

論 文

荷電エアレスノズルから噴出する液滴の帶電特性

東山 権夫*, 浅野 和俊*

(1994年5月9日受理)

Charging Characteristics of Droplets Ejected from an Electrified Airless Nozzle

Yoshio HIGASHIYAMA* and Kazutoshi ASANO*

(Received May 9, 1994)

In electrostatic spraying of pesticide to plants, it is important to charge droplets effectively. The airless nozzle, whose feeding rate of droplets was 2 g/s under the pressure of 2.4 MPa, was electrified up to 50 kV to produce charged droplets. Mean diameters of the droplets range from 20 to 50 μm and increases toward the outside of the shower. The charged droplets were collected into the suction-type Faraday cage with which the charge-quantity was measured. The charge-to-mass ratio of the droplets increases in proportional to the applied voltage to the nozzle. The maximum value was 1.2 mC/kg at the center of the shower. In order to simulate motion of charged droplets near plants, a grounded disc electrode was installed in a shower. The movement of charged droplets near the electrode was observed. From the deposit pattern of droplets on the backside of the electrode, the behavior of the charged droplets was clearly manifested.

1. まえがき

液体農薬の静電散布では、帶電液滴の動きを電界により制御するので、液滴の生成と帶電状態が散布システムの性能を決める。コロナ帶電のように生成した液滴をイオン空間を通過させて帶電させる場合と、接触導電帶電や誘導帶電のように液滴が生成されるときに帶電させる場合とでは帶電性能が大きく異なる^{1,2)}。微小液滴を大量に生成するものとして、回転カップ、回転ディスクのように遠心力を利用する方法、二流体ノズル、エアレスノズル、エアスプレーなどのようにノズルから液体を噴出させる方法がある。

原理的に回転カップや回転ディスクを使用する場合には、それ自体を荷電することが容易で、遠心力に加えて静電気力学的に均一な、高い比電荷量を有する微小粒子を生成することができる。これまでに荷電回転カップにより生成した帶電液滴の比電荷量はレーリー限界まで高めることができることを確かめている³⁾。これらの方法は遠心力のために回転カップやディスクの半径方向に液

滴を飛び出させるのが特徴である。この遠心力を得るために高速で回転させる駆動装置が必要である。

これに対して、回転部のないノズルを使用する場合、上述の三つの帶電方法を容易に適用することができる。ノズル近傍に誘導帶電電極を配置すると、強く帶電した微小液滴が誘導電極方向に引き寄せられ、その結果として、電極とノズルの間の絶縁が損なわれ、有効な帶電が行われなくなる。そのような液滴の電極への付着を防止するため、液滴の噴出速度の速い二流体ノズルに誘導帶電電極を取り付けた方式が Law らによって詳細に調べられている⁴⁻⁶⁾。しかし、液滴の速い速度を必要としないところでは二流体ノズルよりも加圧型エアレスノズルが適している。

我々は取り扱いの容易さ、装置が簡単で安価なエアレスノズルを選び、帶電液滴の生成方法について検討を行ってきた^{7,8)}。コロナ放電を用いて液滴を帶電させる方法では、ノズル近傍に高電圧を印加したコロナ放電用の針電極を配置することから、液滴に分裂する際に誘導帶電によって印加電圧と逆極性に帶電し、その状態でイオン空間を通過して印加電圧と同極性に液滴が帶電する。コロナ帶電量は液滴の通過するイオン密度、滞留時間、緩和時間に依存するが、帶電量は小さい^{7,8)}。一方、誘導帶電電極をノズル近くに配置する方法ではなく、ノズルそのものに高電圧を印加する導電帶電法では、生成液滴

キーワード：エアレスノズル、誘導帶電、静電散布、粒度分布、帶電電荷量

* 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 and Information Engineering,
Faculty of Engineering, Yamagata University,
4-3-16, Jonan, Yonezawa, 992 Japan

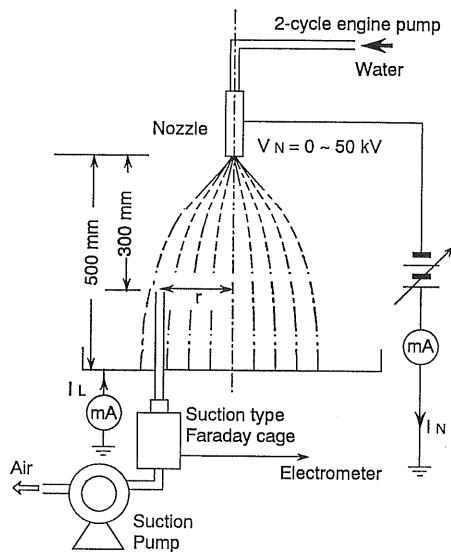


図 1 実験装置の概略図

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

の極性がノズルと同極性のため、生成した帶電液滴は散布対象となる接地物体に向かいやすい。この場合の問題点はノズル自体が高電圧になるために導電性の液体を用いるためにはタンク自体を絶縁する必要がある⁹⁾。しかし、絶縁性液体を主として用いる静電塗装ではこの方法が容易に用いられる。

本研究は導電性の水溶液を散布することを目的として、荷電エアレスノズルを用いて生成した帶電液滴の粒径や比電荷量を調べるとともに、その液滴群の電界中における動きを調べて、微小帶電を生成する方法の有用性を明らかにするものである。

2. 装置および方法

2.1 装置

実験装置の概略図を図 1 に示す。装置は液滴生成部、高電圧電源、帶電液滴回収皿から成る。ノズルおよび回収皿は広さ $1,800 \text{ mm} \times 1,800 \text{ mm}$ 高さ $2,400 \text{ mm}$ のベース中央に設置され、ベース壁面は接地された金網でおおわれている。液滴生成部はエアレスノズル、試液容器、高圧ポンプからなる。使用したノズルは口径 $0.4 \text{ mm} \phi$ のセラミックノズルであり、中空円錐状に液滴を噴出する。図 2 にノズルの構造およびノズル近傍の液滴の噴出状態を示す。ノズル先端から $3 \sim 5 \text{ mm}$ まで水膜が形成され、その先端から液滴に分裂する。この液滴に分裂する直前の水膜先端部の電界の強さが液滴の帶電量を決めることになる。

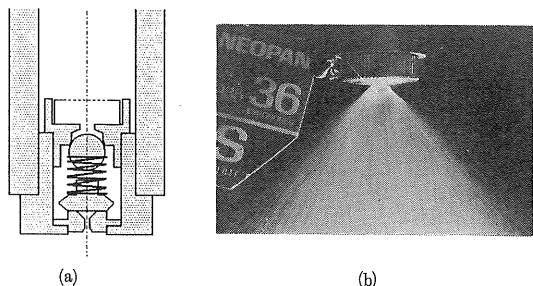


図 2 使用したエアレスノズル
(a) 断面図, (b) 液滴の噴出状態

Fig. 2 An airless nozzle used.
(a) Cross section, (b) Spraying of droplets

ノズルから液体が噴出した直後は中空円錐状の水膜を形成し、その状態で液滴に分裂するが、液滴噴出時に生じる旋回流によって、ノズルの下方 150 mm では液滴が円錐の内部に入り込んできており、ノズルから 500 mm 下に置いた液滴回収受け皿の位置では、逆に中心部での液滴量が多くなっている。

帶電液滴を生成するために、ノズル自体に高電圧を印加する方法を採用了。ノズルから噴出した水膜先端部の電界の強さが分裂により生じる液滴の電荷量を決めるので、この方式は誘導帶電と呼ばれるべきであるが、ノズル自体を接地し、その近傍に高電圧電極を配置する誘導帶電方式と明確に区別するために、便宜上、ここでは導電帶電と呼ぶ。

ノズルに最大 50 kV までの直流高電圧を直接印加するので、圧力ポンプ、試液容器も液送パイプ中の水を介して高電圧となる。これらすべての装置の電位を高電位に保つために、それぞれ、がいしの上に乗せて、接地電位から絶縁した。ポンプを高電圧に保つために、電動式ではなく 2 サイクルガソリンエンジン駆動のポンプを用いた。高電圧印加時のポンプ周囲の鋭利な箇所からのコロナ放電を防ぐために、液送パイプ、排気管を除いてポンプ全体を球形の金属容器で覆って、容器全体を高電圧にした。ポンプ送水バルブの開閉は絶縁棒を用いて行い、高電圧を印加した状態でノズルから水を噴出できるようにした。

噴出試液としては水道水をそのまま使用した。接地電極面への帶電液滴の付着状況を確認するとき、および液滴径を液浸法で測定するときには、着色剤（青色 1 号）で染色した水を用いた。噴出圧力は使用したポンプの最大圧力である 2.4 MPa に設定した。このときの水の噴出量は 1 秒間当たり 2 g である。

2.2 実験方法

ノズルに電圧を印加した状態でポンプの送水バルブを開くようにした。噴出する液滴の比電荷量を測定するた

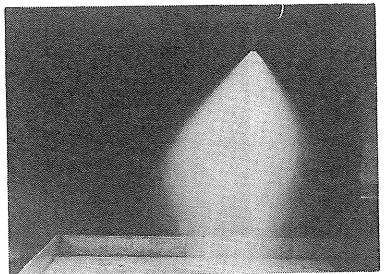
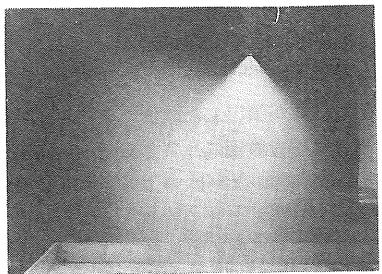
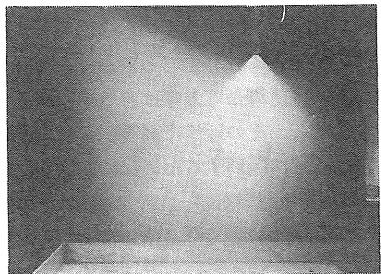
(a) $V_N=0 \text{ kV}$ (b) $V_N=20 \text{ kV}$ (c) $V_N=40 \text{ kV}$

図 3 荷電ノズルから噴出した帶電液滴

Fig. 3 Charged droplets ejected from the electrified airless nozzle.

めに、図 1 に示すように、液滴回収皿の下から吸引型ファラデーケージの吸引パイプを液滴シャワー内に挿入して、所定の位置の液滴を回収し、その電荷量と質量から液滴の比電荷量を求めた。このときの空気の吸引流量は $170 \text{ cm}^3/\text{s}$ である。ファラデーケージの内筒には内径 20 mm のガラス繊維製円筒型フィルタを使用し、さらに液滴の蒸発を極力防ぐためにフィルタ内に脱脂綿を詰めて回収液滴を捕捉するようにした。

液滴の回収位置は回収皿の上方 200 mm、ノズルの直下 300 mm の平面であり、液滴シャワー中心から半径方向の液滴比電荷の分布を求めた。一方、液滴回収皿は $10 \text{ k}\Omega$ の抵抗を介して接地されており、この抵抗両端の電圧を測定することにより、帶電液滴が受け皿に運ぶ電流の大きさを求めた。

液滴の大きさは液浸法により求めた。 $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ のシ

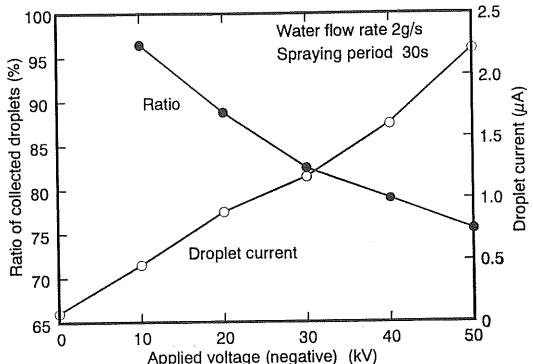


図 4 液滴回収皿に捕集された液滴の量と液滴電流

Fig. 4 Droplet current and the amount of the droplets collected in a tray.

リコーン油を塗布したスライドガラスをアクリル樹脂製の板に並べ、液滴シャワーの半径方向の所定の位置にくるように置いた。この状態で帶電液滴を約 1 秒間噴出させ、スライドガラス上のシリコーン油中に液滴をとらえた。シリコーン油中にはほぼ球状で閉じ込められた液滴は顕微鏡と CCD カメラで撮影し、液滴の粒径分布を求めた。粒径分布を求めるときには 100 個以上の粒子を測定した。

3. 結果と検討

3.1 液滴の噴出状態と粒子の飛散

ノズルに印加する電圧を変化させたときの液滴シャワーの噴出状態の変化を図 3 に示す。同図はシャワーの右後方から照明し、シャッタースピード 1/60 秒で撮影したものである。ノズルへの印加電圧を高くするにつれてシャワーの径は大きくなり、50 kV 印加時には回収皿の位置で直径 900 mm 程度まで拡がった。図 3 では印加電圧を上昇させるにつれて帶電液滴がシャワーから飛び出す様子が明確に現れている。液滴が飛び出し始める位置は印加電圧が高くなるにつれて、ノズルに近くなる。これは印加電圧が高くなるとともに液滴の電荷量が高くなり、同極性の電荷をもつ液滴からの静電反発力を受けること、また、ノズルから周囲の金網に向かう電界も強くなるためである。

ノズルへの印加電圧を変え、ノズルから 30 秒間で 60 g の水を噴出させたときの液滴回収皿で測定した液滴電流の大きさを回収皿に入った液滴の量とともに図 4 に示す。印加電圧が高くなるにしたがって液滴電流は直線的に増加し、50 kV 印加したときには、 $2 \mu\text{A}$ に達している。これに対して回収皿に入る液滴の量は、電圧の増加とともに減少し、50 kV を印加したときには、噴出した液滴のうち $1/4$ の量が受け皿の外に飛び出している。

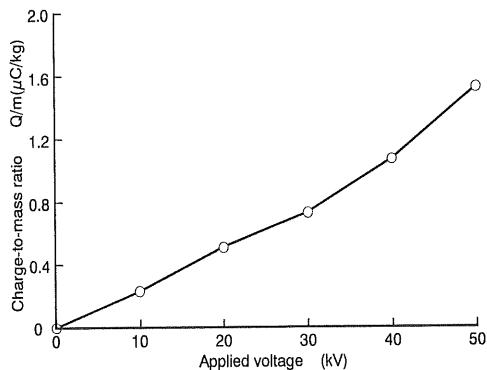


図 5 液滴回収皿に捕集された液滴の比電荷量

Fig. 5 The mean charge-to-mass ratio of the droplets collected in a tray.

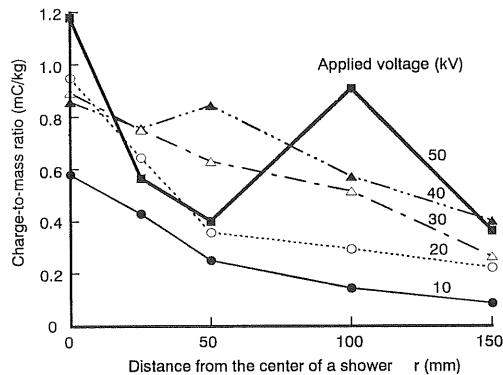


図 6 シャワー内の液滴比電荷の分布

Fig. 6 The distribution of the charge-to-mass ratio of droplets in a shower.

液滴の飛散方向は図 3(b), (c)で明らかなように、左上方である。この方向の力は帶電液滴同士の静電反発力によるものである。ただし、実験室の内部壁面は接地網で囲んでいるので、ノズル電圧の増加とともに液滴に働く外向きの電界の力も増加している。この印加電圧による力の方向はノズルから接地金網および、接地回収皿に向かっている。したがって、シャワーから液滴が飛び出すときには液滴自身で形成する空間電荷雲による電界とノズル電位に起因する電界との和によっていることが明らかである。

3.2 液滴の特性

3.2.1 液滴の電荷量

1 秒間当たり 2 g の水を 30 秒間噴出し、1 秒間当たりの液滴の回収質量で電流の大きさを除することによって、回収された液滴の比電荷量が求められる。このようにして求めた回収液滴の比電荷量とノズルへの印加電圧との関係を図 5 に示す。

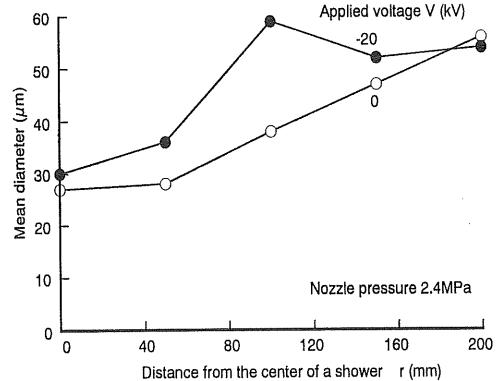


図 7 シャワー内液滴の粒径分布

Fig. 7 The size distribution of droplets in a shower.

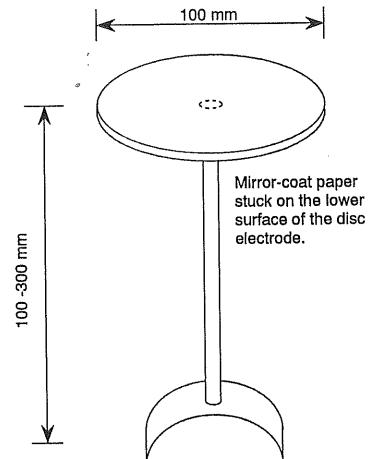


図 8 帯電液滴の付着試験用円板電極

Fig. 8 Disk electrode for deposit test of charged droplets.

液滴の比電荷量は印加電圧が高くなるにしたがって、ほぼ直線的に増加し、印加電圧 50 kV のときには 1.5 mC/kg に達する。本方法のように誘導帶電を利用する帶電法では、液滴のもつ電荷量はノズル先端部での水の膜が液滴に分裂するときの水膜先端の電界の強さに比例するので、水膜先端部の形状が変化しない限り、液滴の比電荷量は印加電圧に比例する。

図 5 の関係は液滴全体としてとらえた比電荷量であり、実際に液滴の運動に着目するときには、個々の液滴の電荷量と液滴径を把握する必要がある。図 6 はノズルの下方 300 mm の位置でシャワー内の液滴を吸引型ファラデーケージで回収したときの液滴比電荷量の半径方向分布である。

液滴の比電荷量の分布はノズルへの印加電圧によって

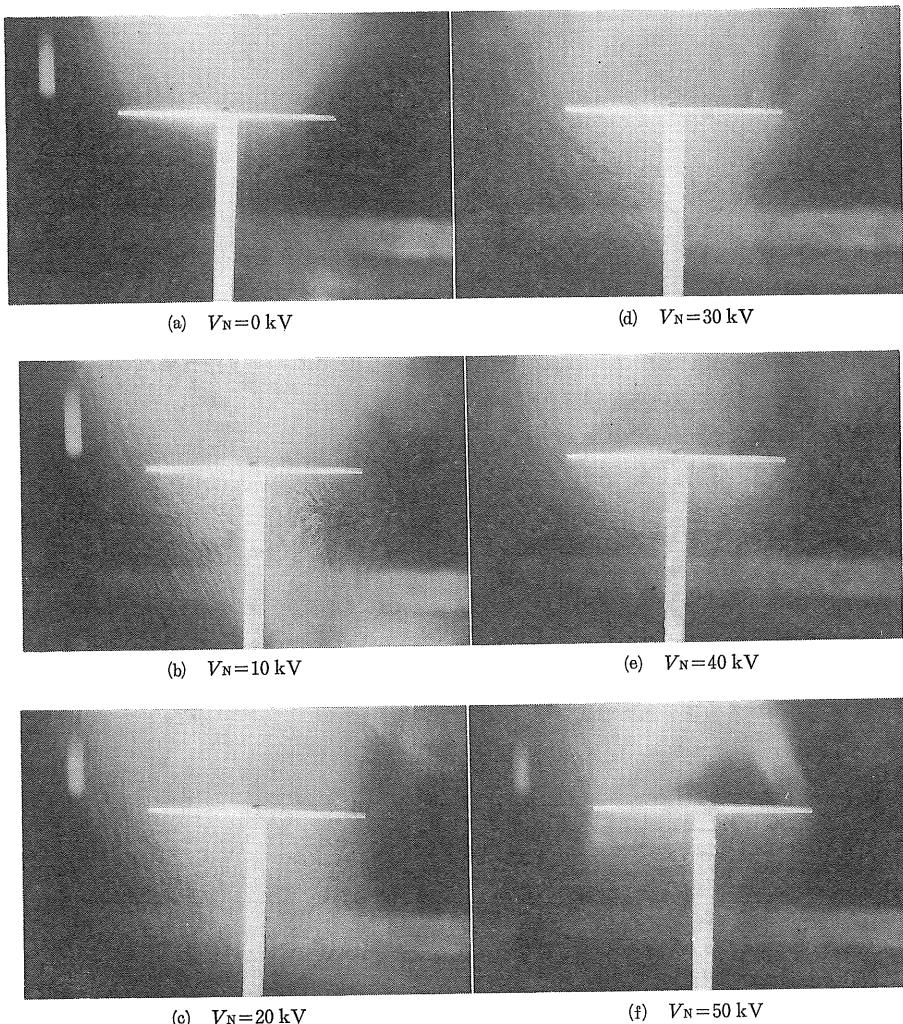


図 9 接地円板電極近傍の帶電液滴の運動

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

大きく異なる。印加電圧が30 kVまでは、シャワーの中 心部で比電荷量が高く、周辺部に向かうにつれて急激に 小さくなる傾向を示す。これに対して印加電圧40および50 kVの場合には、中心部で最大値を示すが、中心から離れて少し減少した後、再び大きくなる分布を示す。 液滴が生成されるとき、規則正しく水膜から分裂し、同じ大きさの液滴になるならば、個々の液滴の電荷量は本 来同じ値のはずで、位置による違いはないはずである。

このような分布を示すのは、シャワー周辺部にあった 高い比電荷をもつ液滴は同極性の電荷をもつ他の帶電液滴との静電反発力によって外に飛び出す。他方、中心部にも比電荷の高い液滴が集まるが、中心部での相互の反 発によって二つの山が現れているものと考えられる。

3.2.2 粒径分布

液滴の比電荷を求めた位置における液滴の粒径を図7に示す。電圧を印加しないときの液滴の平均粒径は中心部で約25 μmであり、周辺部にいくにしたがって大きくなる傾向を示す。一方、20 kVの電圧を印加したときに生成された帶電液滴は若干大きい。平均粒径25 μmを持つ液滴が保持しうる最大電荷量、レーリー限界値から得られる比電荷量は34 mC/kgであるのに対して、シャワー中心部で実験で得られた比電荷量は1 mC/kgであり、平均的にみて最大電荷量の3%まで帶電しているといえる。

3.3 模擬作物付近の液滴の運動

図8に示すように直径100 mm、厚さ1 mmのアルミニウム円板を太さ10 mmのアルミニウム棒で支持した

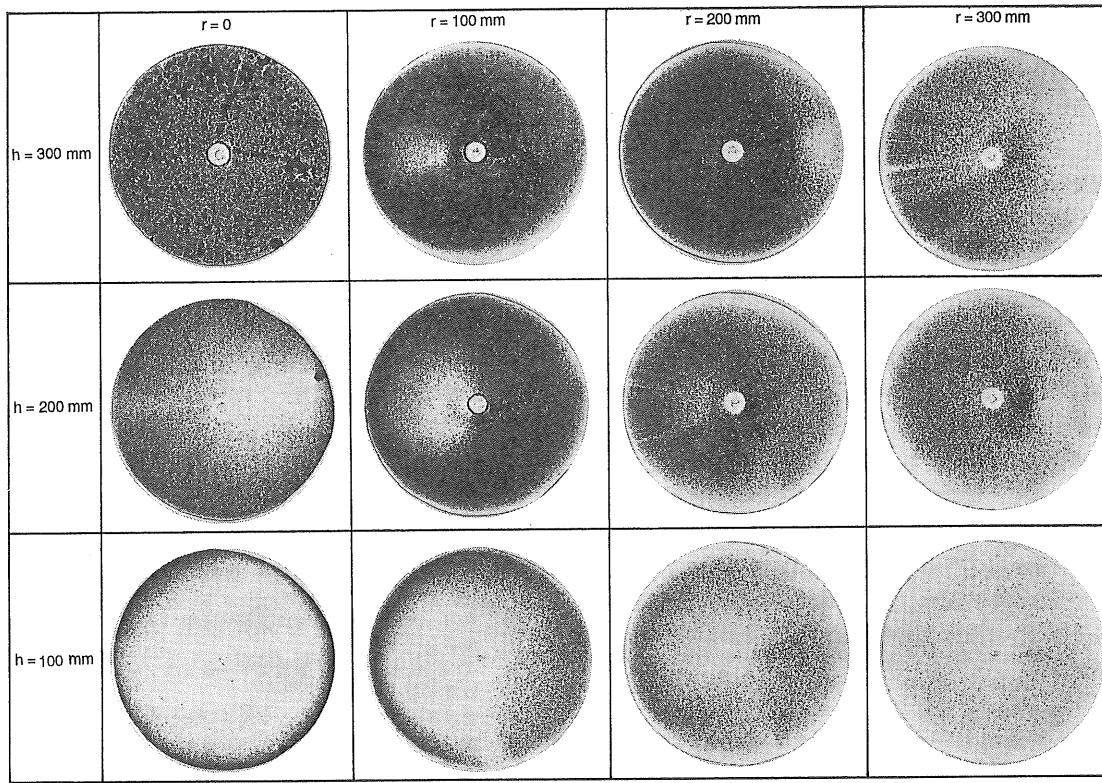


図 10 円板電極下面への液滴の付着

Fig. 10 Deposition of charged droplet at the under surface of the grounded disk electrode.

電極を作成し、これを液滴受け皿の上に置いて接地した。円板電極の高さは支持棒の長さを変えることにより調整でき、受け皿から 100, 200 および 300 mm の高さに設定した。また、電極の位置はノズル直下から半径方向に 100 mm ごとに 300 mm まで変えた。この円板電極を所定の位置に置いて、ノズルから帶電液滴を噴出させて、電極下面への液滴の回り込み状態を調べた。

図 9 はシャワー直下に置いた高さ 300 mm の電極下側での粒子の運動を示す。同図(a)はノズルに電圧を印加しておらず、液滴が電荷を持っていないもので、電極下側まで回ってくる液滴は全く見られない。これに対して、印加電圧が高くなるにつれて、電極下側に回り込む液滴がみられるようになり、印加電圧が 50 kV になると、接地受け皿のある下方への運動よりも下面に向かう液滴が増えていることがよくわかる。

電極下面への液滴が回り込む状態を詳しく調べるために、円板電極下面には、農薬の付着試験紙であるミラーコート紙を円形に切り抜いたものを貼りつけた。試液は着色剤（青色 1 号）で着色した水道水であり、電極下面に回り込んだ粒子の付着状況が一目でわかるようにした。

図 10 はノズルの高さを 70 cm に設定して円板電極がシャワー内に入る位置で、-50 kV の電圧を印加したノズルから 1 秒間だけ液滴を噴出したときの円板電極下面に付着した液滴の様子を示している。長く噴出すると付着した液滴が垂れ始めることになり、また、付着状態の違いがわからなくなる。

電極の高さが 300 mm や 200 mm のとき、電極下面には多くの液滴がほぼ一様に付着しているが、電極高さが 100 mm では接地受け皿に近くなるので、電極中心部までは液滴が届いていない。また、電極を液滴シャワーの中心からずらした位置に置くと、 $r=100$ mm 以上の付着パターンに見られるように、電極の縁には付着していない。これは帶電液滴が電極裏側に回り込む際の液滴の慣性力が大きく作用した結果であると考えられ、実際の液滴の動きについての解析的検討を行なう必要がある。

4. あ と が き

本研究ではエアレスノズルに直接高電圧を加えて、誘導帶電により帶電液滴を生成する方法を示した。この方法は本質的にノズル先端部の電界の強さで決まるので、液滴の帶電量はノズルへの印加電圧に大きく依存する。

特に、ノズルと接地電極との距離が変わるとノズル先端部での電界の強さが変化するので、帶電量が影響を受けることになる。

この方法では高い比電荷を有する液滴を生成できており、その値は 1 mC/kg であるが、レーリー限界の 3% 程度である。実用上は液滴の比電荷が大きすぎる場合には、帶電液滴群の作る電界および外部電界によって高い比電荷をもつ微少粒子がシャワーの外へ飛び出すことになるので、容易に飛散し、対象となる物体への付着にはあまり寄与しなくなる。

接地電極下面への液滴の回り込み状況も非常に良く、液滴の電荷に加えて、ノズルの電位による電界の働きが大きく、ノズルの高電位と接地対象物との間の電界により帶電液滴の運動を制御することができるこことを確かめた。しかし、電荷雲中の個々の粒子の運動についてはさらに検討を要する。

本帶電法はノズルに高電圧を印加するため、ノズルに水でつながる装置すべてが高電位になるので、実際に応用する場合には高電圧の絶縁に対する問題を解決する必要がある。

謝 詞

本研究を遂行するに当たり、実験を手伝ってくださいました本学学生朴沢博志（現、アルプス電気（株））、賀振武（現、日軽情報（株））の両君に、また、装置の作製等に対し本学技官鈴木春男氏に、貴重な助言に対し本学助教授八塚京子博士に謝意を表します。また、2サイクルエンジンポンプを貸与いただいた丸山製作所株式会社の関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 静電気学会編：静電気ハンドブック， p. 560，オーム社 (1981)
- 2) 浅野和俊：静電気学会誌， 8 (1984) 187
- 3) K. Asano : J. Electrostatics, 18 (1986) 63
- 4) S.E. Law and H.D. Bowen : Trans. ASAE., 9 (1966) 501
- 5) S.E. Law : Trans. ASAE, 21 (1978) 1096
- 6) S.E. Law : IEEE Trans. Ind. Appl., IA-19 (1983) 160
- 7) 東山、浅野：静電気学会講演論文集 '89, p. 371, 静電気学会 (1989)
- 8) 東山、鈴木、浅野：静電気学会講演論文集 '90, p. 107, 静電気学会 (1990)
- 9) 賀、東山、鈴木、浅野：平成3年電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, p. 119, 電気学会 (1991)