

論 文

エアレスノズルから噴出する液滴の誘導帯電と 接地円板近傍での液滴のふるまい

東山禎夫*, 賈振武*, 浅野和俊*

(1995年4月24日受理)

Induction Charging of Droplets Ejected from an Airless Nozzle and
the Behavior of Charged Droplets Near a Grounded Disk Electrode

Yoshio HIGASHIYAMA,* JA Zang WU* and Kazutoshi ASANO*

(Received April 24, 1995)

The charging characteristics of water droplets were experimentally investigated by using a conventional airless nozzle equipped with an induction charging ring. The water droplets ejected from the nozzle at 2 g/s under a pressure of 2 MPa forms a hollow-cone and are charged in opposite polarity to the induction electrode. At the higher induction voltage, highly charged droplets is apt to be attracted to the induction electrode, thereby the droplets accumulating at the electrode form a sharp point and cause corona discharge. Thus the induction method has a critical limit to charge quantity acquired by the droplets. The maximum value of the charge-to-mass ratio of the droplets obtained was about 1.2 mC/kg near the nozzle. As the distance from the nozzle increased, the charge distribution in the shower becomes uniform because of an outward motion of the droplets due to electrostatic repulsion force. In order to confirm the motion of charged droplets, a grounded disc electrode supported with a stem was inserted at the different height and position in the shower. From the analysis of the deposit patterns and diameter distribution of droplets deposited onto the lower surface of the grounded disc, it reveals that relatively larger sized droplets ranging from 40 to 120 μm tend to deposit onto outer region of the under surface.

1. まえがき

工業生産における塗装と同様に農業生産においても高効率で省力型の農薬散布が求められている。農薬の目的は農作物を害する菌や昆虫の防除であるが、それらは葉の裏側に寄生しやすいので、通常の散布法でそれらを完全に除去するためには過剰に農薬を散布する必要がある。しかし、これらの過剰な農薬は大地や河川の汚染、近隣住民の生活環境の悪化の原因となっている。環境汚染防止の点からは過剰な農薬散布を早急に止める必要がある。

静電散布法はこの目的に適した散布法と考えられ、これまで、実験室内的基礎実験から実際の植物の葉や茎への付着効率を高めるための方法について検討してきた。

キーワード: 静電散布, エアレスノズル, 誘導帯電, 比電荷量, 回り込み

* 山形大学工学部電子情報工学科 (992 米沢市城南 4-3-16)
Department of Electrical & Information Engineering,
Faculty of Engineering, Yamagata University,
4-3-16, Jonan, Yonezawa, 992 Japan

その結果、作物への農薬は付着効率の点では十分満足のいく結果が得られている^{1,2)}。しかしながら、実用化のための装置の費用や取り扱いの点ではまだ問題が残されている。

回転カッブ型あるいはベル型の散布機を用いると、比電荷量が大きい液滴が得られる反面、高速で回転させるためのモータを備える必要があること、生成液滴の初速度が大きく、粒子の動きを制御しにくうことなどの問題がある。また、二流体ノズル装置は高い比電荷の液滴を得るのには適しているが³⁾、高速空気流の供給源が必要になり、装置が複雑になる欠点がある。

これらの方法に対し、エアレスノズルは汎用の農薬散布機で広く用いられており、液滴を帶電させるためには高圧電源を加えるだけでよい。この場合、ノズル自体を高電位にして液滴を帶電させる方法⁴⁾とノズル近傍に比較的低い電圧の誘導電極を設置して液滴を誘導帯電させる2つの方法がある。前者の方法はノズルと接地植物との間の全体的な空間で形成される強い電界により、帶電液滴の動きを制御することができ、散布ロボットなどに

適用できる。しかし、水道水で農薬を希釈する通常の場合には導電率が高いのでノズルと農薬液のタンクが同電位になるために、これらをすべて接地電位から絶縁する必要がある。作業者の安全や装置の価格などを考慮すると、ノズル近傍に比較的低い電圧を印加した誘導帶電電極を使用する後者の誘導帶電法の方が望ましい。

大きさが $100 \mu\text{m}$ 以下の液滴を生成するようなエアレスノズルでは、他の液滴生成方法に比べて噴出する液滴の速度は小さい。結果として、液滴の運動は主に、液滴群の電荷により形成された空間電荷の電界によって支配されることになる。エアレスノズル近傍に誘導帶電電極を設ける方法では、帶電電極への印加電圧が低いので、ノズルから離れた領域での電極電位による電界は弱く、そこで液滴の運動には電極電位は大きな影響を与えない。しかし、ノズルから噴出する液滴は原理的に荷電電圧と逆極性に帶電するので、誘導電極に付着しやすく、接地電位のノズルとの間の絶縁低下をもたらすことになる。また、電極に付着した液滴が蓄積して大きな水滴を形成するようになると、電界により水滴形状が尖り、水滴先端でコロナ放電が起きるようになる。コロナ放電の発生は生成した水滴の電荷を中和することになるので、結果として、液滴の荷電が効率よく行われなくなる問題点を有している。

本研究の目的は、帶電液滴を静電農薬散布に利用することを念頭におき、数 kV の低い電圧を印加した誘導帶電電極をエアレスノズル先端部に設置するだけの簡易な方法で帶電液滴を生成し、得られた液滴の特性を明らかにすることにある。本論文では、エアレスノズルから噴出する液滴の大きさ、および比電荷量の液滴シャワー内における分布を調べ、誘導帶電により生成できた液滴の特性を明らかにする。また、接地電位の植物の葉の裏側に液滴が付着する状況を明らかにするために、植物の葉を模擬した接地円板電極裏面に液滴が付着する状態および、裏面に付着する液滴の粒径分布を調べることにより、裏面にまで効率よく付着させるための液滴の特性を検討した。

2. 装 置・方 法

使用したノズルと誘導帶電電極の断面図を図 1 に示す。ノズルチップは口径 0.4 mm のセラミック製で、金属外筒に納められている。液滴の噴出角度は 90° であり、噴出形態は中空円錐状である。すなわち、ノズルから噴出した直後は頂角 90° の円錐状を呈しており、円錐の内部では液滴は少なく、周辺部では多い。液滴を帶電させるために、ノズル先端部には図 1 に示すように、PMMA 樹脂のパイプを利用して黄銅製の誘導帶電用リ

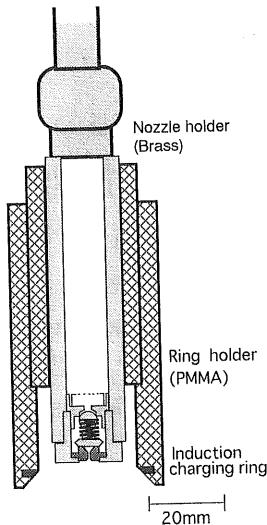


図 1 ノズルの構造と帯電電極

Fig. 1 Nozzle structure and an induction charging electrode.

ング電極を取り付けた。リング電極は内径 24 mm 、外径 30 mm であり、電極の長さ方向の厚さは 2 mm である。液滴の噴出角度 90° に合致するように、電極内側は 45° の角度をもたせている。

ノズルから水が噴出した直後は水膜を形成しており、数 mm で液滴に分裂する。この時点で個々の液滴は帶電する。液滴の帶電量は水膜先端の電界の強さに依存するので、帶電用のリング電極とノズル先端部との距離が液滴の持つ電荷量に影響を与えることになる。リング電極の位置を変えた予備試験から、液滴の帶電量が大きくなる位置を見いだし、 2 mm に設定した。この位置はノズルの分裂点距離に相当する。

図 2 は実験装置の概略図である。実験室内でノズルを下向きに固定し、農薬散布機用の電動ポンプを用いて試液を噴出させた。使用したポンプの圧力は 2 MPa 以内で調整可能であるが、流量および液滴径を一定にした条件下で検討を行うために、常に最大圧力の 2 MPa 一定に設定した。このときの噴出流量は 2 g/s である。試液は水道水であり、導電率は約 24 mS/m である。ただし、液滴径の測定を液浸法で行うために、着色剤青色一号で水道水を着色した。このときの導電率の変化は無視できる。シャワー内に置いた接地円板電極の裏面への液滴の付着状況を調べるときにも着色した水道水を使用した。

ノズルから噴出した液滴は 1 m 四方の液滴回収皿に入る。回収皿はエレクトロメータを介して接地されており、液滴が実際に運ぶ電流を監視した。また、ノズルにもエレクトロメータを直接接続して、液滴の誘導帶電に

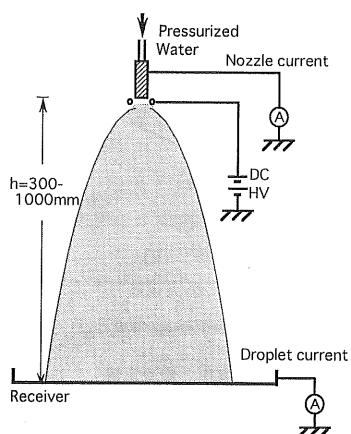


図 2 実験装置

Fig. 2 Experimental apparatus.

よる電流を測定した。

3. 帯電液滴の特性

3.1 液滴の粒径

ノズルを接地平板から 1 m の高さに設定し、帯電用リング電極に 1.5 kV の電圧を印加して生成された帯電液滴の噴出方向および半径方向の粒径分布を液浸法で調べた。粘度 $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (1,000 cSt) のシリコーン油を塗布した幅 50 mm, 長さ 300 mm の PMMA 樹脂板をノズル下方の所定の位置に配置しておき、液滴を 1 秒間だけ噴出させて、シリコーン油中に液滴を取り込んだ。液滴の拡がりはノズルから 1 m 下の液滴回収皿で直径約 50 cm であるので、この方法によりシャワーの中心から外側まで一度に取り込むことができる。液滴を受ける位置はノズルからの距離が 300, 500, および 1,000 mm

の水平面内である。ノズル中心から半径方向の各位置においてシリコーン油に取り込まれている個々の液滴の直径を顕微鏡で測定し、少なくとも 100 個の液滴についての平均を求めた。

図 3 にノズルからの距離を 300 mm に設定したときの半径方向の液滴径のヒストグラムを示す。液滴シャワーの中心から外側に向かって、粒径の大きい液滴が増えていることがわかる。このようなヒストグラムから平均粒径と標準偏差を算出したものを表 1 にまとめ、液滴シャワー内の液滴の平均粒径の分布を図 4 に示した。

ノズルに近い 300 mm の位置では、液滴シャワー中心の平均粒径は $37 \mu\text{m}$ であり、中心から半径方向に 150 mm 離れるとき約 2 倍の $70 \mu\text{m}$ となる。遠心力によって、比較的大きな粒子がシャワーの外側を飛ぶためであると類推できる。一方、ノズルから 500 mm 離れると、平均粒径は中心部から外側に向かって徐々に大きくなり、 $30 \mu\text{m}$ から $50 \mu\text{m}$ の範囲にある。回収皿に入る

表 1 帯電液滴の半径方向の平均粒径とばらつき

Table 1 Radial distribution of mean diameters and standard deviation of charged droplets.

| ノズル からの 距離 L (mm) | 平均粒径 (μm) | | | | |
|------------------------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 0 | 50 | 100 | 150 | 250 |
| 300 | 33.6 (7.7) | 46.0 (19.4) | 54.4 (20.9) | 66.6 (25.3) | — |
| 500 | 29.6 (14.7) | 33.0 (15.8) | 42.8 (26.9) | 49.0 (25.8) | 48.0 (23.7) |
| 1000 | 45 (23.4) | 39.4 (21.6) | 43.2 (21.8) | 41.0 (37.3) | 47.8 (23.8) |

() 内は標準偏差

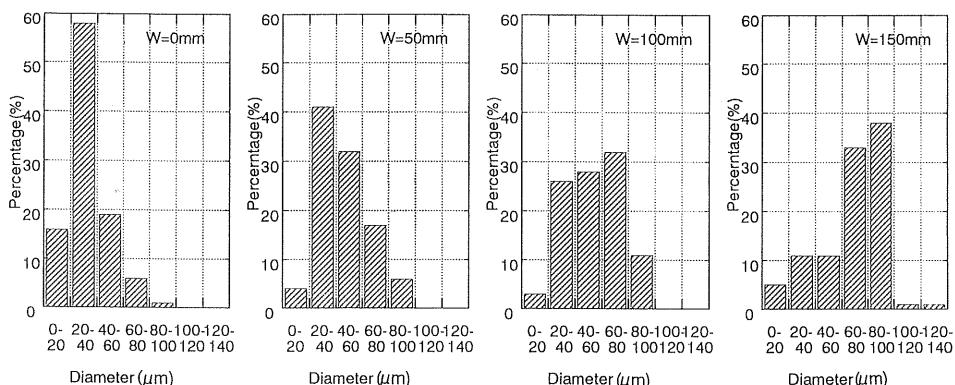


図 3 ノズルから 300 mm の位置における液滴粒径のヒストグラム

Fig. 3 Diameter distribution of charged droplets existing at the plane 300 mm apart from a nozzle.

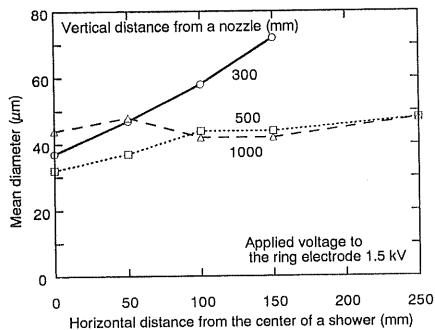


図 4 帯電液滴の粒度分布

Fig. 4 The radial distribution of diameters of charged droplets produced by the airless nozzle used.

直前の 1,000 mm の位置では半径方向の液滴径は 40~50 μm でほぼ一様な粒径分布となっている。平均粒径の半径方向の分布が一様になるのは、旋回する気流の中を噴出した液滴が落下する間に、粒径の異なる液滴が混ざり合うからである。なお、帯電電極に電圧を印加しない場合でも、粒径には大きな違いは見られなかった。

3.2 液滴電流

ノズルと液滴受け皿との間隔が異なるときの、受け皿で測定した電流の大きさを図 5 に示す。この電流は帶電液滴が運ぶ電流であるので、ここでは液滴電流と呼ぶ。液滴電流の大きさを 1 秒間当たりの液滴噴出量で除すると回収液滴全体の比電荷量となるので、液滴電流が液滴の荷電状態を表す指標となる。

液滴は誘導帶電により帶電するので、原理的にリング電極の印加電圧の大きさに比例して液滴の帶電量が増えるはずである。実際には、液滴電流は印加電圧を大きくするにしたがって増加するが、その増加の割合はノズルと受け皿間の距離が大きくなると小さくなり、また、ど

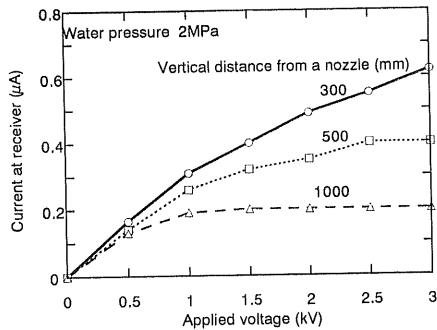
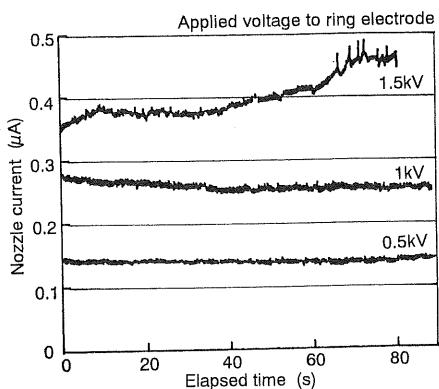


図 5 リング電極への印加電圧と液滴電流

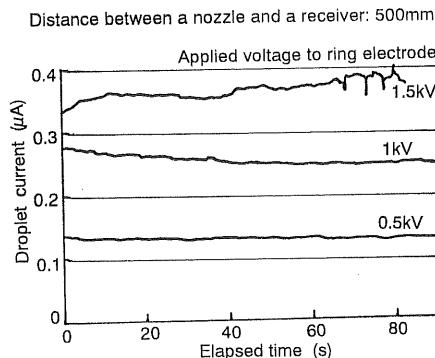
Fig. 5 Relation between applied voltage to a ring electrode and droplet current.

の位置でも飽和傾向がみえる。これには 2 つの原因が考えられる。1 つはリング電極に付着した液滴からのコロナ放電による中和で、他の 1 つは帶電した液滴のシャワーから外部への飛散である。

電圧の上昇に伴い、帶電した微小液滴がリング電極に付着し、付着した液滴が蓄積して大きくなると、リング電極と帶電液滴の作る電界により水滴が尖り、その先端でコロナ放電を起こすようになる。図 6 はノズルの高さを 500 mm にして液滴を噴出させたときのノズル電流と液滴電流の時間推移を X-t 記録計で描かせたものである。ノズル電極への印加電圧が 0.5 kV および 1 kV では、電流の大きさは、液滴噴出後ほぼ一定の値を推移し、両電流の値は等しい。これに対して、電圧を 1.5 kV にすると、ノズル電流は噴出後 60 秒を過ぎて、電流に急変化が現れるようになる。これはリング電極に付着して蓄積した液滴が大きくなり、先鋭化してコロナ放電を起こしているもので、波長域 350~920 nm の暗視カメラ(浜松ホトニクス、C 3100)によっても放電が起きていた。



(a) Current at a nozzle



(b) Current at a receiver

図 6 ノズルを流れる誘導電流と液滴電流の時間推移

Fig. 6 Time variation of induction current flowing through a nozzle and of droplet current.

ることを確かめている。1.5 kV 以上の電圧では液滴噴出後から放電が起きるまでの時間が早くなるので、以後の実験は最大 1.5 kV で行った。

図 5 ではノズルの高さを 1 m に設定すると 1.5 kV 以上では印加電圧が上昇しても液滴電流が増加しない。これが第 2 の理由によるもので、液滴が十分電荷を持っていて、高い電荷をもつ液滴は静電反発力によりシャワーの外に飛び出し、生成した帶電液滴の全てが受け皿に入らないためである。500 mm の高さのノズルでも、図 6 に示すように 1.5 kV 印加時には液滴電流がノズル電流よりも小さくなり、液滴がシャワーから飛び出していることが裏付けられる。

3.3 比電荷量

前項で示したように、ノズルから噴出した帶電液滴は落下途中でシャワーから飛散し、また、液滴径も一様ではないので、液滴の比電荷量はシャワー内の位置により異なる。ノズルの高さを 1,020 mm、帶電電圧を 1.5 kV に設定し、液滴を噴出している状態で吸引型ファラデーケージを用いてシャワーの任意の位置から吸引して、電荷量を測定し、回収質量で除することにより比電荷量を求めた。

液滴を回収する位置を、ノズルから 300, 500, および 1,000 mm の距離に設定したときの、同じ平面内における液滴の比電荷量の半径方向の分布を図 7 に示す。ノズルに近いほど、液滴の比電荷量は大きい。ノズルからの距離が 300 mm では、液滴は 0.8~1.2 mC/kg の比電荷量を有し、中心部から周辺部に向かうにつれてゆるやかに減少する傾向を示す。これに対して、距離 500 mm および 1,000 mm における液滴の比電荷量はそれぞれ 0.6~0.8 mC/kg および 0.4~0.5 mC/kg と半径方向で緩やかに大きくなるが、ほぼ一定の値を示す。帶電液滴は同極性の電荷を持つ空間電荷雲を形成しているので、静電反発力により広がる傾向を示す。

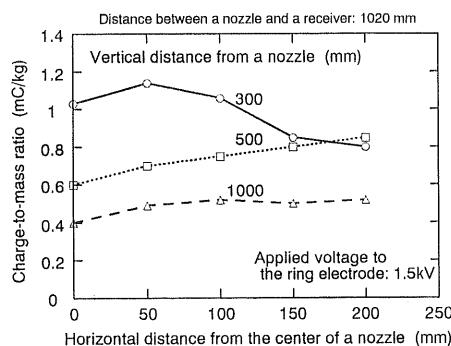


図 7 液滴の比電荷量

Fig. 7 Radial distribution of charge-to-mass ratio of droplets.

ノズルに数十 kV の高電圧を直接印加して、帶電液滴を生成する方式では、液滴の比電荷量が半径方向に対して急激に減少する特性を示した⁴⁾。これと対照的に、接地ノズル近傍に設けた誘導帶電電極を用いて液滴を帶電させた場合、液滴比電荷量は、シャワーの半径方向に対してほぼ一様であった。このように液滴の帶電方法、および形成される電界の違いによって形成される帶電液滴群の形態が異なることが判明した。

4. 帯電液滴の接地物体近傍のふるまい

4.1 接地物体裏面への回り込み

図 8 に示すように液滴シャワー内に、接地した円板電極を挿入して、帶電液滴が電極下面に回り込む状態と液滴の付着状態を調べた。円板電極は直径 100 mm、厚さ 2 mm のアルミニウム板で、直径 10 mm のアルミニウム棒で支持されている。

図 9 に円板電極近傍の帶電液滴の運動の一例を示す。ノズルから受け皿までの距離を 700 mm に保ち、高さ

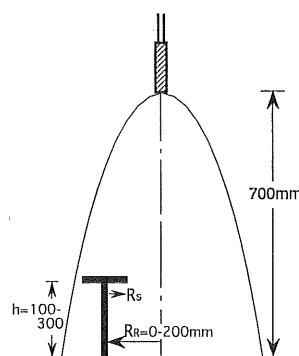


図 8 接地円板電極の配置

Fig. 8 Arrangement of a grounded disk electrode in a droplet shower.

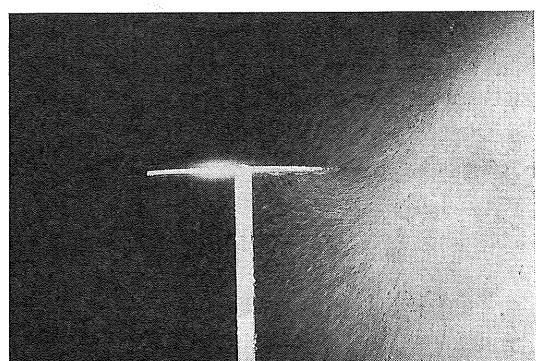


図 9 帯電液滴の円板電極近傍の運動

Fig. 9 Behavior of charged droplets near a grounded disk electrode.

300 mm の円板電極をシャワー中心から半径方向に 200 mm 離れた位置に置いたものである。この位置では帶電していない液滴は円板電極には到達しない。誘導リソング電極に印加する電圧を 1 kV にすると図のように液滴シャワーは拡がり、円板下側の面に回り込むようになる。また、液滴が静電反発力によりシャワーから飛び出して電極上面に向かう様子も示されている。

ノズルの高さを 700 mm、帶電電極電圧を 1.5 kV 一定に保ち、円板電極の位置をシャワー中心から 50 mm ごとに 200 mm までずらし、高さを変えた円板電極裏面への液滴の付着状況を調べた。このとき、円板電極には農薬の付着試験で用いられるミラーコート紙を電極に合わせて丸く切り、円板電極下面に密着させた。ミラーコート紙は光沢紙であり、液滴の付着状態を判別しやすい。

円板電極の高さを 200 mm に設定し、帶電液滴を 1 秒間だけ噴出させたとき、電極面への液滴の付着状況を図 10(a) に示す。同図においてそれぞれの円板の右側がシャワーの中心方向である。

液滴は電極下面の縁の部分に多く付着しており、電極の内側では細かい液滴が付着している。液滴の電極近傍での回り込みの効果は電極の縁で強いことがわかる。この効果は帶電液滴自身で形成する空間電荷雲の電界により引き起こされたものであるが、比較的粒子径の大きな液滴を電極の奥まで液滴を運ぶには電界の力が足らないことを示している。図では示していないが、高さ 100 mm および 300 mm の円板電極でも程度に差はあるが同じ傾

向を示している。

図 10(b) はノズルを送風パイプの中に納め、気流を液滴の噴出方向に下向きに送り込んだときの液滴の接地電極裏側への付着状態を示している。ノズル近傍の風速は 10 m/s である。図 10(a) の気流がない場合に比べ、液滴は電極裏面全体にはほぼ一様に付着しており、気流により、液滴が奥まで運び込まれることを示している。実際の静電散布において、農薬を葉の裏面に一様に付着させるには気流を加えることが有用であることを示唆している。

4.2 回り込む液滴の粒径

円板電極の裏面にシリコーン油を塗布したスライドガラスを取り付け、気流がない状態で円板電極裏面に回り込む液滴をシリコーン油中に取り込み、液滴径を測定した。図 11 は円板電極中心から半径方向に 10 mm, 30 mm, および 45 mm の位置における $1.5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ の領域に取り込まれている液滴の状態を示す。10 mm の位置まで回り込む液滴の数は図 11(a) で示したように少なく、液滴径も小さい。これと対照的に 45 mm の位置では多くの液滴が取り込まれている。

直径を測定する液滴の数を 100 個とし、各位置での液滴径の分布を示したものが図 12 である。中心部では直径 $20 \sim 60 \mu\text{m}$ の液滴が 80% を占めているのに対して、電極の縁に近い 45 mm の位置では、直径 $40 \sim 120 \mu\text{m}$ の大きい液滴が約 80% を占めている。大きな粒子は電極内までは入り込めず、外側で付着するのに対して、 $40 \mu\text{m}$ 以下の小さな粒子は内側に入り込んでいること

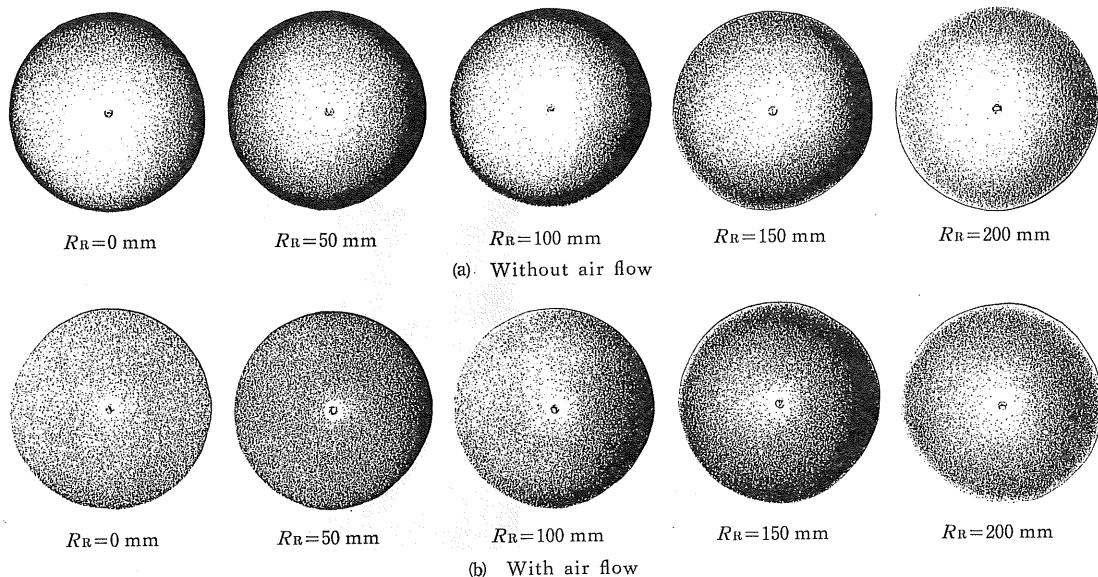


図 10 帯電液滴の接地電極下面への付着

Fig. 10 Deposition of charged droplets onto the undersurface of a grounded disk electrode.

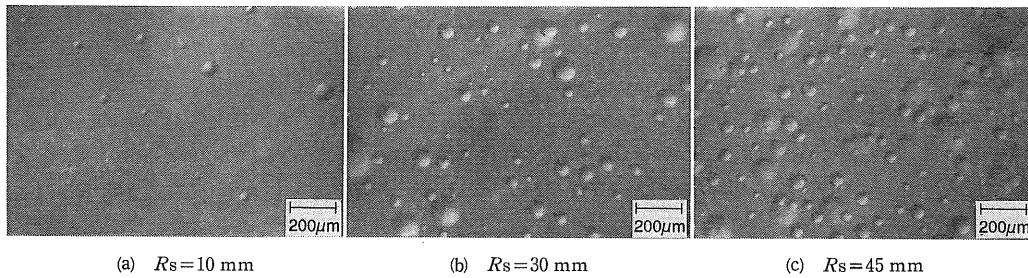
(a) $R_s = 10 \text{ mm}$ (b) $R_s = 30 \text{ mm}$ (c) $R_s = 45 \text{ mm}$

図 11 電極下面に回り込んだ液滴

Fig. 11 Droplets deposited onto the undersurface of a disk electrode.

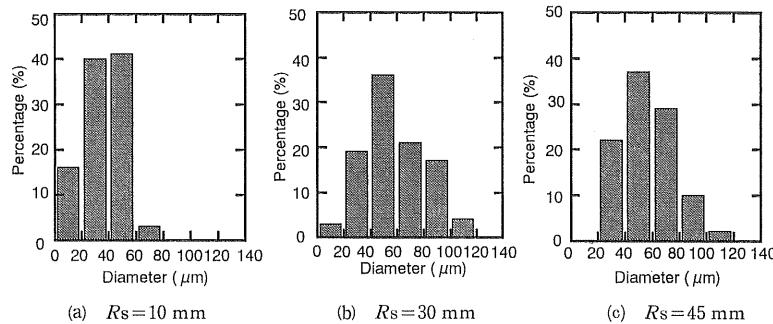


図 12 直径 100 mm の接地円板電極裏側に回り込んだ液滴の粒度分布

Fig. 12 Distribution in diameter of droplets deposited on the undersurface of a grounded disc electrode.

が明らかである。この液滴付着位置の粒径依存性は、帶電粒子の電荷量、空間電荷雲内の相互作用によるものであると考えられる。

図 13 はシリコーン油に取り込んだ液滴の大きさを円板電極裏面の位置ごとに平均粒径として示したものである。円板電極中心を基準として、ノズル中心軸に向かう方向を正、離れる方向を負にとっている。電極をシャワー中心に置いた場合も、他と同様の方向にとった。電極端部で比較的大きな粒子が付着する様子はこの図でも明

確に現れている。シャワー中心から 200 mm 離れた位置の円板電極では、ノズルから離れている側の裏面に付着した液滴の大きさがノズル側のものよりも大きい。この理由は、図 3 および図 4 に示すようにシャワーの外側ほど液滴径が大きくなるためであると類推できる。

5. あ と が き

エアレスノズルに誘導帶電電極を取り付けて、噴出する液滴の帶電特性を実験的に明らかにした。中空円錐状に噴出する液滴をリング状の帶電電極で荷電することは容易であるが、液滴の帶電電極への付着さらに付着した液滴からのコロナ放電が帶電特性に大きな影響を与える。使用できる荷電電圧には限界がある。得られた液滴の比電荷量は液滴シャワー内の半径方向および噴出方向ともに分布した値を持ち、ノズルから 300 mm の距離で最大 1.2 mC/kg であり、1,000 mm 離れた位置でも 0.5 mC/kg の値を維持している。平均粒径はノズル近くでは、中心部で 40 μm、外側で 70 μm と半径方向に対しても大きくなる。これに対し、ノズルから離れた位置では、平均粒径は 40~50 μm の範囲であり、半径方向に対して一様な分布を示した。

液滴シャワー内に接地円板電極を挿入したとき、下面に回り込んで付着する液滴には明確な特徴が見られた。

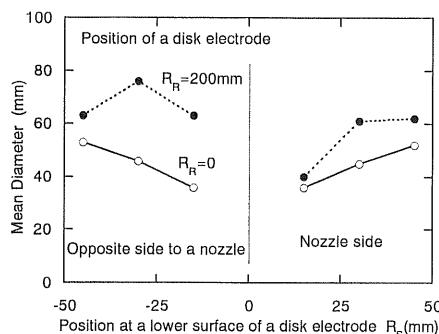


図 13 接地円板裏側に回り込んだ液滴径と付着位置の関係

Fig. 13 Relation between the droplet size and deposit position at the undersurface of a grounded disc.

まず、液滴は電極の縁に近いところによく付着する。次に、径の大きな液滴は電極の端部近傍に付きやすく、内側まで到達している液滴には小さいものが多い。ノズルに高電圧を直接印加した方法で生成された液滴は電極の縁には付着せず少し内側に入り込んでおり、本方法による液滴の付着とは大きく異なる。両者の比較から強い外部電圧による帶電液滴の運動と空間電荷雲による電界による帶電液滴の運動は接地物体近傍では大きく異なることが判明した。

液滴の運動は低電位の誘導帶電電極による外部電界よりも、むしろ帶電液滴群により形成される電界で決まるので、電極近傍の粒子速度と電界を把握する必要がある。回り込む液滴の粒径依存性については、今後、さら

に詳細に解析的な検討を行う必要がある。

終わりに、本研究を遂行するに当り、本学技官 鈴木春男氏、本学学生 杉山安央君（現在、㈱オムロン）、杉本俊之君（現在、本学工学部助手）の協力を得た。また、ノズルおよび圧力ポンプの貸与に対して、株式会社丸山製作所の関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 浅野和俊：静電気学会誌，8 (1984) 187
- 2) K. Asano : J. Electrostat., 18 (1986) 63
- 3) S.E. Law : IEEE Trans. Ind. Appl., IA-19 (1983) 160
- 4) 東山禎夫、浅野和俊：静電気学会誌，18 (1994) 518