

# 静電誘導帯電方式によるホローコーンノズルの 比電荷特性に関する研究

吉田 哲雄<sup>\*、1</sup>, 辻 利秀<sup>\*</sup>, 大山 龍一郎<sup>\*\*</sup>

(2024年3月25日受付; 2024年5月10日受理)

## Study on Characteristics of Charge-to-Mass Ratio of a Hollow Cone Nozzle Using the Electrostatic Induction Charging Method

Tetsuo YOSHIDA<sup>\*、1</sup> Toshihide TSUJI<sup>\*</sup> and Ryu-ichiro OHYAMA<sup>\*\*</sup>

(Received March 25, 2024; Accepted May 10, 2024)

This study investigates the characteristics of the charge-to-mass ratio of a hollow cone nozzle using the electrostatic induction charging method. We investigated the characteristics of the electrostatic induction charging of water particles experimentally. By utilizing hollow cone nozzles with varying flow rates, we determined the charge-to-mass ratio under various temperatures. The evaluation of the charge-to-mass ratio of water mist was performed using a Faraday cage. Furthermore, we measured the water mist particle diameter during electrostatic induction charging and assessed the performance of the nozzle in relation to the Rayleigh limit. These experimental findings serve as foundational research to demonstrate the effectiveness of the induction electrode configuration and nozzle performance.

### 1. はじめに

直接帯電やコロナ放電を利用した帯電散布は、火災により発生する煙に対して高い消煙効果が示されている<sup>1-3</sup>。帯電散布の手段として、直接帯電方式は感電等の恐れがあること、さらにポンプやタンク等の装置全体を接地（アース）から絶縁する必要があり、技術面、コスト面で困難となる。コロナ放電方式は、ノズル先端に配置する針状電極に数十キロボルトの印加電圧を加える構造のため、十分な感電対策を必要とする。これらに対して、誘導帯電方式はノズル先端部の噴霧外縁部に誘導電極を配置する構造で、比較的低い電圧で水を霧化して帯電させることができる。

本研究では、新しい火災の消火消煙設備として誘導帯電方式による帯電水噴霧の適用を検討してきた<sup>4-10</sup>。誘導帯電方式の帯電噴霧を消防防災設備として利用する上では、設備費用の面と、高電圧機器を取扱うことから施工を含め

て安全に使用できる設備であることが望まれる。誘導帯電方式の二流体ノズルを用いる場合には、タンクとポンプ、直流高電圧電源といった設備の他にノズルへ圧縮空気を供給するコンプレッサー設備が必要となる<sup>11</sup>。一流体ノズルを用いる場合は、二流体ノズルに比べて水粒子径が大きいことから、広範囲に散布が可能となる。また、放水流量が多く、火災火源に対する消火が可能となる。しかし、一流体ホローコーンノズルを使用した先行研究は報告されているものの、農業散布に関する農業分野や塗装分野に限定的である<sup>12-19</sup>。これまでに大流量ノズルを用いた帯電噴霧に関する研究報告は少なく、帯電性能を詳細に示した報告もないのが現状である。

本研究は、誘導帯電方式による一流体ノズルの適用を検討するため、その帯電噴霧の特性を実験より調査したものである。実験では、少流量から大流量までの一流体ホローコーンノズルを供試した。本報告では、帯電噴霧ノズルの構造を示すと同時に、帯電噴霧における比電荷の増減に関する影響因子、誘導電極への印加電圧と水粒子径の関係を実験的に評価した内容について述べる。

キーワード：誘導帯電、一流体ノズル、比電荷、粒子径、レイリー限界

\* 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

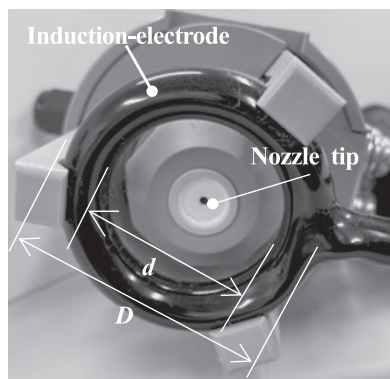
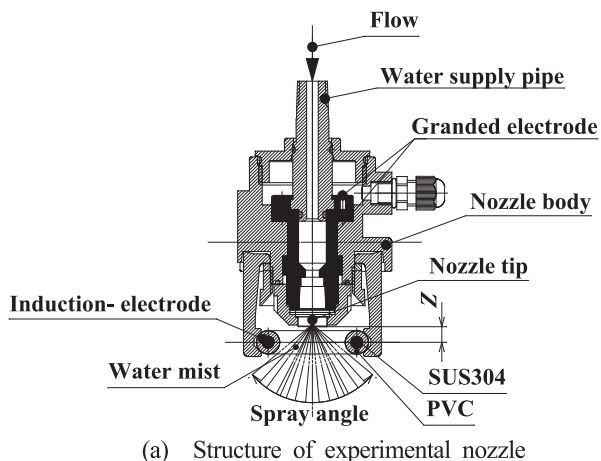
<sup>1</sup> te-yoshida@hochiki.co.jp

DOI: <https://doi.org/10.34342/iesj./iesj.2024.48.4.137>

### 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

噴霧ノズルに金属製ノズルを使用する場合は、高電圧の印加による気中放電を防ぐ対策が必要である<sup>20</sup>。気中放電の影響を除いて静電噴霧の状態を確認するためには、電気絶縁性の高い非金属製のノズルを用いることが望ましい<sup>21,22</sup>。図1に実験に供した (a) 供試ノズルの構成と (b) 誘導電



(a) Structure of experimental nozzle

(b) induction-electrode

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

極を示す。本研究においては樹脂とセラミックを用いた一流体ホローコーンノズルを製作して実験に供試した。ノズル本体は絶縁体（セラミック製オリフィスと硬質ポリ塩化ビニル樹脂）を用いて成形し、ノズル直前の水流路にはSUS製の導尿管（内径φ12 mm）を配置して、これを接地電極とした。供試ノズルのオリフィスは放水圧力  $P$  が1.0 MPa一定時において、放水流量が0.1 L/min（ノズル口径φ0.3 mm）、1.0 L/min（ノズル口径φ1.5 mm）、7.0 L/min（ノズル口径φ4.0 mm）の3つのセラミック製ノズルチップを用いた。各種ノズルの仕様を表1に示す。ノズルへの水供給はプランジャーポンプ（キョーワ製、KYC300-6）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。誘導電極はノズル先端の噴霧空間に環状電極を配置して、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続した。配線にはネオン線（品川電線製、N-EV）を用いた。この誘導電極は線径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のディップコーティング（膜厚約2.0 mm）を施したものである。表1にはノズル先端から誘導電極環中心までの距離  $z$ 、環状の誘導電極外形  $D$  および内径  $d$  を示している。誘導電極の形状は、誘導電極内径部に液滴が接触しない大きさを基準としている。また、誘導電極の配置  $z$  は比電荷が高まる位置を基準としている<sup>9)</sup>。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。使用した井戸水の分析値は表2に示す。

2.2 水粒子の比電荷測定

噴霧された水粒子の帯電量の評価には、比電荷を用いた<sup>7,9)</sup>。比電荷の測定は前報<sup>7)</sup>と同様にファラデーケージ法

表1 ノズルの仕様  
Table 1 Specifications of nozzle.

Nozzle tip [L/min]	0.1	1.0	7.0
$P$ [MPa]	1.0	1.0	1.0
Spray angle [deg]	75	100	90
induction electrode [mm]	$D$ φ32.0 $d$ φ24.0	$D$ φ43.0 $d$ φ33.0	$D$ φ65.0 $d$ φ55.0
$z$ [mm]	0.5	8.0	5.0

表2 井戸水の分析値  
Table 2 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

により行った。すなわち、ファラデーケージの外容器（SUS304、高さ  $H$  1.72 m × 奥行  $D$  1.0 m × 幅  $B$  1.0 m、板厚 1.5 mm）は接地した。水粒子を捕捉する内容器（SUS304、直径 470 mm × 高さ 550 mm、板厚 1.5 mm）の内側には、水はね防止用に円筒型の3層メッシュ（SUS316、8、20、および 50 メッシュ）の構造とした。供試ノズルはファラデーケージの天井面に固定した。ノズルへの水供給はプランジャーポンプ（キョーワ製、KYC300-6）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  $M$  [kg/s] は内容器の下部に設けた重量計（ザルトリウス社製、FD3001GG-H）により計測した。水粒子の電荷量は、内容器に接続したオペアンプにより電荷の時間変化量（=電流）を抵抗  $R$  (200 kΩ) により電圧変換してオシロスコープ（横河電機製、DL750）に記録した。水粒

子の比電荷  $q_{mist}$  [C/kg] は式(1)より算出した.

$$q_{mist} = \frac{V_{average}}{R} \cdot \frac{1}{M} \quad (1)$$

誘導電極への印加電圧  $V_m$  は1分毎に1 kV から6 kV まで1 kV 刻みで昇圧した. 電荷の時間変化量は時間平均を用いて評価した. 測定は各1回ずつ行った. 比電荷の測定は2年間におよび, 外気温等の変化に対する各供試ノズルについて行った.

### 2.3 比電荷の特性

誘導電極への印加電圧  $V_m$  に対する比電荷  $q_{mist}$  の特性を図2に示す. プロットは2年間における比電荷の平均値とバラつき (標準偏差) である. 比電荷は印加電圧  $V_m$  に依存して増加し, 一流体ノズルにおいて一般的に観測されている  $10^{-4}$  C/kg のオーダーである<sup>12)</sup>. 比電荷は放水流量が0.1 L/min において最も高く, 7.0 L/min で最も低い結果となった. 放水流量の増量に伴い比電荷が低くなる要因は, 少量水に比べて液滴の粒子径が大きく, 比表面積が小さくなるためであると考えられる. 先行研究<sup>12,14,20)</sup>でも述べられているように少量水であれば水粒子の比電荷は高く, 大流量となれば比電荷は低くなる傾向となっている. 図3は月毎の比電荷と気温, 水温の関係の一例として印加電圧  $V_m$  が

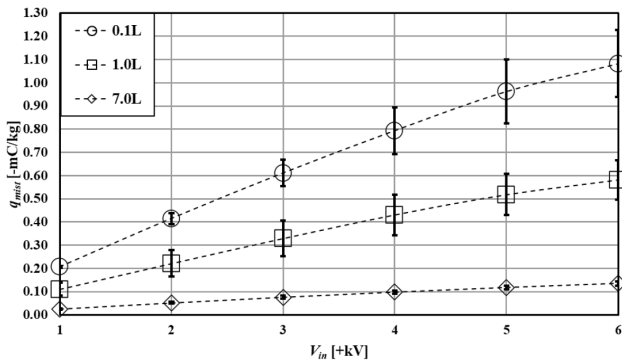


図2 印加電圧  $V_m$  に対する比電荷  $q_{mist}$  の特性  
Fig.2 Characteristics of  $q_{mist}$  as a function of  $V_m$ .

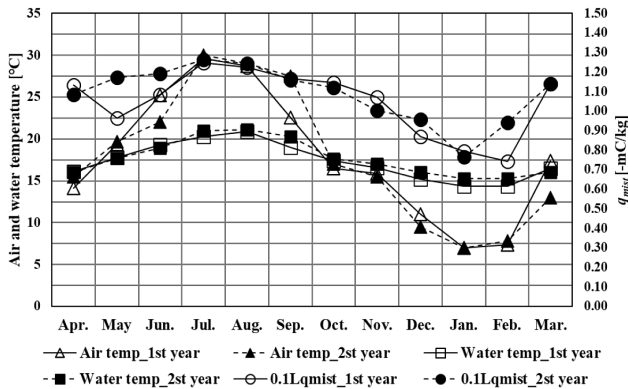


図3 気温と水温に対する  $q_{mist}$  の特性 ( $Q=0.1$  L/min,  $V_m=6$  kV)  
Fig.3 Characteristics of  $q_{mist}$  as a air and water temperature ( $Q=0.1$  L/min,  $V_m=6$  kV).

6 kV, 放水流量が0.1 L/min の結果を示す. この特性から比電荷が水温と外気温に影響していることが分かる. 供試した井戸水の水温は外気温に比べて変動幅が少ないが, 季節によって15.0~20.0℃前後の変動がある. 比電荷の増減は水温と外気温の変動に合わせて変化していることがわかる. すなわち, 水温と外気温が高い夏場では比電荷が高くなり, 冬場では低くなる傾向にある. このような傾向は, 放水流量が1.0 L/min および7.0 L/min においても同様であった. そこで, 実験では気温を強制的に変化させた場合での比電荷を測定することとした. 作動流体の水温変動を防ぐために, タンク内の水を常に溢れさせる処置を施して水温管理を行った. ノズルの配管内部にはk熱電対 (坂口電熱製, シース外径φ1.0 mm) を配置し, データロガー (GRAPHTEC 製, GL240) にて水温の変動がないことを確認した. 外気温を強制的に変化させるために, スポットクーラー (日立アプライアンス製, SR-P20YEB, 100 V, 1.9 kW) と石油ヒーター (静岡製機, VAL6YDK, 100 V, 38 kW) をファラデーケージの正面に設置した. ファラデーケージ内の温度はケージ内に線径φ1.0 mm シースk熱電対を配置して, 1秒毎に温度を測定した. 図4と図5に外気温を変化させた際の比電荷の測定結果を示す. 図4は放水流量が0.1 L/min, 図5は放水流量が1.0 L/min であり, 印加電圧  $V_m$  が6 kV の時の結果である. 比電荷にはバラつき

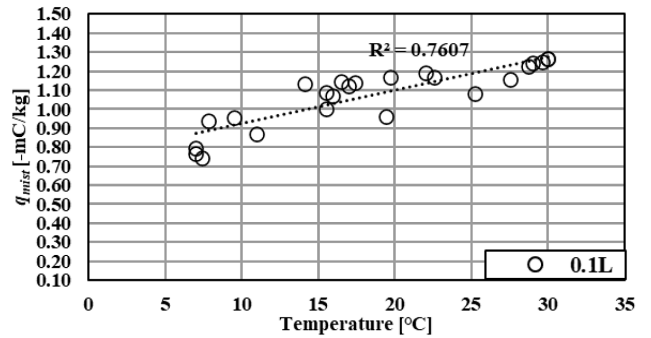


図4 0.1 L/min ノズルでの気温に対する  $q_{mist}$  の特性  
Fig.4 Characteristics of  $q_{mist}$  as a temperature for 0.1 L/min nozzle.

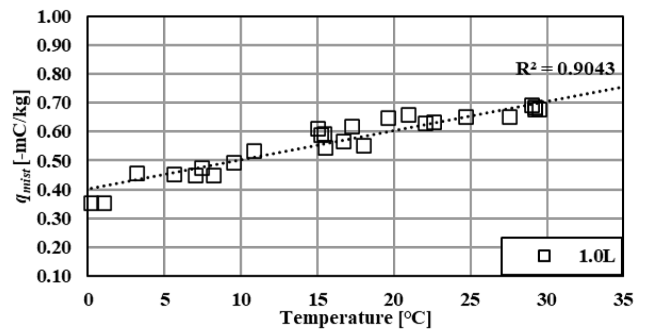


図5 1.0 L/min ノズルでの気温変化に対する  $q_{mist}$  の特性  
Fig.5 Characteristics of  $q_{mist}$  as a temperature for 1.0 L/min nozzle.

が見られるものの、外気温が高いと比電荷が増加する。このことから、比電荷の増減には水温よりも気温が影響するものと考えられる。気温が高い状態では空気粘度  $\mu$  が高く、水の粘度  $\mu$  が小さくなる。ノズルから噴出する水は液膜を経て水粒子に分裂する<sup>7)</sup>。その際、水温は外気温と熱的平衡状態に向かい、気温が高い状態での水の粘度が下がり、分裂し易くなることから比電荷が増加するのではないかと考えられる。

### 3. 水粒子径の特性

#### 3.1 水粒子径の測定

水粒子は静電誘導により微粒化する<sup>23)</sup>。供試したホローコーンノズルの噴霧は中空円錐型になるため、噴霧外縁において噴霧流量が多くなる。そこで、供試した各ノズルについて、印加電圧  $V_m$  が 0~6 kV における噴霧外縁部での粒子径を測定した。図 6 に装置の概略図を示す。表 3 に使用した粒子径分布測定装置 (Oxford 製, Visisize portable) の仕様を示す。噴霧ノズルは地上から 1.5 m の位置のアンクル架台に固定した。ノズル直下から水平方向に 375 mm の位置に粒子径分布測定装置を設置した。水粒子径は粒子個数が 7000 個のザウター平均粒子径  $D_{32}$  として評価を行った。測定は各条件につき 3 回ずつ行った。なお、 $D_{32}$  の算出は計測した液滴の体積総和と表面積総和の比より算出した。

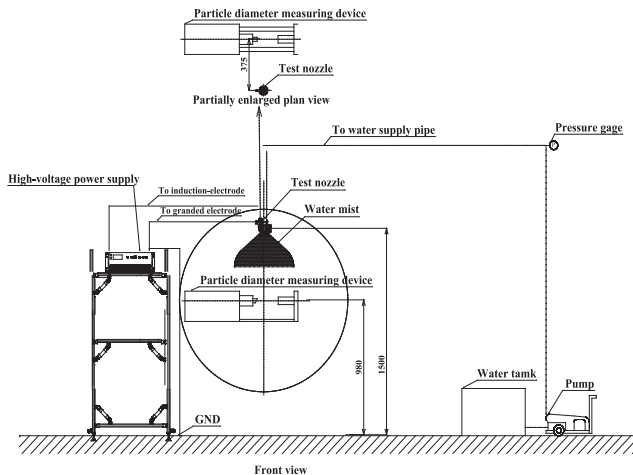
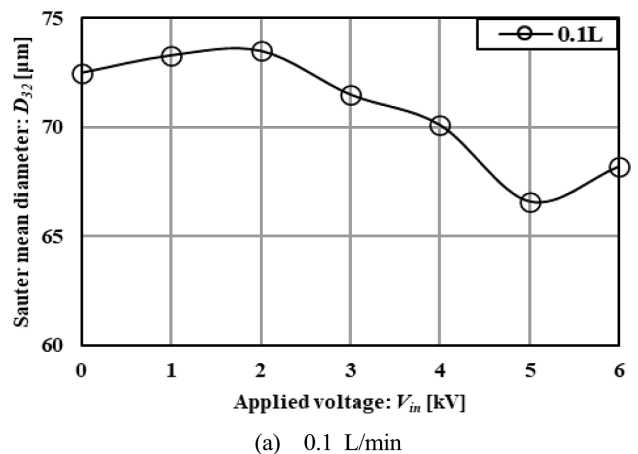


図 6  $D_{32}$  測定の実験装置  
Fig.6 Experimental equipment for measurement of  $D_{32}$ .

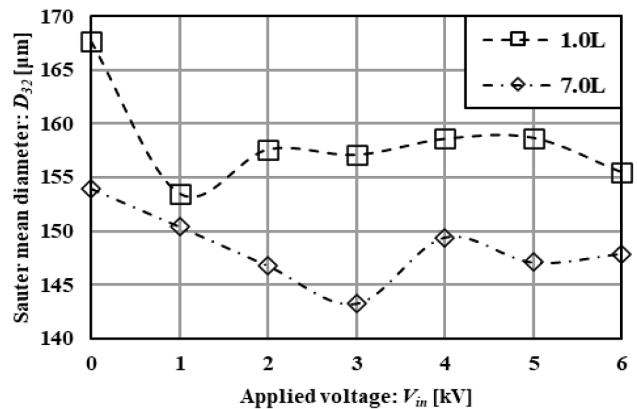
表 3 測定装置の仕様  
Table 3 Specifications of measuring device.

Equipment name	VisiSize Portable
System	Particle Drop Image Analysis
Specification measurement range	10 $\mu\text{m}$ ~3,900 $\mu\text{m}$
Resolution	1,980 $\times$ 1,080
Frame rate	30 fps
Analytical capability	15,000 particles / s

図 7 に印加電圧  $V_m$  が 0~6 kV における  $D_{32}$  の平均値を示す。図 7(a) は放水流量が 0.1 L/min における  $D_{32}$  の結果である。図 7 (b) は放水流量が 1.0 L/min および 7.0 L/min における  $D_{32}$  の結果である。図 7 (a) に示した放水流量が 0.1 L/min では  $V_m$  が 0~2 kV において  $D_{32}$  に差異が見られなかった。3 kV を超えると  $D_{32}$  が小さくなっていることがわかった。印加電圧 0 kV (静電霧化なし) での  $D_{32}$  は 72.5  $\mu\text{m}$ , 6 kV において 68.2  $\mu\text{m}$  であった。その差は 4.3  $\mu\text{m}$  である。図 7(b) に示した放水流量が 1.0 L/min および 7.0 L/min における  $D_{32}$  は  $V_m$  の増加に伴い、静電微粒化していることがわかった。 $D_{32}$  は印加電圧 0 kV (静電霧化なし) に比べて粒子径が小さい。放水流量が 1.0 L/min では、静電霧化なしでの  $D_{32}$  は 167.7  $\mu\text{m}$ , 6 kV において 155.5  $\mu\text{m}$  となり、その差は 12.2  $\mu\text{m}$  である。放水流量が 7.0 L/min では、静電霧化なしでの  $D_{32}$  は 153.9  $\mu\text{m}$ , 6 kV において 147.9  $\mu\text{m}$  となり、その差は 6.0  $\mu\text{m}$  である。なお、静電霧化なしでの  $D_{32}$  は放水流量が 0.1, 7.0, 1.0 L/min の順に大きい。これは製作したノズルチップの機械的な要因で決まった値である。比電荷の特性として前述したように、印加



(a) 0.1 L/min



(b) 1.0 L/min and 7.0 L/min

図 7 印加電圧  $V_m$  に対する平均粒子径  $D_{32}$  の特性  
Fig.7 Characteristics of  $D_{32}$  as a function of  $V_m$ .



電圧  $V_m$  の増加によって比電荷も増加する。粒子径が微粒化する要因としては、比電荷が増加することで帯電した水粒子表面の斥力が増すため静電微粒化が促進されるものと考えられる。印加電圧  $V_m$  がある値 (0.1 L/min では 3 kV, 1.0 L/min と 7.0 L/min では 1 kV) を超えると微粒化が進み、粒子径が安定する傾向にあることがわかった。

### 3.2 レイリー限界と比電荷の関係

レイリー限界 (理論最大比電荷  $q_{limit}$ ) は、帯電した水粒子表面の反発力が表面張力を超えて、水粒子が分裂する際の電荷量である<sup>24)</sup>。  $q_{limit}$  は式(2)で表される。ここで、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率 ( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m),  $\gamma$  は水の表面張力 ( $72.75 \times 10^{-3}$  N/m, 水温 20℃ の時の値),  $r$  は水粒子半径 [m] である。

$$q_{limit} = 8\pi(\epsilon_0\gamma r^3)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

レイリー限界は水粒子の帯電量の限界を示す指標となる。ここでは、実験より得られた比電荷  $q_{mist}$  と  $q_{limit}$  の比を算出することで、放水流量の影響を検討した。図 8 に印加電圧  $V_m$  に対する  $q_{mist} / q_{limit}$  を示す。  $q_{mist}$  には測定期間 1 年目と 2 年目の各月で最も高い値を用いた。その結果、  $q_{mist} / q_{limit}$  は放水流量が 1.0 L/min, 0.1 L/min, 7.0 L/min の順に小さくなった。図 2 に示したように比電荷  $q_{mist}$  は放水流量の増加に伴い低下し 0.1, 1.0, 7.0 L/min の順に小さい。また、  $D_{32}$  は図 7 に示したように 1.0, 7.0, 0.1 L/min の順に小さい。すなわち、  $q_{mist} / q_{limit}$  は放水流量の増加に依存していない。噴霧粒子径の全ての粒子径を  $D_{32}$  と仮定し、更に水粒子を球状と仮定して全ての粒子の表面積を積算すると、1.0 L/min の時に表面積が最も大きくなる。これは図 8 に示した  $q_{mist} / q_{limit}$  が 1.0 L/min の時に最も高いことに対応していた。山根<sup>12)</sup> は、一流体ホローコーンノズルを用いた実験 (放水流量  $Q = 0.56 \sim 2.6$  L/min の範囲限定) において  $q_{mist} / q_{limit}$  は 1~3.6% 程度であったと述べている。S.E.Law<sup>20)</sup> は、放水流量 73

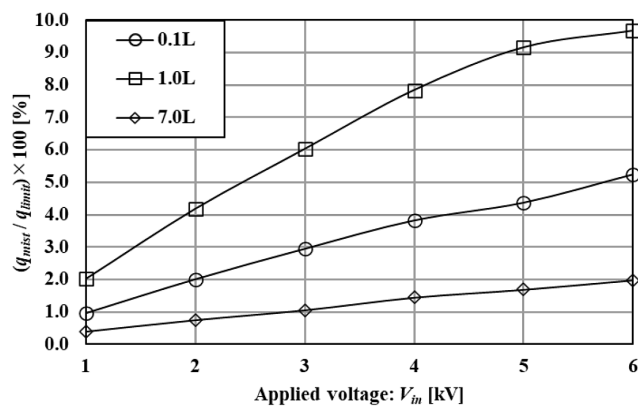


図 8 比電荷  $q_{mist}$  とレイリー限界  $q_{limit}$  の関係  
Fig.8 Relation between  $q_{mist}$  and  $q_{limit}$ .

mL/min, 平均粒子径 30  $\mu\text{m}$  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  $q_{mist} / q_{limit}$  にすると 23% に相当する。一流体ノズルと比較して放水流量および粒子径が小さい二流体ノズルでは、比電荷がより大きくなる傾向がある。図 8 に示した  $q_{mist} / q_{limit}$  は放水流量が 0.1~7.0 L/min の範囲で 0.5~9.5% であった。この割合は放水流量が比較的多くなる一流体ノズルを用いた場合の一つの目安になるものと考えられる。

### 4. まとめ

本研究では一流体ホローコーンによる水噴霧の比電荷  $q_{mist}$  を 2 年間の月毎に測定した。併せて誘導電極の印加電圧  $V_m$  に対するザウター平均粒子径  $D_{32}$  を測定した。実験時の主なパラメーターは外気温と放水流量とした。本研究で得られた結果を以下に纏める。

- (1)  $q_{mist}$  は  $V_m$  の増加に依存して増加し、放水流量の増加に依存して減少した。その値は  $10^{-4}$  C/kg オーダーであった。外気温が高い月には  $q_{mist}$  も増加する傾向が見られた。
- (2)  $D_{32}$  は  $V_m$  の増加に依存して減少する傾向を示した。その値の範囲は 65~170  $\mu\text{m}$  であった。水粒子の微粒化は  $V_m$  がある値 (0.1 L/min では 3 kV, 1.0 L/min と 7.0 L/min では 1 kV) を超えると粒子径が安定する傾向を示した。
- (3) レイリー限界  $q_{limit}$  に対する比電荷の割合  $q_{mist} / q_{limit}$  は、放水流量の増加に依存して減少した。放水流量 0.1~7.0 L/min において  $q_{mist} / q_{limit}$  は 0.5~9.5% であった。

実際の火災現場での消火活動は、雰囲気温度が 100℃ 以上の高温環境となる。高温環境における比電荷の特性を知ることが今後の対応すべき課題となった。

### 参考文献

- 1) 伏見 英, 関口 研: 静電噴霧による消煙実験について (第 1 報). 消防科学研究所報, **21** (1984) 75
- 2) 脇 賢, 神田 淳, 伏見 英, 関口 研: 静電噴霧による消煙実験について (第 2 報). 消防科学研究所報, **22** (1985) 49
- 3) 上野 幸, 清国宣明, 高橋武男: 静電消煙器による密閉空間の消煙現象. 静電気学会誌, **2** [5] (1978) 316
- 4) 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 (2010)
- 5) 辻 利秀, 吉田哲雄, ホーチキ(株): 火災防災装置. 帯電散布ヘッド及び帯電散布方法. 特許第 5702171 (2012)
- 6) 辻 利秀, 吉田哲雄, ホーチキ(株): 火災防災装置, 帯電散

- 布装置, 帯電散布ヘッド, 消火剤散布方法及び帯電. 特許第 5797906 号 (2015)
- 7) 吉田哲雄, 辻 利秀, 大山龍一郎: 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. 静電気学会誌, **43** [4] (2019) 177
- 8) 吉田哲雄, 辻 利秀, 大山龍一郎, 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. 東海大学紀要工学部, **58** [2] (2018) 21
- 9) 吉田哲雄, 静電誘導帯電方式における一流体水噴霧ノズルの比電荷特性に関する研究. 東海大学, 甲第 1097 号, 博士学位論文 (2020)
- 10) 辻 利秀, 吉田哲雄, ホーチキ(株): ミスト噴射ノズル. 意匠登録第 1691910 号 (2021)
- 11) 野口真太郎, 大久保精二, 宮坂政司, 星野吉明, 所 孝明: 2流体ノズルを用いた水損低減型消火システム. 三菱重工技報, **43** [1] (2006) 42
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 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
- 18) 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
- 19) 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
- 20) S.E.Law and H.D.Bowen: Charging liquid spray by electrostatic induction. Transactions of the ASAE / American Society of Agricultural Engineer, **9** [4] (1966) 501
- 21) 松尾昌樹, 内野 敏: 樹脂製 2流体ノズルの静電散布特性. 農業機械学会関東支部大会講演要旨, **24** (1988) 70
- 22) 池松建治, 高木賢二, 挟間貴雅, 佐野雄紀, 辻 利秀, 吉田哲雄, 鹿島建設(株), ホーチキ(株): 帯電水粒子散布装置. 特許第 5890240 号 (2013)
- 23) 棚沢 泰, 荒木信幸: 静電気力による均一微粒化. 日本機械学会論文集 (第 2 部), **37** [298] (1981) 1178
- 24) RAYLEIGH Lord, On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity, Philosophy magazine, **14** (1882) 184