東海大学紀要工学部
Vol.58,No2,2018,pp.21-26

ホローコーンノズルを用いた水噴霧の静電誘導帯電に関する実験

吉田　哲雄[*1,2]　辻　利秀[*2]　大山　龍一郎[*3]

Experimental Study on Electrostatic Induction Charging of Water Mist by Hollow Cone Nozzle

by

Tetsuo YOSHIDA[*1,2], Toshihide TSUJI[*2] and Ryu-ichiro OHYAMA[*3]

(Received on Sep. 28, 2018 and accepted on Nov. 8, 2018)

Abstract

The effect of electrostatic induction on water mist was experimentally investigated. Since the theoretical mechanism of water mist charging on the nozzle, which was designed to be suitable for electrostatic induction, has not been systematized, the identification of electrical and fluid parameters has been required in principle. To quantify the charge-to-mass ratio of water mist, experimental evaluation equipment was constructed. In the experiment, the charge-to-mass ratio and the diameter of water mist were measured. The characteristics of the ratio were sensitive to the geometric condition of the electrostatic induction nozzle. As for the appropriate placement of the electrostatic induction electrode, it was found that the charge-to-mass ratio influenced the position of the water-film separation point, in which the water spray separated from the film shape in the mist.

Keywords: Induction electrode, Water mist, Charge-to-mass ratio, Water-film separation, Water mist diameter

1. まえがき

本研究は，誘導帯電方式による水の静電噴霧を対象にしている．一般に，静電噴霧は帯電した水滴が静電気力を伴って霧（水粒子）に分裂する現象として知られている [1]．この水粒子の帯電量については，流体ノズルから噴霧した水粒子を外部電極から静電気帯電させることによって増加する傾向を呈する．これまでの静電噴霧の適用には，農業分野において噴霧器による葉の裏面等への農薬散布が比較的困難な箇所であっても少量の農薬使用量で均一に散布できるなどがある．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，誘導帯電方式の主に 3 種類がある [2]．直接帯電方式はノズル本体に高電圧を印加して水に直接高電圧を与えた状態で噴霧するものである．そのため，ノズル，水及び加圧送水装置の全体を接地から浮かす必要がある．コロナ放電方式はノズル先端に配置した針状電極（コロナ放電電極）で生成した気相イオンと併せて噴霧する方式である．電極に数万ボルトの高電圧を印加する必要がある．一方，誘導帯電方式はノズル先端の噴霧空間に静電誘導電極を配置してノズルと電極間に高電圧を印加する．コロナ放電方式に比べて気相イオンの生成を必要としないため印加電圧が低い．また，これらの静電噴霧による水粒子の生成には，一流体あるいは二流体（水と空気の混相）ノズルが一般に用いられる．

*1　総合理工学研究科総合理工学専攻博士課程
*2　ホーチキ株式会社　開発研究所消火システム課
*3　工学部電気電子工学科教授

S.E.Law[3] は二流体ノズルに対して誘導帯電方式を適用した場合，ノズルの直下で水柱（水膜，あるいは水糸）が水粒子に分裂する位置（液膜分離点）の近傍に誘導電極を設けると，水粒子の帯電量が比較的大きくなることを報告している．松尾・内野・飯本 [4-7]は，一流体および二流体ノズルに対する誘導帯電方式の比電荷（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]）について多くの実験データを詳細に報告している．一流体ノズルの比電荷の量は二流体ノズルに比べてかなり少ない．これは一流体ノズルの放水流量が比較的大きいためであると考えられている．これらの帯電噴霧の既存の産業応用は，前述の農薬散布と静電塗装の技術として今日まで幅広い．上述の用途では，噴霧する流量が数 mL/min と少ない．従前より，著者らは放水流量が比較的多いノズルを用いて誘導帯電方式による帯電噴霧を検討してきた．そして，大気開放空間における浮遊粉じんの洗い落としに効果があること，さらに消火と消煙に対する効果を有することを見出してきた [8-13]．しかしながら，帯電噴霧のメカニズムを含めて定量的な体系化が十分でないため，誘導帯電ノズルの設計に対しては不明なことが多いのが現状である．

本研究は，一流体ノズルにおける誘導帯電方式の水粒子の挙動に着目して帯電噴霧の現象を定量的に検討することを目的としている．実験では，従前の報告例がほとんどない一流体ノズルにおける液膜分離点と比電荷について計測を行った．その結果，液膜分離点に対する誘導電極の相対的な位置が比電荷に大きな影響を及ぼすこと

を見出し，誘導帯電ノズルの設計に関わる知見を得たので報告する．

2. 実験の概要

2.1 誘導帯電方式

Fig. 1 に誘導帯電方式の概略を示す．ノズルから噴霧した作動流体は水膜から水粒子に分裂する．そのノズル先端部に環状の誘導電極を配置し，ノズルと電極間に直流高電圧を印加することによって水粒子は静電気帯電する．帯電した水粒子の電気的な極性は誘導電極と異極性となる．

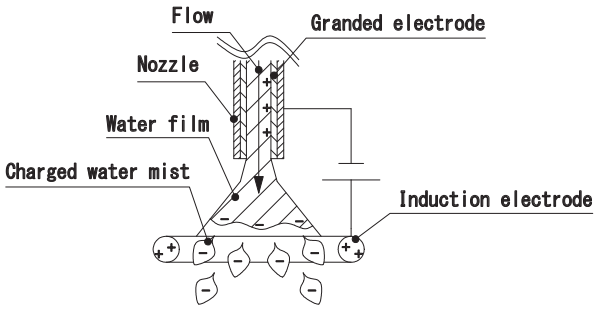


Fig . 1　Explanation of induction charging method.

2.2 供試ノズルと誘導電極

Fig. 2 に供試した円錐噴霧型一流体(ホローコーン型)ノズルの構成を示す．その仕様は放水圧力 P が 1.05 MPa, 放水流量 Q が 1.0 L/min，噴霧角が 100 deg である．ノズル先端（ノズルチップ）はセラミック製を用いた．ノズル本体は絶縁体（塩化ビニル樹脂）を成形して流路と外観を構成した．この流路には管状の接地電極（SUS304 製, 内径 11.6 mm）を配置した．誘導電極は丸棒（SUS304 製，線径 φ5.0 mm）を環状（内径 33.0 mm）に加工したものを使用した．その表面には塩化ビニル樹脂コーティングを施した．誘導電極の電源配線接合部には防水絶縁キャップを用いて漏電を防止した．誘導電極はノズル本体から 3 本のガイドで固定し，ノズル先端から誘導電極環の中心までの距離 z を可変できる構造とした．Table 1 に供試ノズルに関する実験条件を示す．作動流体には井戸水を用いた．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 ℃，導電率が 23.2～23.5 mS/m の条件で実施した．

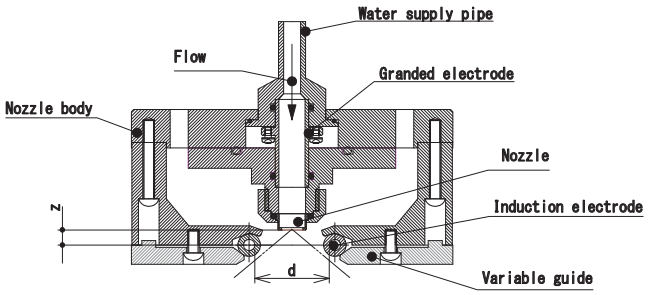


Fig. 2　Experimental nozzle and induction electrode system.

Table 1　Experimental condition.

Fluid	Well water
Applied voltage: V_{in} [+kV]	5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0
Discharge pressure [MPa]	1.05
Flow rate [L/min]	1.0
Wire diameter [mm]	φ5.0
Inner diameter: d [mm]	33.0
From nozzle of range:z [mm]	7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.5

2.3 液膜分離点

Fig. 3 にノズル先端に現れる液膜分離点の測定に用いた実験装置を示す．ここでは誘導帯電方式に用いる誘導電極は付加していない．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）により行った．ノズル部の放水圧力はポンプ本体で調整し，圧力測定は二次側のブルドン管圧力計にて行った．また，液膜分離点の測定には裁縫針（線径 φ1.0 mm）とテスター（フルーク製，Fluke87V）を用いた．裁縫針はテスターのプラス側に結線し，マイナス側はノズル本体の接地電極に接続した．裁縫針は液膜分離点の測定プローブとして Fig.4 に示すようにノズル先端に配置した．プローブが液膜中にある時は導通を示し，液膜外で非導通となる．そして，液膜から水粒子に分離した位置を同定した．その結果，液膜分離点はノズル先端から 9.5 mm に位置していた．

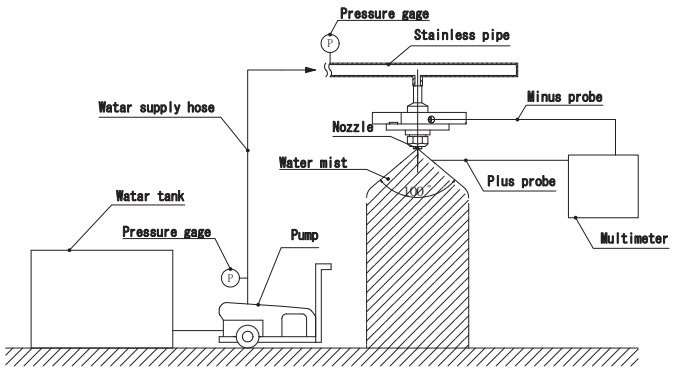


Fig. 3　Experimental equipment for measurement of water-film separation point.

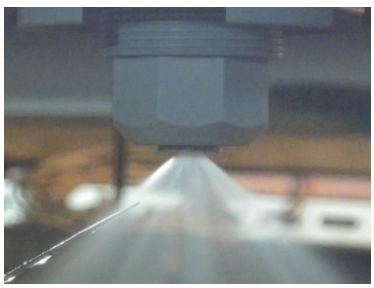


Fig. 4　Needle probe at water-film separation point.

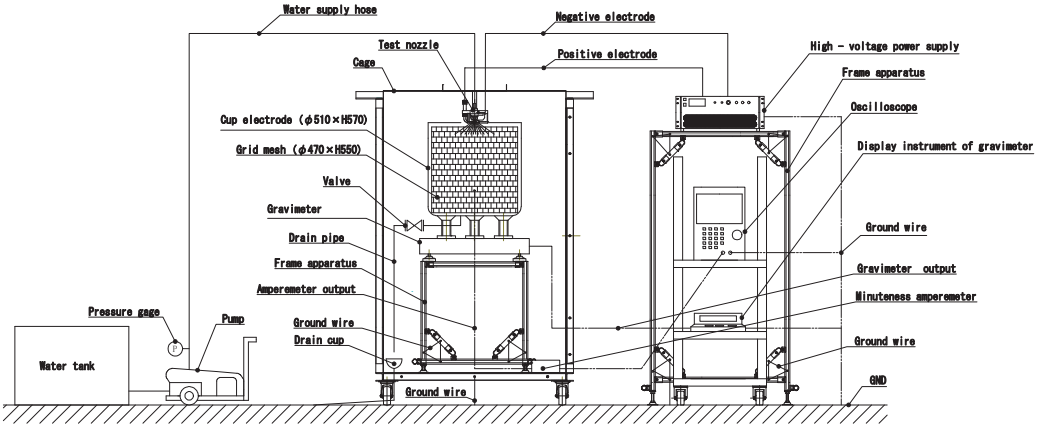


Fig. 5　Experimental equipment for measurement of charge-to-mass ratio by faraday cage.

2.4 ファラデーケージ

Fig. 5 に製作した比電荷計測装置（ファラデーケージ）の実験装置を示す. ファラデーケージ本体は板厚 1.5 mm の SUS304 にて構成されており, 高さ 1.72 m×奥行 1.0 m×幅 1.0 m である．ファラデーケージ天井面に供試ノズルを固定した．誘導電極は直流高電圧電源（松定プレシジョン製，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．これらの配線にはネオン線 （品川電線製, N-EV）を用いた．放水圧力の調整は前述 2.3 項と同様である．電荷を帯びた水粒子を捕えるため，ファラデーケージ内部には円筒型のファラデーカップ（SUS316，φ510 mm×H570 mm）を設けた．更に，カップ内部には微細な粒子を漏らさぬように円筒型のメッシュ（SUS316，φ470 mm×H550 mm）を 3 層構造にて設置した. 水噴霧の質量流量[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圧（V_{cup}：基準電位 0V からの電位差）はオペアンプにより増幅してオシロスコープ（横河電機製，DL750）に記録した. この電圧とオペアンプ内の抵抗値（200 kΩ，2MΩ）から電流値[C/s]を算出した．比電荷[C/kg]は電流値と水噴霧の質量流量[kg/s]から算出し, 比電荷の測定値は 1 分間の時間平均を用いて評価した.

2.5 粒子径の計測方法

Fig. 6 に水噴霧粒子径の測定装置の概略を示す．供試ノズルは地上から 2.5 m の位置にアングル架台を用いて固定し，ノズルの下に画像式ポータブル粒度分布測定装置（Oxford 製，Visisize portable）を設置した．水噴霧粒子径の計測箇所はノズル直下 1.5 m と水平方向に 0.5 m 離れた 2 箇所とした．後者の位置は円錐状水噴霧の外縁に相当する．計測は誘導電極の印加電圧の有無で行った．機器の仕様を Table 2 に示す. 粒子径は, 粒子個数が 7000 個のザウター平均粒子径として評価した.

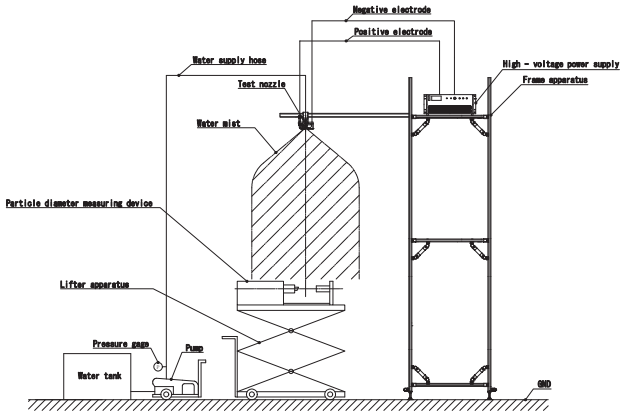


Fig. 6　Experimental equipment for measurement of particle diameter.

Table 2 Experimental condition for measurement of particle diameter.

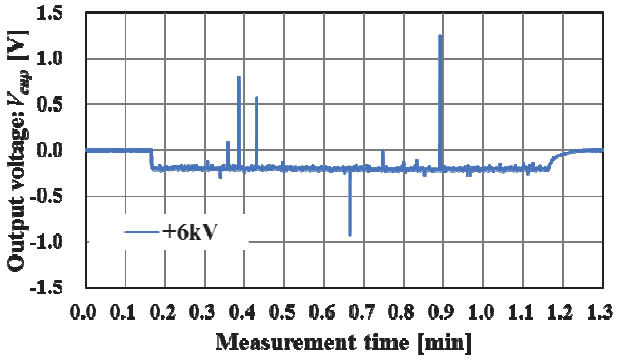
Equipment name	VisiSize Portable
System	Particle Drop Image Analysis
Specification measurement range	10μm～3,900μm
Resolution	1980×1080
Frame rate	30fps
Analytical capability	15,000 particls/s

3. 実験結果および考察

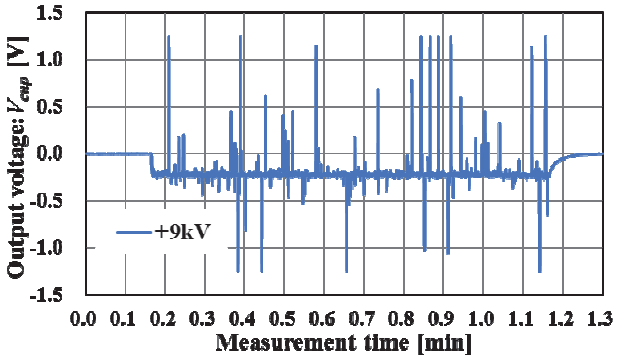
3.1 比電荷の特性

Fig. 7 にファラデーカップにおいて検出された電圧 V_{cup}（接地 0V からの電位）の経時データ例を示す. ここで, 誘導電極の位置 z は 7.5 mm，印加電圧 V_{in} は+6 kV およ

び+9kVである．電圧V_{in}を印加した直後（図中の0.16 min）において，ファラデーカップには帯電した水粒子が到達してV_{cup}が現れた．V_{in}の印加停止直後（図中の1.16 min）は緩やかにV_{cup}が減衰した．V_{cup}の経時データにはスパイク状のパルス電圧が重畳した．このパルス電圧の発生数は印加電圧V_{in}に依存して増加した．電圧V_{in}が比較的高いとき，水粒子の一部が誘導電極の表面に付着し，それが凝集して比較的大きな水滴となってファラデーカップに滴下していた．スパイク状のパルス電圧は，このような水滴が滴下した際に検出されているものと考えられる．また，電圧V_{in}が高くなると，誘導電極の表面に付着した水滴からのコロナ放電パルスの発生が予想されるが，そのパルス幅は一般的にnsオーダーである．Fig. 7に示したスパイク状のパルス電圧のパルス幅と整合していない．比電荷の評価においては，パルス電圧を除いたV_{cup}の時間平均値を用いた．



(a) V_{in} = +6kV.



(b) V_{in} = +9kV.

Fig. 7　Output voltage V_{cup}.

Fig. 8には誘導電極の印加電圧V_{in}を+5 kVから+10 kVまで可変した際の比電荷を示す．誘導電極の位置zは7.0 mmから9.5 mmまで可変している．z=7.0 mmを除いて，印加電圧に応じて比電荷がやや増加した．+9 kVを超えると前述したスパイク状のパルス電圧等の影響を受けて，比電荷が安定しない傾向にあった．z=7.0 mmにおいては，印加電圧の増加に伴い比電荷が低下している．この原因は，帯電した水粒子が噴霧角輪郭（外縁）から飛散することで誘導電極への接触により，比電荷が低下しているものと考えられる．また，比電荷はz=7.5 mmと8.0 mmにおいて比較的に高い値であった．すなわち，誘導電極が液膜分離点（z=9.5 mm）に位置するよりも，わずかにノズル側に近づくと比電荷は増加した．比電荷の増減はノズル先端から誘導電極までの距離，あるいは液膜分離点から誘導電極までの距離に影響を受けると考えられる．二流体ノズルにおいては液膜分離点の近傍に誘導電極を配置すると比電荷が増加することが知られている[3]．本実験で得られた結果から，一流体ノズルにおいては液膜分離点からわずかにノズル側に誘導電極を配置すると比電荷が増加することが分かった．一般に静電誘導は誘導電極に対向する物体の表面に電荷を誘導する．ノズル噴出口から液膜は円錐中空状に噴霧し，液膜分離点近傍まで拡がった領域が液膜表面積の最大となる．これより比電荷の特性は液膜分離点と誘導電極位置の相対的な距離に依存すると考えられる．ただしノズル先端からの液膜分離点の距離は，静電誘導によって変位するかもしれないため，静電誘導状態における液膜分離点位置を検討する必要があると考えている．

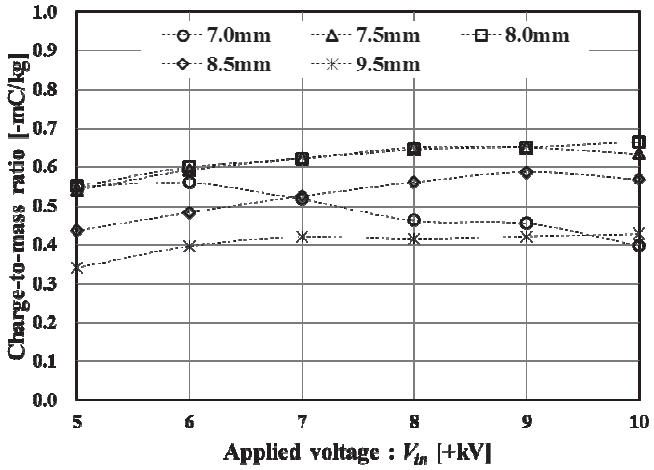
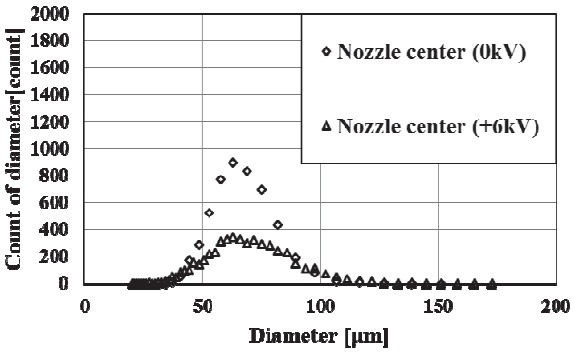


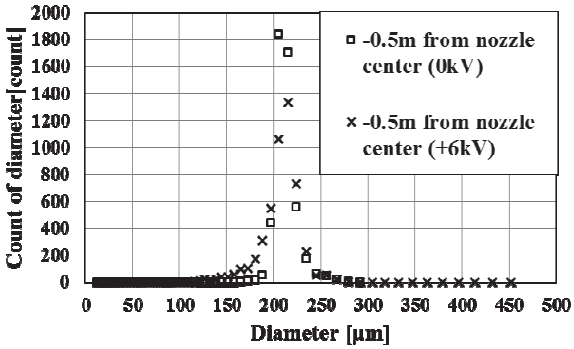
Fig. 8　Characteristics of charge-to-mass ratio as a function of applied voltage V_{in}.

3. 2 水粒子径の特性

前項の比電荷の特性から，z=7.5 mmおよび8.0 mmにおける比電荷が高い値を示していた．代表してFig. 9にz=7.5 mmにおける水粒子径の分布を示す．ここでは，誘導電極の印加電圧V_{in}が0 kVと+6 kVの結果を示した．Table 3はFig. 9に示した粒子径分布から求めたザウター平均粒子径Dの結果を示す．ノズル直下のザウター平均粒子径は水噴霧外縁の粒子径よりも小さな径であった．これは供試ノズルが円錐状に噴霧するためである．また誘導電極の印加電圧有無による粒子径の変化はほぼ見られなかった．印加電圧V_{in}が+6 kV時には，Fig. 9よりザウター平均粒子径に相当する粒子数が無印加時に比べて少ない．これは，水粒子が帯電することによって開放空間中に飛散するため，観測された粒子径のバラつきが大きくなっている．水粒子の飛翔の様子を確認するため，Fig. 10に印加電圧の有無に対する噴霧の可視化を示す．YAGレーザー（カトウ光研製,G6000）のスリット光（スリット幅1.0 mm）を照射して可視化を行ったものである．同図より，誘導電極への印加電圧に伴って水粒子が噴霧外縁へ飛散している様子が確認出来た．



(a)　Position of nozzle center.

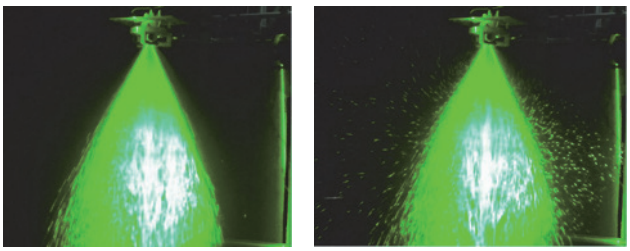


(b)　Position -0.5 m from nozzle center.

Fig. 9 Distribution of particle diameter in water mist.

Table 3 Result of sauter mean diameter.

Measurement position	V_{in} [kV]	Sauter mean diameter: D [μm]
Nozzle center	0	70.7
	+6	73.6
-0.5m from the nozzle center	0	216.8
	+6	214.8



(a) V_{in} = 0 kV.　　(b) V_{in} = +6kV.

Fig. 10 Visualization of flowing water mist from electrostatic induction nozzle.

3.3 レイリー限界との関係

本実験における水粒子径は，主に 70 μm と 217 μm を各々中心として分布しているものと考えられる．本実験では Table 3 に示した値の平均値をザウター平均粒子径として取り扱う．ザウター平均粒子径 D は 144 μm となった．水粒子の帯電量の限界を指標とするレイリー限界（理論最大帯電量:q_{limit}）は次式で示される [14].

$$q_{limit} = 8\pi(\varepsilon_0 \gamma r^3)^{1/2} \qquad (1)$$

ここで，ε_0 は真空の誘電率（8.854×10^{-12} F/m），γ は水の表面張力（72.75 mN/m，水温 20℃の時の値），r は水粒子半径[m]である．式(1)より水粒子の理論最大帯電量 q_{limit} は 7.9 mC/kg となった．Fig.11 は z=7.5 mm において得られた比電荷（q_{exp}）と理論最大比電荷（q_{limit}）との割合を示す．

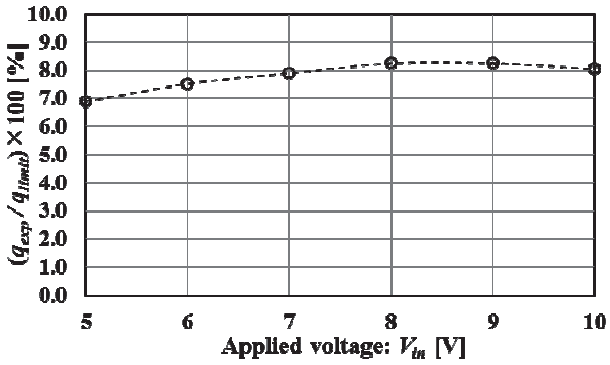


Fig.11 q_{exp}/q_{limit} as a function of V_{in} for z=7.5 mm.

実験より得られた水粒子の比電荷は理論最大比電荷に対して約 8%程度の比電荷であることが分かった．水粒子径が小さい程この割合は大きくなるものと考えられる．S.E.Law[15]は放水流量 73 mL/min，平均粒子径 30 μm の二流体ノズルを用いて比電荷 12 mC/kg を得ている．この値はレイリー限界の 23 %に相当する．本実験では一流体ノズルを対象として，放水流量が約 14 倍も多いため直接比較することは出来ない．一方，本実験から得られた比電荷については，液膜分離点と誘導電極の相対的な位置が大きく影響することを見出した．今後は，実験データの蓄積を経て一流体誘導帯電ノズルの設計に資する知見を求めていく予定である．

4. まとめ

本実験で得られた主な知見を整理して示す．

(1) 本実験で供試したホローコーンノズル（一流体ノズル）の液膜分離点を測定した．液膜分離点はノズル先端から約 9.5 mm であった．比電荷は誘導電極を液膜分離点よりもわずかにノズル側に配置すると比較的高い値を示した．

(2) 水粒子径は誘導電極の印加電圧の有無によらず，主に 70 μm と 217 μm を各々中心とした分布であった．

(3) レイリー限界から算出した理論最大比電荷と実験から得た比電荷の割合を求めた．本実験で得られた比電荷は，レイリー限界の約 8%であることを確認した．

今後は静電誘導状態における液膜分離点の変位の有無を検討する予定である．

謝辞

誘導帯電ノズルの研究開発および実現場への適用を目指し，鹿島建設株式会社の高木賢二様，挟間貴雅様，池松建治様，末吉隆信様に謝意を表します.

参考文献

1) 静電気ハンドブック（第 1 版），静電気学会編，オーム社，pp.711-712 (1985).
2) 静電気ハンドブック，静電気学会，pp.754，オーム社，(2006).
3) S.E.Law : Emmbedded-Electrode Electrostatic-Induction Spray-Charging Nozzle : Theoretical and Engineering Design，TRANSACTIONS of the ASAE，No.21，pp.1096-1104 (1978).
4) 松尾昌樹，他：静電散布ノズルの電気的特性，千葉大学学術報告，Vol.37，pp.1-6 (1986).
5) 飯本光雄，他：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，Vol.39，pp.9-15 (1987).
6) 内野敏剛，他：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，Vol.42， pp.1-5 (1989).
7) 松尾昌樹，他：静電式スピードスプレーヤの研究，千葉大学学術報告，Vol.44，pp.99-104 (1991).
8) 高木賢二，他：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，pp.887-888 (2013).
9) 池松建治，他：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，pp.563-564 (2013).
10) 高木賢二，他：マイクロ EC ミストの開発，鹿島技術研究所年報，vol.64，pp.1-6 (2016).
11) 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, Vol.69, No.3，pp.1-5 (2017).
12) T. Tsuji, et.al，WIPO，PCT/JP2009/058246 (2009).
13) Hazmi Abdul Halim, et.al: Influence of Electrostatic Induction Electrode Configuration on Water Mist Charging, IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.231-234 (2011).
14) RAYLEIGH Lord: On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity, Philosophy magazine, Vol.14, pp.184-186 (1882).
15) S.E.Law : Electrostatic pesticide spraying ; concepts and practice, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol.IA-19，No.2， pp.160-168 (1983).