

静電誘導帯電における 水噴霧の比電荷量と液膜分離点に関する実験

吉田 哲雄^{*1}, 辻 利秀^{*}, 大山 龍一郎^{**}

(2019年3月28日受付; 2019年6月5日受理)

Experimental Study on Charge-to-mass Ratio and Water-film Separation Point with Electrostatic Induction Charging of Water Mist

Tetsuo YOSHIDA^{*1}, Toshihide TSUJI^{*} and Ryu-ichiro OHYAMA^{**}

(Received March 28, 2019; Accepted June 5, 2019)

The characteristics of electrostatic induction charging of water mist are investigated experimentally. To observe the effect of the induction-electrode position on the charge-to-mass ratio, the experiments were conducted using a hollow cone nozzle of single-fluid type and a ring-shaped induction-electrode mounted in various locations on the tip of the nozzle. The charge-to-mass ratio of the water mist is evaluated using a Faraday cage. In addition, the separation point, which separates the water-film and the water mist, is evaluated by fluid-flow visualization and electrical contact needle probe. These experimental results provide the basis for a discussion of the effectiveness of the induction-electrode configuration on the charge-to-mass ratio.

1. はじめに

水溶液を含むミスト状の水粒子を静電気帯電させる手段には、直接帯電方式、コロナ放電方式、誘導帯電方式の3種類がある¹⁾。それぞれの方式は高電圧を用いることから、用途に応じて使用上の安全対策が施される。直接帯電方式は噴霧ノズルに高電圧を印加する。そのため水及び加圧送水装置の全体は接地から浮かす安全策が必要である。コロナ放電方式は噴霧ノズルの先端に高電圧の放電電極を必要とする。一方、誘導帯電方式はコロナ放電方式に比べて誘導電極への印加電圧が低く抑えられる。

農業分野では古くから農薬水溶液を葉の裏等に効率よく均一に散布する目的で誘導帯電方式が利用されている。噴霧ノズルには一流体と二流体（水と空気の混相）ノズルがある。また噴霧された水粒子の帯電量については、一般に比電荷（水粒子に静電気を帯電させた際の指標となる帯電量 C/kg）が用いられる。誘導帯電方式による静電噴霧の研究は今日までに数多く報告されている。例えば一流体ノズルにおいては、山根ら^{2,4)}により

放水流量 0.5~2.6 L/min に対して比電荷が 10^4 C/kg のオーダーになることが報告されている。二流体ノズルにおいては、松尾ら^{5,9)}により外部環状電極や内部環状電極を用いた微量流量ノズル（0.06~0.2 L/min）に対する比電荷が 10^4 ~ 10^3 C/kg のオーダーになることが報告されている。二流体ノズルは一流体ノズルに比べて、粒子径が小さいために比電荷が高い値を示す傾向となる。

二流体ノズルは、内部混合型と外部混合型の二つに種別される。内部混合型はノズルの内部で水と空気が混相する仕組みである。内部混合型では誘導電極がノズル先端から覆うように設けられることが多い¹⁰⁻¹²⁾。一方、外部混合型はノズルから出た液膜（液柱）を中心としてその外周から空気を噴射し混相する仕組みである。即ち、二流体ノズルの外部混合型や一流体ノズルでは、水膜（水柱）から水粒子（ミスト）に分裂する位置（液膜分離点または液柱分離点）が露出して存在する。

著者らは従前より、一流体ノズルを用いて誘導帯電方式による静電噴霧の応用を検討してきた。例えば、静電噴霧は空間中に浮遊する粉じんの洗い落としに効果があること¹³⁻¹⁶⁾、消火と消煙に対する効果を有することを見出してきた¹⁷⁻¹⁸⁾。しかし、誘導電極の設計に関しては不明なことも多い。特に比電荷を高めるためには、ノズル先端に配置する誘導電極の位置について検討する必要がある。即ち、液膜分離点と誘導電極の相対的な配置を調べることが必要であると考えている。

本実験では、代表的な一流体ノズルである中空円錐ノズルについて、誘導電極の位置を可変した際の比電荷を評価した。その結果、液膜分離点と誘導電極の相対的な

キーワード：誘導帯電, 水噴霧, 比電荷, 液膜分離点

^{*} ホーチキ株式会社 開発研究所

(〒194-8577 東京都町田市南町田 3-7-1)

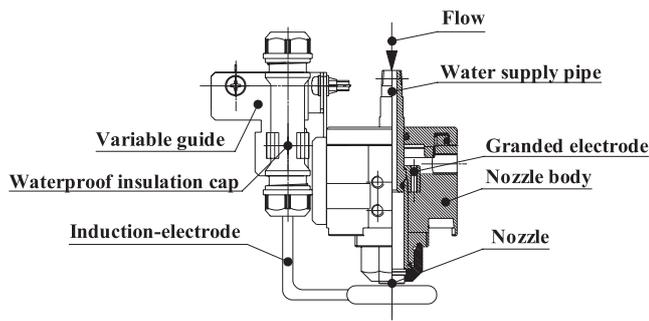
Research and Development Center, Hochiki Corporation,
3-7-1, Minamimachida, Machida, Tokyo 194-8577, Japan

^{**} 東海大学 工学部 電気電子工学科

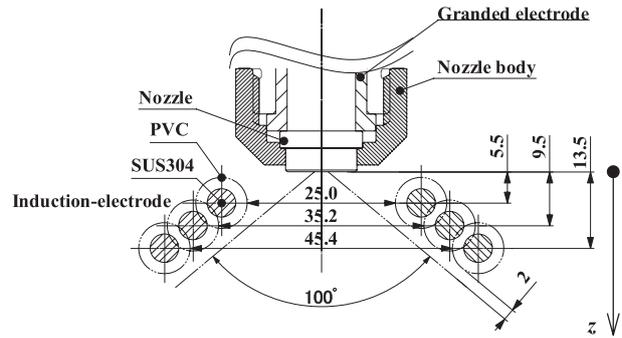
(〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1)

Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokai
University, 4-1-1, Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-
1292, Japan

¹ te-yoshida@hochiki.co.jp



(a) Structure of experimental nozzle



(b) Layout of induction-electrodes

図1 供試ノズルと誘導電極
Fig.1 Experimental nozzle and induction electrode system.

位置が比電荷に影響を与える知見を得たので報告する。

2. 本実験における比電荷の特性

2.1 供試ノズルと誘導電極

図1に実験に供した(a)供試ノズルの構成と(b)誘導電極の配置を示す。この一流体中空円錐ノズルは、放水圧力が1.05 MPa一定、放水流量が1.0 L/min、噴霧角が100 degのセラミック製ノズルチップである。水噴霧の粒子径を画像式ポータブル粒度分布測定装置(Oxford製, Visisize portable)によって計測したところ、粒子径の平均はノズル直下1.5 mにおいて70 μm、そこから水平方向に0.5 m離れた噴霧外縁で217 μmであった。ザウター平均粒子径 D として取り扱うと、供試ノズルの D は144 μmである。ノズル本体は絶縁体(硬質ポリ塩化ビニル樹脂)を用いて成形し、ノズル内部の流路には導体管(SUS304製、内径φ12 mm)を配置した。この導体管は接地電極とした。誘導電極は線径φ5 mmのステンレス棒(材質SUS304)を環状に加工し、素地表面に絶縁処置として軟質ポリ塩化ビニル樹脂コーティング(膜厚約2.0 mm)を施したものである。この環状の誘導電極には内径 d が異なる3種類を用いた。噴霧角度の形状に沿わせて d がφ25.0, φ35.2, φ45.4 mm、ノズル先端から誘導電極環中心までの距離 z が5.5, 9.5, 13.5 mmである。誘導電極と噴霧外縁の間隙は、ノズル噴霧角度の外縁に対して法線方向に2 mmとなる。作動流体には井戸水を用いた。使用した井戸水の分析値を表1に示す。水温は水温計(佐藤計量器製, SK-1250MC, MC-T100Ⅲ)によりモニターし、導電率は導電率計(東亜DKK製, CM-21P)によって計測した。実験は水温が18.7~20.0°C、導電率が23.2~23.5 mS/mの条件で実施した。

2.2 ファラデーケージによる水粒子の比電荷計測

図2に自作した比電荷計測装置(ファラデーケージ)を示す。ファラデーケージは板厚1.5 mm(材質SUS304)

表1 井戸水の分析値
Table 1 Analytical value of the well water.

pH [-]	8
Alkalinity (pH4.8) [mg/l]	79
Chloride ion [mg/l]	12
Sulfate ion [mg/l]	20
Iron [mg/l]	0.06
Silica [mg/l]	45
Total hardness [mg/l]	119
Calcium hardness [mg/l]	56

を用いて構成し、高さ1.72 m×奥行1.0 m×幅1.0 mである。供試ノズルはファラデーケージの天井面に固定し、誘導電極は直流高電圧電源(松定プレジジョン製, HEOPT-10B10)の正極側に接続した。電源の負極側とノズルの接地電極は共に接地した。配線にはネオン線(品川電線製, N-EV)を用いた。ファラデーケージ内部には電荷を帯びた水粒子を捕えるため、円筒型のファラデーカップ(材質SUS316, φ510 mm×H570 mm)を設けて、そのカップ内部には水はね防止用に円筒型のメッシュ(材質SUS316, φ470 mm×H550 mm, 8, 20, および50メッシュ)を3層構造にて設置した。供試ノズルへの水供給はプランジャーポンプ(キョーワ製, KYC-300-6)を使用し、圧力計測は二次側のブルドン管圧力計で行った。水噴霧の質量流量 Q [kg/s] はファラデーカップ下部に設けたザルトリウス重量計(ザルトリウス社製, FD3001GG-H)により計測した。ファラデーカップの電荷量はオペアンプにより電圧変換し、オシロスコープ(横河電機製, DL750)に記録した。この電圧の平均値 $V_{average}$ とオペアンプ内の抵抗値(200 kΩ)から電流値 i [C/s] を算出し、比電荷 q_{mist} [C/kg] は i と Q から算出した。比電荷は、噴霧した状態で誘導電極の印加電圧 V_m を1分毎に+1 kVから+10 kVまで+1 kVの刻みにて可変して計測し、1分間の時間平均を用いて評価した。

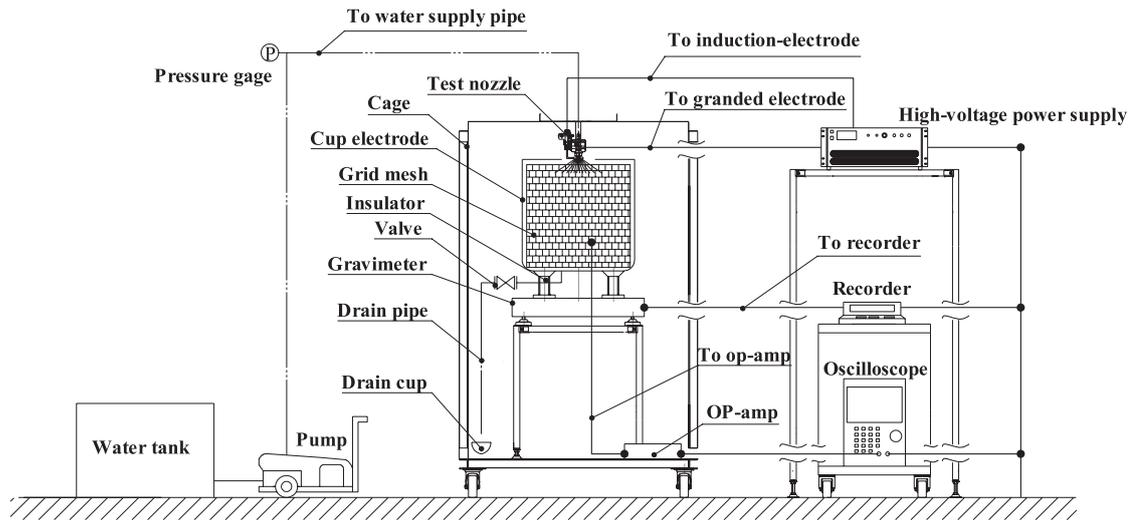


図2 ファラデーケージによる比電荷 q_{mist} の計測装置
Fig.2 Experimental equipment for measurement of charge-to-mass ratio q_{mist} by Faraday cage.

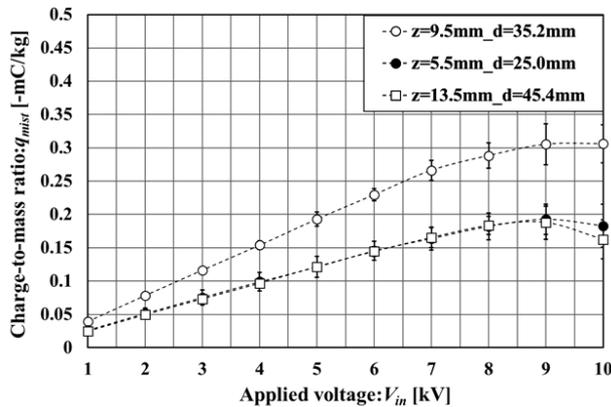


図3 印加電圧 V_{in} に対する比電荷 q_{mist} の特性
Fig.3 Characteristics of q_{mist} as a function of V_{in} .

計測は各5回ずつ行った。

印加電圧 V_{in} に対する比電荷 q_{mist} の特性を図3に示す。 q_{mist} は印加電圧に依存して増加し、一流体ノズルにおいて一般に観測されている比電荷 10^{-4} C/kg のオーダーであることが確認された。供試した3種類の誘導電極のうち、 $z=9.5$ mmの誘導電極において比電荷が比較的高い値を示した。この結果から誘導電極の位置 (z) が僅かに異なるだけで q_{mist} が変化することが分かった。また、この比電荷の特性は印加電圧が8 kVまで線形的に増加している。9, 10 kVにおいて比電荷が飽和または減少している。この傾向は印加電圧 V_{in} に依存しているため、山根ら²⁾が報告しているように比電荷の飽和(あるいは減少)はコロナ放電が原因であろうと考えている。帯電水霧の一部は誘導電極に付着し、誘導電極の印加電圧が高まると先端が鋭利なコーン形状の水滴として垂れ下がる。9 kV以上においては、この水滴の先端からコロナ

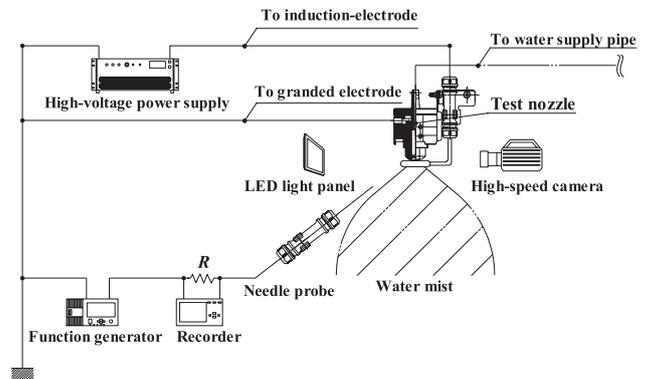


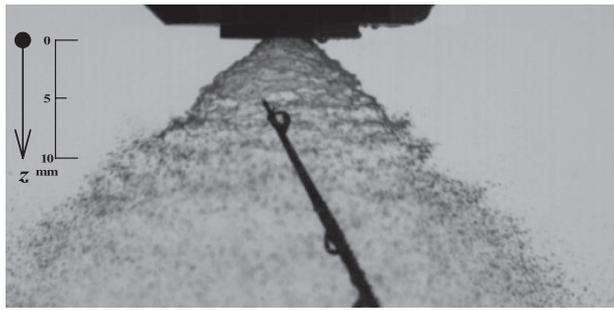
図4 液膜分離点の計測装置と可視化装置
Fig.4 Experimental equipment for measurement of water-film separation point and visualization system.

放電が発生したことが要因となり比電荷が飽和または減少したものと考えられる。

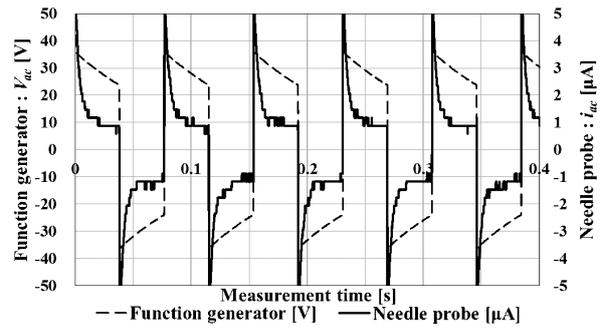
3. 液膜分離点の評価

図3に示した q_{mist} の値は誘導電極の配置に影響した。本実験では、その考察を進めるため液膜分離点の位置を調べた。

図4に液膜分離点の評価に用いた装置の概略を示す。液膜分離点の評価には、針プローブ(裁縫針、線径 $\phi 1.0$ mm)、ファンクションジェネレーター(NF回路ブロック設計製, EC750SA)、電流検出のための抵抗 R (340Ω) とメモリーハイコーダー(HIOKI製, 8870)を使用した。針プローブは先端から5 mmを除きエナメル塗布により絶縁処置を施し、防水プラグにて配線を行った。針プローブには周波数13 Hzの交流矩形波電圧30 Vを抵抗 R を介して印加した。 R の両端の電圧降下はメモリーハイ



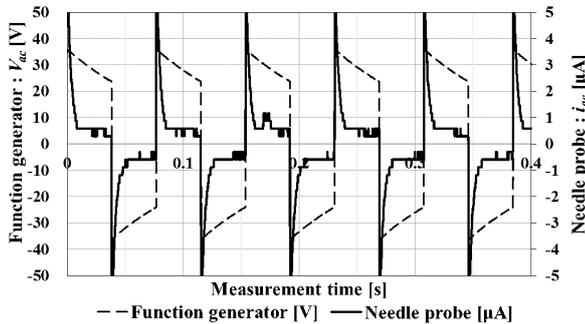
(a) Visualization of water spray



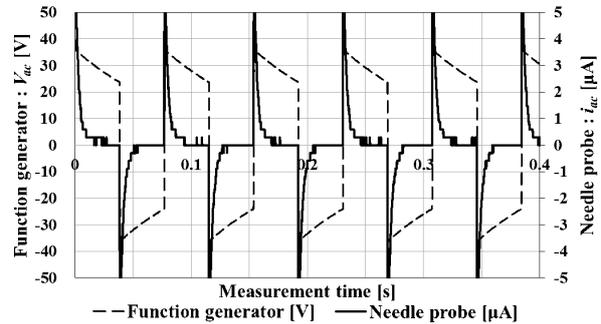
(b) V_{ac} and i_{ac}

図5 噴霧の可視化と針プローブの波形 ($z = 5.0$ mm)

Fig.5 Visualization of water spray and waveforms of V_{ac} and i_{ac} ($z = 5.0$ mm).



(a) V_{ac} and i_{ac} ($z = 6.0$ mm)



(b) V_{ac} and i_{ac} ($z = 7.0$ mm)

図6 針プローブの波形 ($z = 6.0, 7.0$ mm)

Fig.6 Waveforms of V_{ac} and i_{ac} ($z = 6.0, 7.0$ mm).

コーダーに記録した。メモリーハイコーダーのサンプリング時間は 20 ms/div に設定し、1 秒間 (13 周期分) のデータを記録した。計測環境が 50 Hz であることから、針プローブの印加電圧波形 V_{ac} と電流波形 i_{ac} を判別しやすくするため V_{ac} は 13 Hz とした。針プローブの電流波形 i_{ac} の値から、導通あるいは非導通の状態が得られる。液膜分離の位置推定は、ノズル先端部の $z = 0$ mm から噴霧外縁の鉛直下方向に $z = 30$ mm まで針プローブを 1 mm 間隔で移動させて評価した。計測は各 3 回行った。また、噴霧による液膜分離状態を確認するために、ノズル前面に高速度カメラ (Photron 製, FASTCAM SA-3) を設置した。ノズル背面には LED パルスパネル光源 (Photron 製, 電源: LPS-210S, 光面: WTT150210) を設置し 10,000 fps のシャッタースピードにて撮影した。高速度カメラのシャッタースピードと光源のパルス間隔は同期調整を行った。供試ノズルへの水供給と誘導電極への印加電圧の条件は 2.2 項と同様である。

まず、誘導電極を配置する前の供試ノズルの液膜分離について述べる。図 5 は針プローブを $z = 5.0$ mm に配置した場合の (a) 可視化写真, (b) 針プローブの印加電

圧波形 V_{ac} (破線) と電流波形 i_{ac} (実線) を示している。図 6 は針プローブを (a) $z = 6.0$ mm, (b) $z = 7.0$ mm に配置した場合の印加電圧波形 V_{ac} (破線) と電流波形 i_{ac} (実線) を示している。図 5 の (a) に示した噴霧の可視化からは液膜分離点の正確な位置を判断することは難しいが、円錐形状の液膜表面が水粒子に分離の様子を見ることができる。(b) に示した針プローブの i_{ac} には V_{ac} の極性反転時にパルス状の過渡電流が流れる。この変位電流を除いた i_{ac} の振幅から針プローブが液膜内 (導通) であるか、液膜外 (非導通) であるかが分かる。図 5 の (b) $z = 5.0$ mm では、針プローブが液膜内に存在しているため i_{ac} の振幅 ($\pm 1 \mu A$ 程度) が現れ、導通状態にあることを示している。図 6 の (a) $z = 6.0$ mm でも i_{ac} の振幅 ($\pm 0.5 \mu A$ 程度) が現れ、導通状態を示している。一方、(b) $z = 7.0$ mm では i_{ac} の振幅がほぼ 0 A となり、非導通状態であることが分かる。この結果から本供試ノズルにおける液膜分離点 ($V_m = 0$ kV 時) は $z = 7.0$ mm であると推定された。

次に、静電誘導時の液膜分離について述べる。図 7 は $V_m = +7$ kV において針プローブの位置 (z) に対する i_{ac}

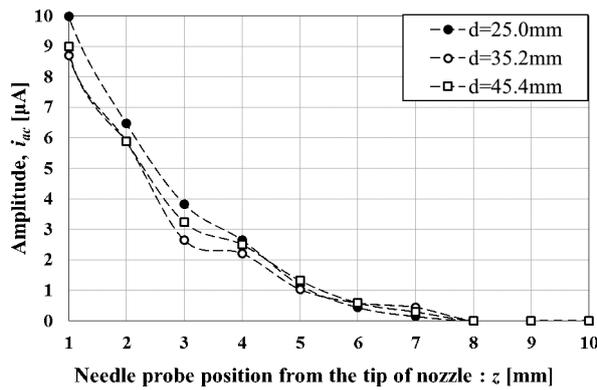


図7 針プローブの位置 z に対する i_{ac} の振幅 ($V_m = 7$ kV)
Fig.7 i_{ac} in amplitude as a function of z ($V_m = 7$ kV).

の振幅の値を示している。この i_{ac} の値は V_{ac} の極性反転時の過渡電流を除いた振幅の値をプロットしたものである。誘導電極の印加電圧 V_m が増加すると i_{ac} の波形は液膜が負極性に帯電するため負側にバイアスして現れる。印加電圧 V_m を 1~10 kV に可変した時に、 i_{ac} の振幅の値は針プローブの位置 (z) のみに依存して変わり、 i_{ac} の振幅の値は V_m の可変に対してほとんど変わらなかった。針プローブが $z = 8.0$ mm の時に $d = 25, 35.2, 45.4$ mm の 3 条件において、 i_{ac} が 0 A となり非導通の状態を示した。この i_{ac} の値から液膜分離点が $z = 8$ mm 付近であると推定された。前述したように供試ノズルの液膜分離点は $z = 7.0$ mm であったが、静電誘導時には z 方向に 1.0 mm 延伸した。液膜分離点が延伸した原因は、正極性の誘導電極と負極性帯電した液膜の間に静電引力が生じていたためであると考えられる。

図8に誘導電極 ($z = 9.5$ mm) に $V_m = +7$ kV を印加した時の噴霧可視化写真を示す。図中には液膜分離点の推定値 $z = 8.0$ mm と供試した3つの誘導電極を図示している。 $z = 5.5$ mm の誘導電極は液膜分離点よりも z 方向の上流側にある。 $z = 9.5$ mm の誘導電極は液膜分離点に近接している。 $z = 13.5$ mm の誘導電極は液膜分離点よりも z 方向の下流側にある。2.3項において示した比電荷は、 $z = 9.5$ mm の誘導電極において高い値を示した。本実験の条件において、誘導電極を $z = 9.5$ mm に配置した場合に比電荷が高い傾向を示した原因は以下のことが考えられる。一般に中空円錐状の噴霧において、液膜の厚みはノズル吐出口から液膜分離点に近づくにつれて減少する。液膜分離点においては液膜の表面積が最大、液膜の厚みが最小となる。その領域を覆うように誘導電極を配置したことで静電誘導による比電荷が高い値を示したと考えられる。液膜の厚さ及び液膜表面積と比電荷との関係については、今後の研究課題として検証する必要がある。

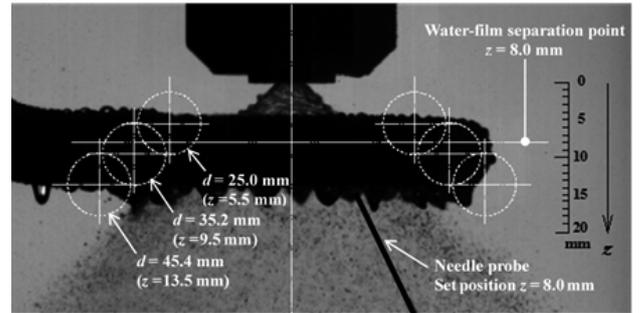


図8 液膜分離領域における誘導電極の説明図
Fig.8 Explanatory figure for induction electrode around water-film separation region.

る。また、静電誘導時の液膜分離点 $z = 8$ mm の位置に噴霧角度の形状に沿わせた誘導電極を配置した場合、比電荷値はより高くなる可能性も推察される。こちらも併せて検証したいと考えている。

本実験の条件から、比電荷は液膜分離点の位置と誘導電極の配置に関係があることが言える。

4. まとめ

本実験ではノズル先端から噴霧角度の形状に沿わせた誘導電極を用いて比電荷と液膜分離点を評価した。その結果、本供試ノズルの液膜分離点は誘導電極への電圧が無印加時に $z = 7.0$ mm であったのに対して、静電誘導時に z 方向に 1.0 mm 延伸することがわかった。また、比電荷は誘導電極が液膜分離の領域を覆うように配置されたときに増加した。誘導電極の配置が僅かに異なるだけで比電荷の値は変化する。即ち、比電荷の特性は液膜分離点の位置と誘導電極の配置に関係があり、比電荷の値に影響を及ぼす知見を得ることができた。

誘導電極とノズルを設計するにあたっては、中空円錐ノズル以外 (例えば充円錐, 扇形, 直進ノズル等) の一流体ノズルを用いる場合や誘導電極による電界の分布など、まだ不明なことが多い。今後は液膜の電界分布、ノズルの放水圧力や流量、作動流体の特性等の関係と照らし合わせて調査していく予定である。

参考文献

- 1) 静電気学会：静電気ハンドブック, p.754, オーム社 (2006)
- 2) 山根 俊, 宮崎昌宏：低濃度多量散布における静電散布装置の帯電性能. 農業機械学会誌, **70** (2008) 115
- 3) 山根 俊, 宮崎昌宏, 斎藤秀文, 大村和宏, 青野 守, 大須賀隆司：低濃度多量散布の静電散布装置に関する研究. 農業機械学会誌, **72** (2010) 578
- 4) 吉永慶太, 山根 俊, 宮崎昌宏, 中山夏希, 窪田陽介, 小林 研：エアアシスト静電散布における噴霧液滴の物

- 理的特性に関する研究. 農業食料工学会誌, **76** (2014) 261
- 5) 松尾昌樹, 飯本光雄, 内野敏剛: 静電散布ノズルの電気的特性. 千葉大学学術報告, **37** (1986) 1
- 6) 飯本光雄, 松尾昌樹, 内野敏剛: 単一針状電極によるコロナ帯電式水圧ノズルの静電散布特性. 千葉大学学術報告, **39** (1987) 9
- 7) 松尾昌樹, 内野敏剛, 飯本光雄: 外部環状電極を用いた誘導帯電式2流体ノズルの静電散布特性. 農業機械学会誌, **42** (1987) 459
- 8) 内野敏剛, 松尾昌樹, 飯本光雄: 内部埋め込み型環状電極を用いた誘導帯電式2流体ノズルの静電散布特性. 千葉大学学術報告, **42** (1989) 1
- 9) 松尾昌樹, 内野敏剛: 静電式スピードスプレーヤの研究. 千葉大学学術報告, **44** (1991) 99
- 10) M. Kumar Patel, C. Ghanshyam, P. Kapur: Characterization of electrode material for electrostatic spray charging: Theoretical and engineering practices. *J. Electrostatics*, **71** (2013) 55
- 11) S. Edward Law: Embedded-Electrode Electrostatic-Induction Spray-Charging Nozzle: Theoretical and Engineering Design. *Trans. ASAE*, **21** (1978) 1096
- 12) S. Edward Law: Electrostatic pesticide spraying: concepts and practice. *IEEE Trans. Industry Appl.* **19** (1983) 160
- 13) 高木賢二, 挟間貴雅, 池松建治, 辻 利秀: 帯電させたミストによる浮遊粉じん除去効果の検討 (その1) 粉じん除去効果のモデル化. 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.887, 日本建築学会 (2013)
- 14) 池松建治, 高木賢二, 挟間貴雅, 辻 利秀, 吉田哲雄: 帯電ミストによる浮遊粉じん除去システム (マイクロ EC ミスト[®]) の開発. 土木学会第 68 回年次学術講演会, p.563, 土木学会 (2013)
- 15) 高木賢二, 挟間貴雅, 池松建治, 辻 利秀, 吉田哲雄: マイクロ EC ミスト[®] の開発. 鹿島技術研究所年報, **64** (2016) 1
- 16) 高木賢二: 帯電ミストによる浮遊粉塵除去システムの開発 マイクロ EC ミスト[®]. *建設機械施工*, **69** (2017) 1
- 17) 辻 利秀, 林 龍也, 吉田哲雄, ホーチキ(株): 火災防災設備. 特許第 5281155 号 (2013)
- 18) Hazmi Abdul Halim, Ryu-ichiro Ohyama, Toshihide Tsuji, Tetsuo Yoshida: Influence of Electrostatic Induction Electrode Configuration on Water Mist Charging. p.231, *IEEE CDIDP proc.* (2011)