1882) 184
- 13) W.R. Harper: *Contact and Frictional Electrification*, p. 15, Oxford Clarendon Press, London (1967)
- 14) H. Hirakawa and Y. Murata: *31st IEEE/IAS Conf. Rec.*, Vol. 4, p. 2026, San Diego (1996)
- 15) M.M. Pauthenier: *J. Phys. Radium*, **3** (1932) 590