

東海大学大学院令和元年度博士論文

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

指導 大山 龍一郎 教授

東海大学大学院 総合理工学研究科

総合理工学専攻

吉田 哲雄

目次

第1章 序論

1.1 研究背景	1
1.2 静電噴霧の方式と実用事例の背景	4
1.3 研究課題	9
1.4 実験装置の概略	10
1.5 研究の目的と本論文の構成	14
[第1章の参考文献].....	16

第2章 液膜分離点の評価

2.1 はじめに.....	20
2.2 実験装置および実験方法.....	20
2.2.1 供試ノズル	20
2.2.2 測定装置および方法	24
2.3 可視化実験の結果	27
2.4 触針法の結果	30
2.5 考察	35
2.6 まとめ	36
[第2章の参考文献].....	37

第3章 比電荷の評価	
3.1 はじめに.....	38
3.2 実験装置および実験方法.....	38
3.3 実験結果.....	41
3.4 考察.....	44
3.4.1 供試ノズルと誘導電極の最適化.....	45
3.4.2 静電誘導による噴霧水の粒径.....	52
3.4.3 レイリー限界の評価.....	59
3.5 まとめ.....	62
[第3章の参考文献].....	64
第4章 結論.....	65
謝辞.....	69

第 1 章 序論

1.1 研究背景

本研究の背景は浮遊粉じんの洗い落とし(除塵)を対象とした環境衛生上の課題である。高度経済成長期に建設されたビル等のリニューアルによって、図 1.1 に示すような(重機による)解体工事やダンプ走行により粉じんが発生する。発生した粉じんは近隣の人家や作業現場において健康を害す大きな影響を与えている。一度浮遊した粉じんは水のみでの散水では捕捉および洗い落とすことができない。そのため、作業現場では浮遊粉じんによるじん肺が問題となっている。特に、粒子径が $10\mu\text{m}$ 以下の浮遊粉じんは呼吸器官に容易に達する。これまでに浮遊粉じん抑制の対策として、粉じん抑制剤や防塵シートによる対策が施されてはいるものの決定的な解決には至っていない。

本研究の着想は、飛散した浮遊粉じんの除去を実施するにあたり、農薬静電散布が農薬水溶液を微粒化して帯電散布することにより葉・枝・幹への農薬付着効率が良くなること、及び葉の裏面への付着も増加することに端を発したものである[1.1]。これまでに著者は流量が比較的多い一流体ノズル(1.0 L/min の流量)を用いて、誘導帯電方式の静電噴霧の研究を行ってきた。その結果、比電荷の高い帯電した水粒子が空間中の浮遊粉じんに静電誘導を生じさせて、グレーディエント力(不平等電界中で誘電体が電界の大きい方に引き寄せられる力)により粉じんを吸着して捕らえることで粉じん濃度の低減効果があることを見出してきた[1.2-1.8]。

また、本研究では他の背景として消防防災分野への適用がある。消防防災への産業用途においては、消火薬剤を含有しない消火水を散布する消火設備が安価であり、環境及び人体にやさしい水を消火剤とすることが望まれる。すなわち、水系消火設備

(1号消火栓:130~264 L/min, 2号消火栓:60~100 L/min, スプリンクラー:50 L/min または 80 L/min 等)に比べて大幅に少ない水量で高い消火性能を有することが求められている。併せて火災時に発生する有害な煙の除去が可能な次世代消火システムの研究開発が望まれている。消防ノズルによる消火と消煙性能の向上には、直接帯電方式を利用した静電噴霧により効果があることが知られている[1.9-1.10]。しかしながら、直接帯電方式を用いた静電噴霧ではポンプおよびタンク等の設備を接地から浮かす必要があるためシステムとして大掛かりとなり実用化には至っていない。さらに静電気を利用し、密閉された空間において煙の低減効果が知られている[1.11]。

著者は誘導帯電方式の静電噴霧を用いて、比電荷の高い帯電した水粒子が未燃焼材料部分への水付着量を増加させることが可能であること、通常の散水では困難な部位(燃焼材料の裏面側や入り組んだ部位)への水付着効果を有すること、煙の除去に効果があることを見出してきた[1.12-1.16]。その後、一流体ノズルを用いたコロナ放電方式によって、密閉された空間での火災において消火への効果があることが研究されている[1.17]。

誘導帯電方式の静電噴霧を多岐にわたる産業分野へ適用する上では、可能な限り設備コストを減らし、高電圧を扱うため安全に使用することが望まれる。誘導帯電方式の静電噴霧に二流体ノズルを用いる場合、供給する水溶液の水タンクとポンプ、直流高電圧電源といった設備の他に圧縮空気を流入するコンプレッサー設備が必要となる。さらに、二流体ノズルは放水流量が少ないため広範囲の領域に多量の水等を散布することが困難になる。一方、一流体ノズルを用いる場合では、水タンクとポンプと直流高電圧電源の設備だけである。さらに、広範囲に散布が可能となる他、設備コストを抑えられる利点がある。しかし、一流体ノズルの誘導帯電方式に関する研究報告は従前より少なく、特にノズルの仕様に基づいた静電誘導電極の設計に関しては不明である。



(a) The removal of the floating dust in building site



(b) The removal of the floating dust in civil construction

Fig.1.1 The situation of floating dust at field.

1.2 静電噴霧の方式と実用事例の背景

静電噴霧は、帯電した水滴が静電気力(クーロン力)を伴って霧(粒子径が 5~200 μm 程度のミスト状の水粒子)に分裂する現象として知られている[1.18]. 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、主に直接帯電方式、コロナ放電方式、誘導帯電方式の 3 種類が挙げられる[1.19]. これらの方式はいずれも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. 各方式について概略を図 1.2 に示し、それぞれの特徴を次に述べる.

静電噴霧の特徴は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が静電気帯電することである. 図 1.2(a)に示した直接帯電方式は、ノズル本体(導体)に直流高電圧を印加した状態で噴霧するものである. そのため、使用に際してはノズル、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. 直接帯電方式を用いた実用例は、食品加工における静電塗油や水系塗料の静電塗装に見ることができる. 図 1.2(b)に示したコロナ放電方式は、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ものである. 針状電極にはコロナ放電の発生に必要な数万ボルトの直流高電圧を印加する必要がある. コロナ放電方式を用いた実用例は、水系塗料や粉体塗料の静電塗装、電気集塵機、静電気除去装置に見ることができる. 図 1.2(c)に示した誘導帯電方式は、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直流高電圧を印加する. 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く抑えられる. 誘導帯電方式は主に農薬散布にて使用されている他、静電塗装や微粒子生成システムにも活用されている. また、帯電した水粒子の電氣的な極性は、印加電圧の極性に対して異極性となる.

特に農業分野では対象とする農作物に対して農薬水溶液を葉の裏等に効率よく均一に農薬を散布する必要性から静電噴霧の技術が注目され、従前より誘導帯電方式

による静電散布の研究が盛んに行われてきた[1.20]. 誘導帯電方式が農薬散布ノズルに実用化された理由は, コロナ放電方式に比べて印加電圧が低く抑えられること, 人的被害(感電)を防ぐとともに高濃度の農薬飛沫による作業員への影響を防ぐことである. さらに, 静電気帯電した農薬水溶液ミストは植物葉の裏面(害虫等は主に葉裏面に寄生している)にも吸引されて付着する効果があるため, 農薬散布の絶対量を低減できることにある[1.1].

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(水溶液と空気の混相)ノズルが一般に用いられている. 噴霧された水粒子の帯電量については, 比電荷(水粒子に静電気を帯電させた際の水単位質量あたりの電荷量:C/kg)が性能評価の指標として用いられている[1.21-1.23]. 水粒子の生成に伴うノズルの概略を図 1.3 に示し, それぞれの特徴を次に述べる. 図 1.3(a)に示した一流体ノズルは, 低い放水圧力(0.3~1.0 MPa)に対して流量が 0.5~2,000 L/min の範囲であり, 微粒化する水粒子径も 80~2,000 μm と大きいものである. 一流体ノズルを用いた誘導帯電方式の先行研究は, 山根らにより放水流量 0.5~2.6 L/min (中空円錐状または広角扇状の噴霧形態ノズル)に対して比電荷が 10^{-4} C/kg 程度であること, 電極への印加電圧が+4 kV 以上になると環状誘導電極(真鍮製)からコロナ放電が発生すると同時に比電荷が低下する原因になることが報告されている[1.24-1.26].

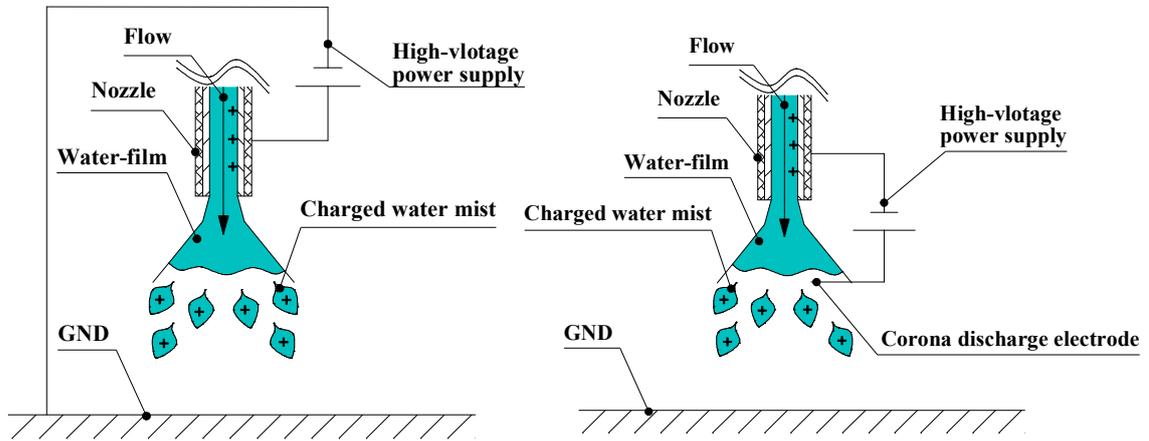
図 1.3(b)および(c)に示した二流体ノズルは, 放水流量が一流体ノズルに比べて極少量となり数 mL/min である. 二流体ノズルでは, 水または溶液に圧縮空気(加圧 2.0 MPa 以上)を加えて混相させる. そのため, 微粒化する水粒子径は 50 μm 以下と非常に小さいものとなる. 二流体ノズルは, 内部混合型と外部混合型の二つに種別される[1.27]. 図 1.3(b)に示した内部混合型は, ノズルの内部で水と空気が混相する仕組みである. 内部混合型では誘導電極がノズル先端から覆うように設けられることが多い. 一方, 図 1.3(c)に示した外部混合型は, ノズルから出た液膜(液柱)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。すなわち、二流体ノズルの外部混合型では、液膜(液柱)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)がノズル噴出口とほぼ同位置に存在する。

二流体ノズルにおいては、松尾らにより外部環状電極や内部環状電極を用いた微量ノズル(0.06~0.2 L/min)に対する比電荷が 10^{-4} ~ 10^{-3} C/kg 程度となり、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ことが良く知られている[1.28-1.32]。これは二流体ノズルの放水流量が比較的少ないためである。さらに、環状誘導電極の材質によって比電荷の特性が異なるといった報告もされている[1.33]。近年においては二流体ノズルを用いた静電噴霧の適用が多い。S.E.Law はノズルの直下で液柱(液膜、水膜、あるいは水系)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、水粒子の比電荷が比較的高くなることを報告している[1.34]。

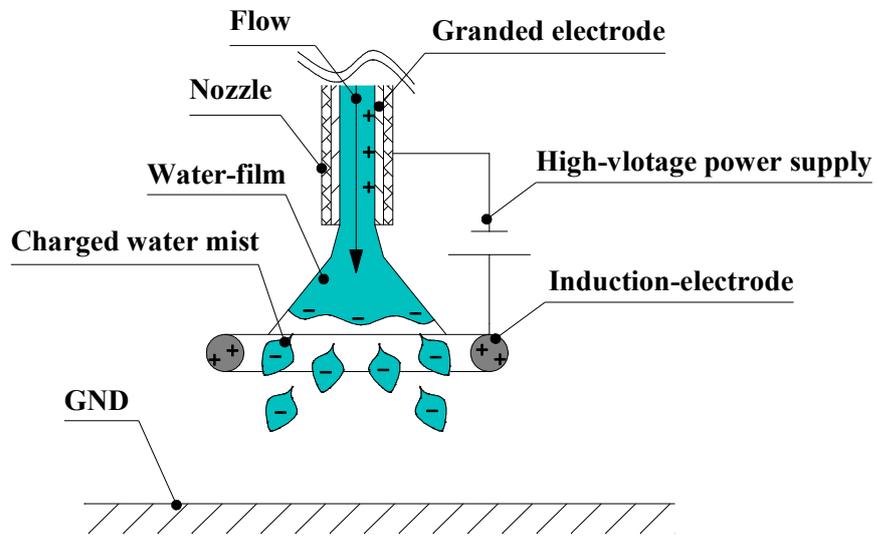
二流体ノズルの短所は、噴霧する流量が数 mL/min とかなり少ないことである。農業分野では少ない流量で農薬を散布するため、二流体ノズルまたは少水量の一流体ノズルにおける誘導帯電方式の静電噴霧が適している。

誘導帯電方式において一流体ノズルを用いた研究報告は少ない[1.24-1.26]。その理由は、一流体ノズルの放水流量は多く、かつ微粒化する水粒子の径が大きいためである。その結果として比電荷が二流体ノズルに比べて低いことである。



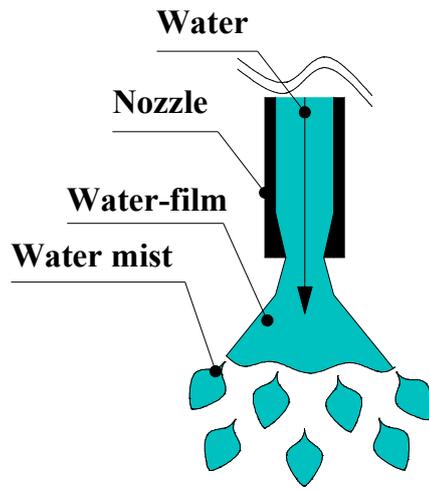
(a) Direct charging method

(b) Corona discharging method

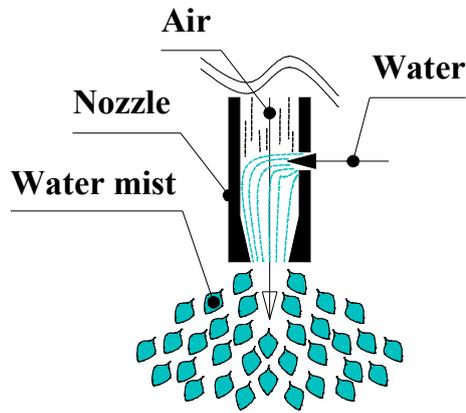


(c) Induction charging method

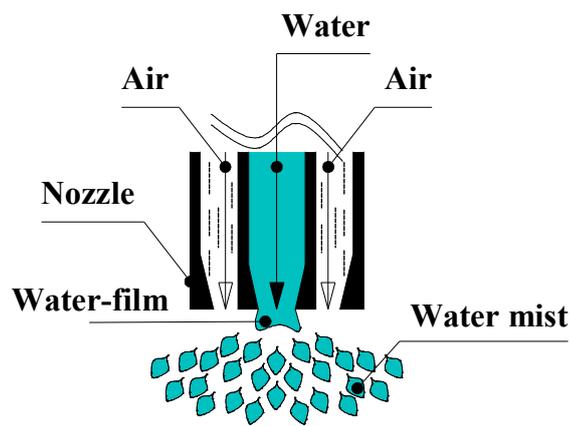
Fig.1.2 Principle of electrostatic spraying.



(a) Single-fluid nozzle



(b) Two-fluid nozzle (Internal mixing)



(c) Two-fluid nozzle (External mixing)

Fig.1.3 Structural of single-fluid nozzle and two-fluid nozzle.

1.3 研究課題

古くから静電噴霧に関する研究は行われてはいるものの、静電噴霧の現象はメカニズムを含めて不明なことが多く未だ定量的に示されていない。誘導帯電方式による水噴霧を原理として適用するには、静電噴霧のメカニズムを考えてノズル及び誘導電極系の設計を定量的に評価できる知見が不可欠である。

一流体ノズルを用いた誘導帯電方式の静電噴霧ノズルに関しては、研究事例が従前より少ない。一流体ノズルにより噴霧される水(ミスト)の粒子径は、二流体ノズルのそれに比べて大きいので粒子の沈降が速い。そのため、除塵や消火等に適用するためには一流体ノズルの方が有用である。一流体ノズル(代表例として中空円錐の噴霧形態ノズル)において、噴流した液膜状の水が粒子状に分離する位置(液膜分離点)と誘導電極の配置との相対的な距離や、ノズルと誘導電極間に直流高電圧を印加する供給電圧の変化に伴う比電荷(水粒子の電荷量:C/kg)の値などからノズル設計に与えるパラメーターを探索することは新たな知見となる。また、誘導電極をノズル先端に対してどの位置に配置すれば比電荷が増大するのかといった知見も工学的に重要である。特に今日までに、静電誘導帯電におけるノズル噴出口から放出する液膜が静電気力によって変位するのかといった報告は著者が知る限り見られない。液膜が静電気力によって変位するのであれば、液膜の変位に応じて誘導電極を配置させることで帯電した水粒子の比電荷が増大するのではないかと著者は考えている。従って静電誘導帯電における液膜分離点の変位に着目して、誘導電極との配置に関する比電荷との関係を解明していくことが本研究の課題となる。

1.4 実験装置の概略

先行研究では、実験に金属製のノズルを用いていた[1.20]. しかし、高電圧の印加による気中放電を防ぐ対策が必要であった. そこで、定量的に静電噴霧の状態を確認するためには電気絶縁性の高い樹脂製ノズルを用いることが望ましい[1.35]. 本研究でも、樹脂製のノズルを製作して実験に供試した.

図 1.4 に誘導帯電方式の静電噴霧ノズルの概略図を示す. 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 SUS 製の導体管を配置した. その導体管は接地電極とした. 事前にノズル材質の選定として、硬質ポリ塩化ビニル樹脂、ナイロン、テフロン等を検討して評価した結果、静電誘導帯電ノズル本体と接地電極との間に放電が発生せず、定量的に比電荷を評価できるノズル材質は硬質ポリ塩化ビニル樹脂であることを確認した[1.6]. 環状誘導電極はノズル先端の噴霧空間に配置して、直流高電圧電源の正極側に接続した. 直流高電圧電源の負極側はノズル内部の接地電極へと接続した. この場合、微粒化した水粒子は負に帯電した. なお、誘導電極の極を反転(負極)とした場合、正に帯電する水粒子の比電荷(絶対値)はほぼ同じであることを事前に確認した.

ノズル噴出口から放出する液膜が水粒子に分裂する位置(液膜分離点)を評価するにあたって、針プローブに交流矩形波信号の電圧を印加しながら液膜内の導電の有無を確認する触針法[1.36-1.37]を適用した. プローブによる検出電流は、プローブが液膜内であれば導通を示し、液膜外となれば非導通を示す. 導通と非導通の定量的な測定から液膜分離の位置(ノズル先端からの距離)を確認することとした. 併せて液膜分裂の様子を確認するため高速度カメラを用いた可視化による評価も検討した. 図 1.5 に装置の概略を示す.

噴霧された水粒子の帯電量の評価には、比電荷を用いた. 図 1.6 に比電荷の測定装置(ファラデーケージ)の概略を示す. ファラデーケージは帯電した物体(ここでは水

粒子)の電荷量を測定する方法で一般的に広く使用されている[1.38]. ファラデーケージの基本構成は、(電氣的に絶縁された)金属製の外容器、帯電した物体を捕捉する金属製の内容器、内容器の電位計である. 外容器は内容器とは電氣的に絶縁されている. この装置で得られる電荷量は、物体の総電荷量を計測するものであり、正極および負極の電荷が混在しても割合や分布の評価はできない. 帯電した物体の電荷 Q (C/kg)の算出は、金属製の外容器と内容器の間の静電容量を C として、電位計から両容器の電位差 V を測定することで $Q=CV$ より求めることができる. 本研究では、帯電した水粒子の電流値 I (C/s)と水粒子の質量流量(kg/s)から比電荷(C/kg)を次式から算出することとした.

$$\text{比電荷} \left[\frac{C}{kg} \right] = \frac{\text{電流値} \left[\frac{C}{s} \right]}{\text{ミストの質量流量} \left[\frac{kg}{s} \right]} \quad (1.1)$$

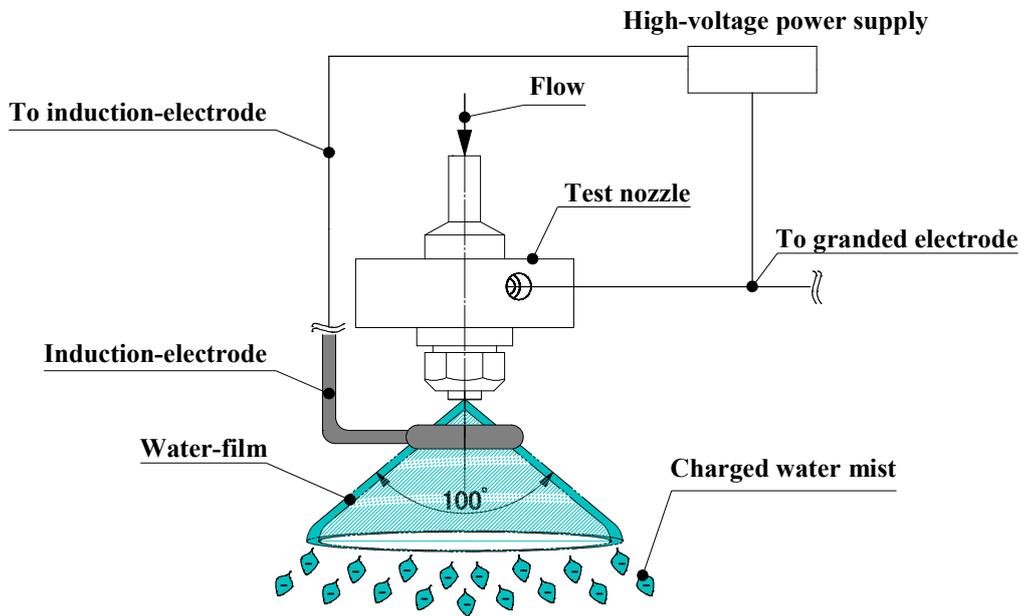


Fig.1.4 Experimental nozzle.

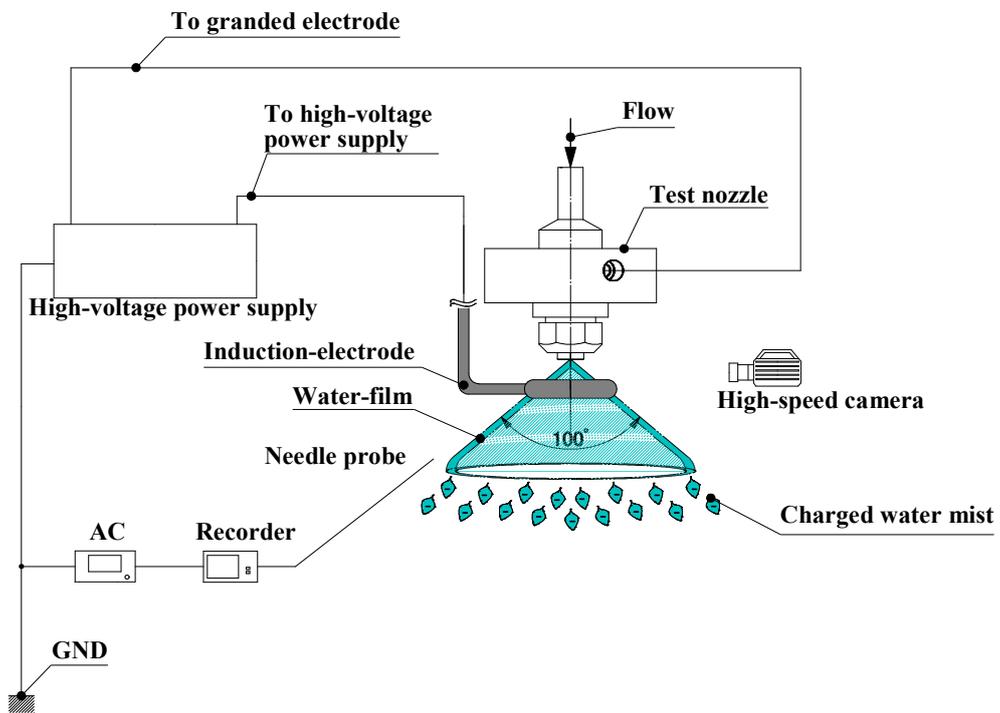


Fig.1.5 Experimental equipment for measurement of water-film separation point and visualization system.

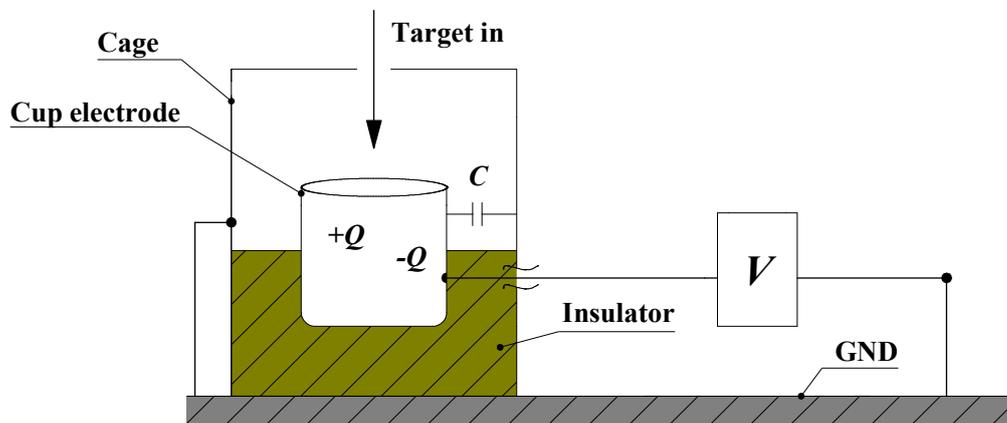


Fig.1.6 Experimental equipment for measurement of charge by Faraday cage.

1.5 研究の目的と本論文の構成

誘導帯電方式による静電噴霧ノズルを浮遊粉じんの洗い落とし(除塵)の分野や消火・消煙の分野に適用するにあたっては、放水流量が多く広範囲に効率良く散水が可能なものであることが望まれる。そのため、一流体ノズルが適していると考えられる。しかし、一流体ノズルを用いた静電誘導帯電方式は、ノズルの仕様に基づいた誘導電極等の設計に関して不明なことが多い。また、噴霧された水粒子(ミスト)の電荷量(比電荷)を増大させる知見も少ない。

本研究の目的は、静電噴霧を浮遊粉じんの除塵や消火・消煙に応用するため、流量が比較的多く、水粒子径も大きな一流体ノズルを用いて液膜分離点(ノズル噴出口から放出する液膜が水粒子に分裂する位置)と誘導電極の相対的な配置について、比電荷を増大させる設計指針を見出すことである。具体的には、まず一流体ノズルの代表的な中空円錐ノズルについて、液膜分離の位置を探るために可視化とプローブ測定(触針法)を用いて検討した。次に、噴霧角度の外縁に沿わせた環状の誘導電極を設計して、液膜分離点の位置と誘導電極の配置が比電荷特性に与える影響を実験により明らかにした。これらの結果を基に、比電荷の増大には環状誘導電極径と液膜分離点の各位置がパラメーターになることを明確にした。そして、静電誘導による噴霧水の粒子径の測定結果からレイリー限界に対する比電荷との割合を算出し、先行研究で得られている値と比較してノズルの性能を評価した。

本論文は本章の序論を含めて4章で構成している。

第1章では、本研究の背景と目的について述べた。まず、静電噴霧の代表的な方式について特徴と先行研究の詳細について整理した。次に、本研究の目的と研究課題を提案し、その評価に関する実験の概略を示した。

第2章では、液膜分離点を評価するにあたって液膜分離点の測定方法について述べた。本研究では液膜分離点を評価するため、高速度カメラを用いた可視化とプローブ

ブ測定(触針法により液膜に流れる電流の有無の判定)を用いて検討した。まず、噴霧の可視化ではノズル噴出口から放出する液膜が微粒化する様子を定性的に把握することができた。次に、プローブ測定(触針法)では液膜分離点が静電誘導帯電の無い状態で 7.0 mm, 静電誘導帯電の有る状態で 8.0 mm であった。本章ではこれらの特性について論じた。

第 3 章では、液膜の外側に配置する誘導電極と液膜分離点の相対位置が比電荷特性に影響を及ぼす主なパラメーターとなることを明示した。まず、比電荷は印加電圧に依存して増加し、比電荷が 10^{-4} C/kg 程度であることを確認した。さらに、誘導電極を液膜分離点近傍に配置すると、比電荷が高まることがわかった。次に、比電荷の増加に適した誘導電極を製作して、評価を行った。その結果、液膜分離点において、誘導電極が液滴に接触しない電極系とすることで比電荷が高くなることが判明した。水粒子の比電荷は、理論最大帯電量(レイリー限界)に対して 7~8 %程度であった。この値は、一流体中空円錐噴霧ノズルを用いた先行研究と比べて約 2 倍の値となった。このことから、比電荷を高めるためのノズルの設計指針を示すことができた。

第 4 章では、各章を総括して述べ、今後の研究課題に関する本研究の知見を述べた。

[第 1 章の参考文献]

- [1.1] 田淵敏彰: 静電噴口 (e ジェッター) の開発. 農業機械学会誌, Vol.66, No.6, pp.21-22 (2004).
- [1.2] 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, pp.887-888 (2013).
- [1.3] 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, pp.563-564 (2013).
- [1.4] 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, Vol.64, pp.1-6 (2016).
- [1.5] 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).
- [1.6] 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).
- [1.7] 池松建治, 間宮尚, 小澤一喜, 辻 利秀, 吉田哲雄, 鹿島建設(株), ホーチキ(株): 密閉式廃棄物処分場の粉塵除去システム. 特許第 5918616 号 (2013).
- [1.8] 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 5973219 号 (2014).
- [1.9] 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, Vol.21, pp.75-84 (1984).
- [1.10] 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, Vol.22, pp.49-53 (1985).

- [1.11] 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, Vol.2, No.5, pp.316-322 (1978).
- [1.12] 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).
- [1.13] 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 号 (2012).
- [1.14] 辻 利秀, 吉田哲雄, ホーチキ(株): 帯電散布ヘッド及び帯電散布方法. 特許第 5797905 号 (2012).
- [1.15] 辻 利秀, 吉田哲雄, ホーチキ(株): 帯電散布ヘッド及び帯電散布方法. 特許第 5797906 号 (2012).
- [1.16] 池松建治, 桑名秀明, 辻 利秀, 吉田哲雄, 鹿島建設(株), ホーチキ(株): 防火防煙区画形成設備. 特許第 5827159 号 (2013).
- [1.17] Yong-liang Xu, Lan-yun Wang, Dong-lin Liang, Ming-gao Yu and Ting-xiang Chu: Experimental and mechanism study of electrically charged water mist for controlling kerosene fire in a confined space. *Procedia Engineering*, Vol.71, pp.246-252 (2014).
- [1.18] 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).
- [1.19] 静電気ハンドブック, 静電気学会編, オーム社, p.754 (2006).
- [1.20] S.E.Law and H.D.Bowen: Charging liquid spray by electrostatic induction. *Transactions of the ASAE / American Society of Agricultural Engineer*, Vol.9, No.4, pp.501-506 (1966).
- [1.21] W.E.Splinter: Electrostatic charging of agricultural sprays. *Transactions of the ASAE*, Vol.11, No.4, pp.491-495 (1968).
- [1.22] Webb.B.K and H.D.Bowen : Electrostatic field break down phenomena in

- applying charged particles. Transactions of the ASAE, Vol.13, No.4, pp.455-459 (1970).
- [1.23] R.A.Coffee: Electrodynamic crop spraying. Outlook on Agriculture, Vol.10, No.7 pp.350-356 (1981).
- [1.24] 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, Vol.70, No.4, pp.115-122 (2008).
- [1.25] 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, Vol.72, No.6, pp.578-586 (2010).
- [1.26] 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, Vol.76, No.3, pp.261-270 (2014).
- [1.27] 液体の微粒化技術, 倉林俊雄編, (株アイピーシー, pp.58-60 (1995).
- [1.28] 松尾昌樹, 飯本光雄, 内野敏剛: 静電散布ノズルの電气的特性. 千葉大学学術報告, Vol.37, pp.1-6 (1986).
- [1.29] 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, Vol.39, pp.9-15 (1987).
- [1.30] 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, Vol.49, No.5, pp.459-466 (1987).
- [1.31] 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, Vol.42, pp.1-5 (1989).
- [1.32] 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, Vol.44, pp.99-104 (1991).

- [1.33] M. Kumar Patel, C. Ghanshyam, and P. Kapur: Characterization of electrode material for electrostatic spray charging: Theoretical and engineering practices. J. Electrostatics, Vol.71, pp.55-60 (2013).
- [1.34] S.E.Law: Embedded-Electrode Electrostatic-Induction Spray-Charging Nozzle : Theoretical and Engineering Design. Transactions of the ASAE, No.21, pp.1096-1104 (1978).
- [1.35] 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, Vol.24, pp.70-71 (1988).
- [1.36] Tokuoka N., Nagaosa S., Hora S., and Sato G., : Study on the disintegration of a liquid film by air impingement. Atomization and Spray Technology, Vol.1, No.2, pp.103-123 (1985).
- [1.37] 森 章夫, 桂川直己, 徳岡直静: 薄い液膜の分裂に関する研究(第1報: 触針法による分裂要因の分離). 微粒化, Vol.5-3, No.11, pp.30-37 (1996).
- [1.38] 静電気ハンドブック, 静電気学会編, オーム社, p.319, p.417 (2006).

第2章 液膜分離点の評価

2.1 はじめに

静電誘導帯電において、ノズル噴出口から放出する液膜が静電気力によって変位する物理的な詳細は未だに明らかでない。一流体ノズル(中空円錐ノズル)において比電荷は、噴出口から噴流した液膜距離(ノズル噴出口から液膜分離点までの距離)と外部に配置した誘導電極の相対位置に依存するものと考えられる。しかし、これを明らかにした報告は見られない。また、液膜が静電気力によって変位すると仮定すれば、比電荷は液膜の変位に応じて誘導電極を配置させることで増加すると考えられる。ノズルの噴霧形態として液膜分離点の評価することは、静電誘導帯電ノズルを設計する上で重要な要因である。そこで、噴霧角度の外縁に沿わせて配置する誘導電極の位置と印加電圧をパラメーターとして液膜分離点を調査した。ここでは、静電誘導帯電における液膜分離点に着目して、液膜分離点を検討する上で噴霧の可視化とプローブ測定(触針法)から検討した。本章では評価方法、実験結果と考察について以下に詳しく記述する。

2.2 実験装置および実験方法

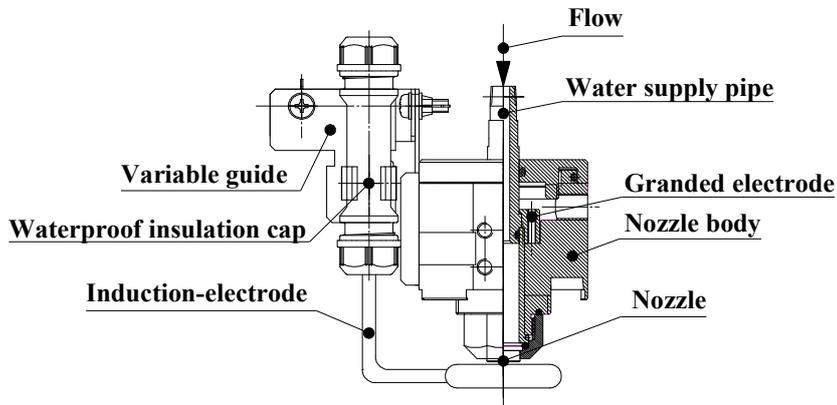
2.2.1 供試ノズル

一般に本研究が対象とする静電誘導による噴霧器(ノズル)には金属製を使用することが多い。本研究においても、従前は既製品の金属ノズルを用いていた[2.1]。しかし、高電圧の印加による気中放電が発生する。そこで、定量的に静電噴霧の状態を確認するために電気絶縁性の高い樹脂製ノズルを用いた[2.2]。

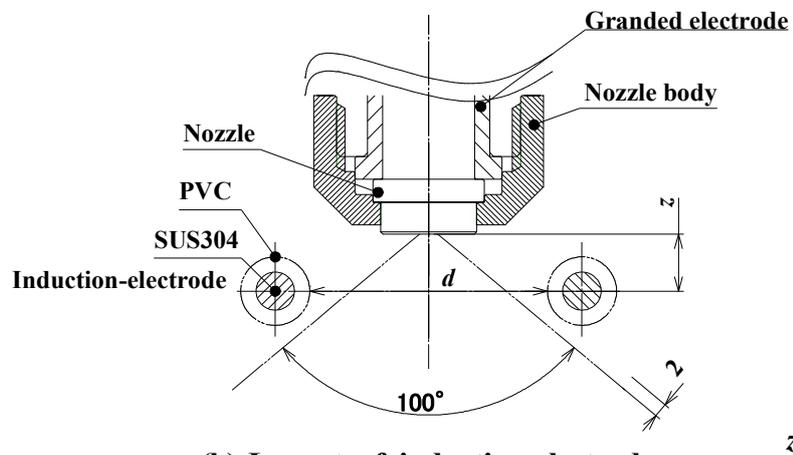
図 2.1 に(a)供試ノズルの構成、(b)誘導電極の配置を示す。一流体中空円錐ノズル

の仕様は、放水圧力が 1.05 MPa 時に放水流量が 1.0 L/min, 噴霧角が 100 ° 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 ϕ 12 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 ϕ 5.0 mm のステンレス丸棒(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。事前にノズル材質の選定として、硬質ポリ塩化ビニル樹脂、ナイロン、テフロン等を検討して評価した結果、静電誘導帯電ノズル本体と接地電極との間に放電が発生せず、定量的に比電荷を評価できるノズル材質は硬質ポリ塩化ビニル樹脂であることを確認した。併せて、素地表面への絶縁処置として PPS, ウレタン, アルミナセラミックス等のコーティングを施した結果、絶縁性に優れかつ比電荷が高い傾向を示したコーティングは軟質ポリ塩化ビニル樹脂であることを確認した[2.3].

この環状誘導電極には表 2.1 に示すような内径 d が異なる 5 種類を用いた。ノズル噴霧角度の外縁に沿わせて d が 25.0, 30.2, 35.2, 40.3, 45.4 mm, ノズル先端から誘導電極環中心までの距離 z が 5.5, 7.5, 9.5, 11.5, 13.5 mm である。誘導電極の配置調整は、ノズル先端から各々の距離 z となるようにアクリル調整板にて距離を調整した。誘導電極内径面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 である。



(a) Structure of experiment nozzle



(b) Layout of induction-electrode

Fig.2.1 Experimental nozzle and induction-electrode system.

Fig.2.1 は静電気学会誌より許諾を得て改変して転載
 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, Vol.43, No.4, 178 頁, 2019 年

Table 2.1 Experimental condition.

Applied voltage: V_{in} [+kV]	0, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0				
Wire diameter [mm]	ϕ 5.0				
Inner diameter : d [mm]	25.0	30.2	35.2	40.3	45.4
Distance from nozzle : z [mm]	5.5	7.5	9.5	11.5	13.5

2.2.2 測定装置および方法

本節ではノズル噴出口からの液膜が水粒子になるまでの距離(液膜分離点)を評価する測定装置と測定方法について述べる. 徳岡らはノズル噴出口からの薄い液膜の運動や液膜の分裂状態を定量的に測定するために線径の異なる針プローブ(触針法)を用いて, 液膜分離の状態を観察している[2.4-2.5]. 河原らは高速度カメラと長距離顕微鏡を組み合わせて液膜を可視化することで, ノズル噴出口からの液膜分離の位置を測定している[2.6]. また, 吉村らは高速度カメラによる液膜状態の測定と Computational Fluid Dynamics (CFD) 解析により実験と数値解析の双方から液膜の分裂長さを検討している[2.7]. Hazmi らはノズル先端から噴霧下方に SUS 製のワイヤーを水平に張った状態で, 水の抵抗値を測定して液膜内または液膜外かの判断(液膜長さ)を推測している[2.8].

著者は触針法と高速度カメラによる噴霧の可視化から液膜分離点の評価を行った. 図 2.2 に装置の構成を示す. 液膜分離点の評価には, 針プローブ(裁縫針, 線径 ϕ 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 (340 Ω) 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. 針プローブとノズル内部接地電極の間には交流矩形波電圧 V_{ac} (13 Hz, 30 V) を抵抗 R を介して印加した. 針プローブの電流波形 i_{ac} は R の両端の電圧降下より算出し, メモリーハイ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. ここで, V_{ac} を 13 Hz に設定した理由は, 計測環境(商用周波数)が 50 Hz であることから, 外部電磁ノイズの影響を除くためである. そして, 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。測定は各 3 回行った。針プローブによる液膜の測定箇所は、噴霧外縁となる箇所
所に針プローブを噴霧角度に沿わせて挿入した測定を行っている。測定箇所は噴霧
中心断面に対して外縁の 1 点にて測定を行った。なお、針プローブを挿入した噴霧中
心断面に対する外縁は、他の箇所においても事前に測定を行い針プローブの電流波
形 i_{ac} の値(絶対値)はほぼ同じであることを確認した。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噴霧を撮影した。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。供試ノズルはポンプからの高圧ゴ
ムホースと接続をおこない架台に固定した。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。配線にはネオン線(品川電線製, N-EV)を用いた。電極間の印加電
圧 V_{in} は 1, 3, 5, 7, 10 kV にて可変した。

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 2.2 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)によって測定した。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。

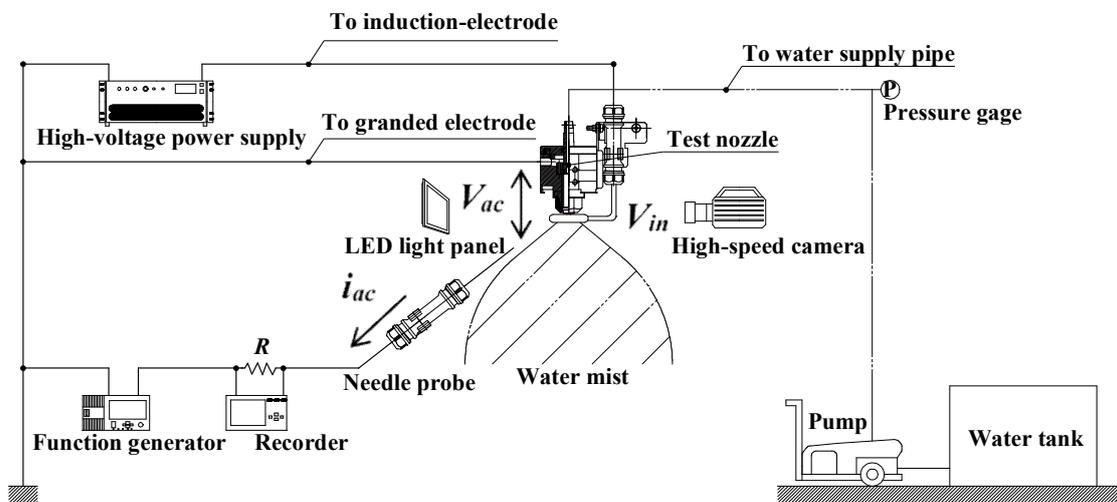


Fig.2.2 Experimental equipment for measurement of water-film separation point and visualization system.

Table 2.2 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

Fig.2.2 は静電気学会誌より許諾を得て改変して転載

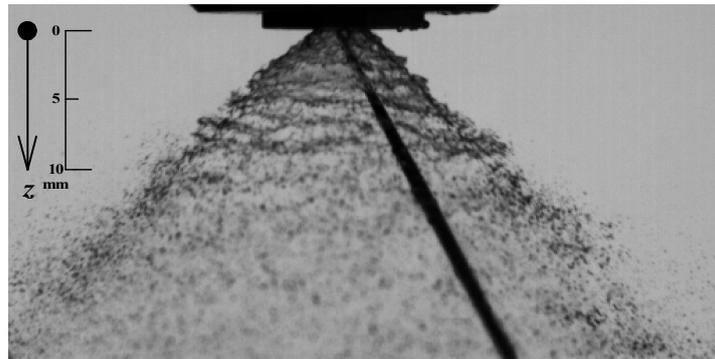
Table 2.2 は静電気学会誌より許諾を得て転載

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, Vol.43, No.4, 178~179 頁, 2019 年

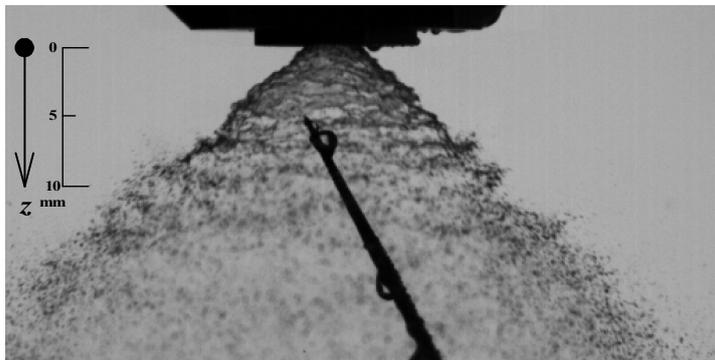
2.3 可視化実験の結果

まず初めに, 誘導電極を配置する前の供試ノズルでの液膜分離の可視化について述べる. 図 2.3 はノズル先端から針プローブの位置が(a) $z = 0$ mm, (b) $z = 5.0$ mm, (c) $z = 7.0$ mm, (d) $z = 10.0$ mm における噴霧の可視化結果を示している. (a)から(d)に対して噴霧の可視化結果から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する様子を見ることができる.

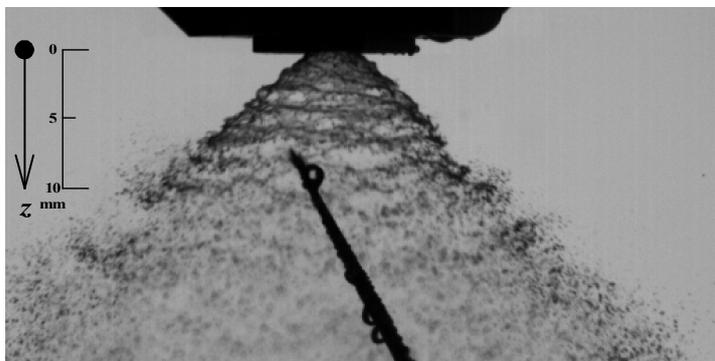
次に, 図 2.4 に誘導電極を配置した場合での供試ノズルの液膜分離の可視化結果を示す. 一例として誘導電極 ($z = 9.5$ mm, $d = 35.2$ mm, 印加電圧 $V_{in} = 7$ kV) を配置した場合を示す. 誘導電極の配置に伴いノズル噴出口からの噴霧外縁が電極の背後に隠れてしまい, 液膜分離点の位置を確認することはできない. 液膜は誘導電極の上方(上流側)にあり, その下方(下流側)では液膜が形成されていないことがわかる.



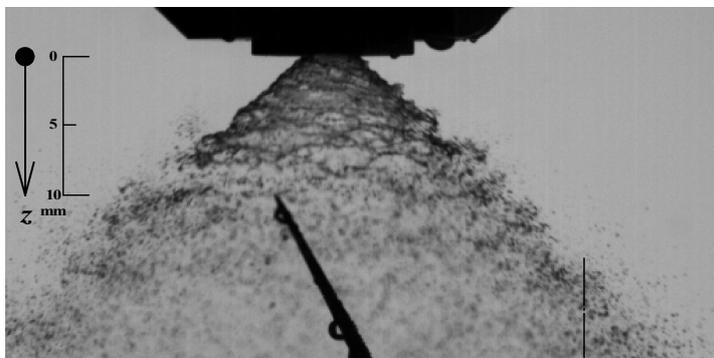
(a) $z = 0$ mm



(b) $z = 5.0$ mm

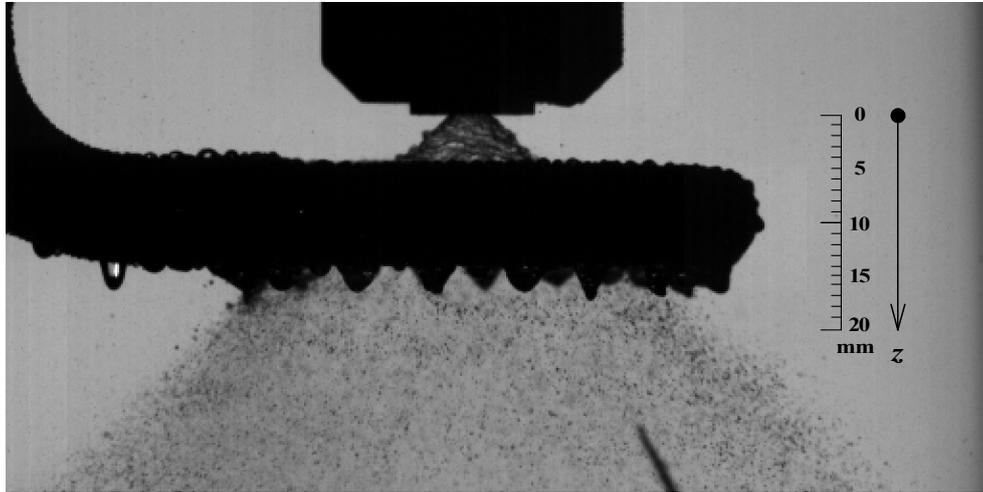


(c) $z = 7.0$ mm



(d) $z = 10.0$ mm

Fig.2.3 Visualization of water spray.



**Fig.2.4 Visualization of water spray set up induction-electrode
($z = 9.5$ mm, $d = 35.2$ mm, $V_{in} = 7$ kV).**

Fig.2.3 および Fig.2.4 は静電気学会誌より許諾を得て改変して転載
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, Vol.43, No.4, 180~181 頁, 2019 年

2.4 触針法の結果

針プローブを用いた触針法は、電流の有無により針プローブが液膜内または液膜外に位置するかを判定することができる。まず、誘導電極を配置する前および誘導電極を配置して印加電圧を付与しない場合での液膜分離について述べる。

誘導電極を配置する前および誘導電極を配置して印加電圧を付与しない($V_{in} = 0$) 場合についての結果を図 2.5 に示す。図 2.5 は針プローブの位置がノズル先端から (a) $z = 5.0$ mm, (b) $z = 6.0$ mm, (c) $z = 7.0$ mm, (d) $z = 8.0$ mm の場合の針プローブ電流波形 i_{ac} である。ここでは、(a)から(d)に示した針プローブの電流波形 i_{ac} にはファンクションジェネレーターの印加電圧波形 V_{ac} を併せて示している。 V_{ac} の極性反転時にパルス状の過渡電流が流れる。この過渡電流を除いた 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)であるかがわかる。(a)に示した $z = 5.0$ 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($\pm 1 \mu\text{A}$ 程度)が現れ、導通状態にあることを示している。(b) $z = 6.0$ mm も i_{ac} の振幅($\pm 0.5 \mu\text{A}$ 程度)が現れ、導通状態を示している。一方、(c) $z = 7.0$ mm および(d) $z = 8.0$ 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わかる。針プローブの位置(z)に対する i_{ac} の振幅の値を図 2.6 に示す。針プローブの電流波形 i_{ac} の値はファンクションジェネレーターの印加電圧波形 V_{ac} の極性反転時の過渡電流を除いた振幅の平均値をプロットしたものである。この結果から本供試ノズルにおける液膜分離点($V_{in} = 0$ kV 時)は $z = 7.0$ mm であると推定された。

次に、静電誘導時($V_{in} = 1 \sim 10$ kV)の液膜分離について述べる。一例として、図 2.7 に $V_{in} = 7$ kV における針プローブの位置(z)に対する針プローブの電流波形 i_{ac} の振幅の値を示す。この i_{ac} の値も前述同様にファンクションジェネレーターの印加電圧波形 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_{in} 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_{in} を 1~10 kV に可変した時は, i_{ac} の振幅の値が針プローブの位置 (z) のみに依存して変わった. i_{ac} の振幅の値は V_{in} 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 $d = 25.0, 30.2, 35.2, 40.3, 45.4$ mm の 5 つの条件において, i_{ac} が 0 A (非導通) の状態を示した. この i_{ac} の値から液膜分離点が $z = 8.0$ mm 付近であると推定された. 誘導電極を配置する前および誘導電極を配置して印加電圧を付与しない場合の供試ノズルにおける液膜分離点は $z = 7.0$ mm であったが, 静電誘導時では z 方向に 1.0 mm 延伸したことがわかった.

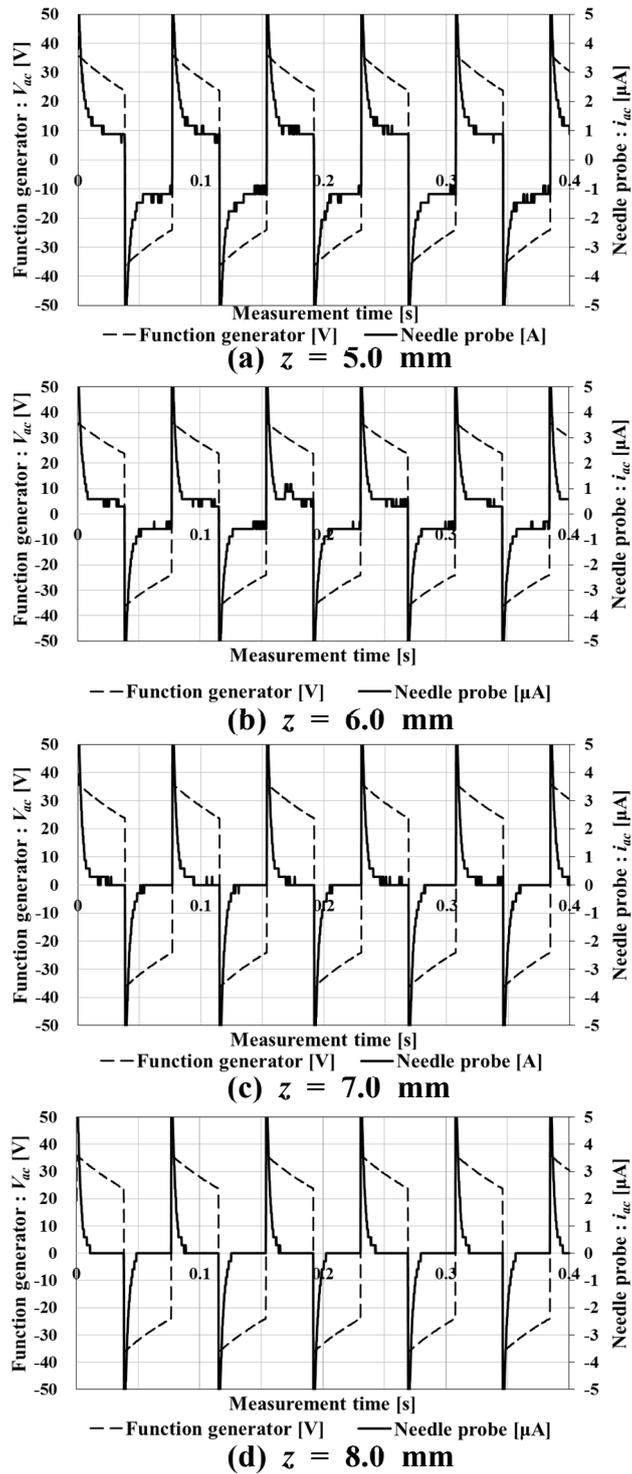


Fig.2.5 Waveforms of V_{ac} and i_{ac} (0 kV).

Fig.2.5 は静電気学会誌より許諾を得て改変して転載
 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, Vol.43, No.4, 180 頁, 2019 年

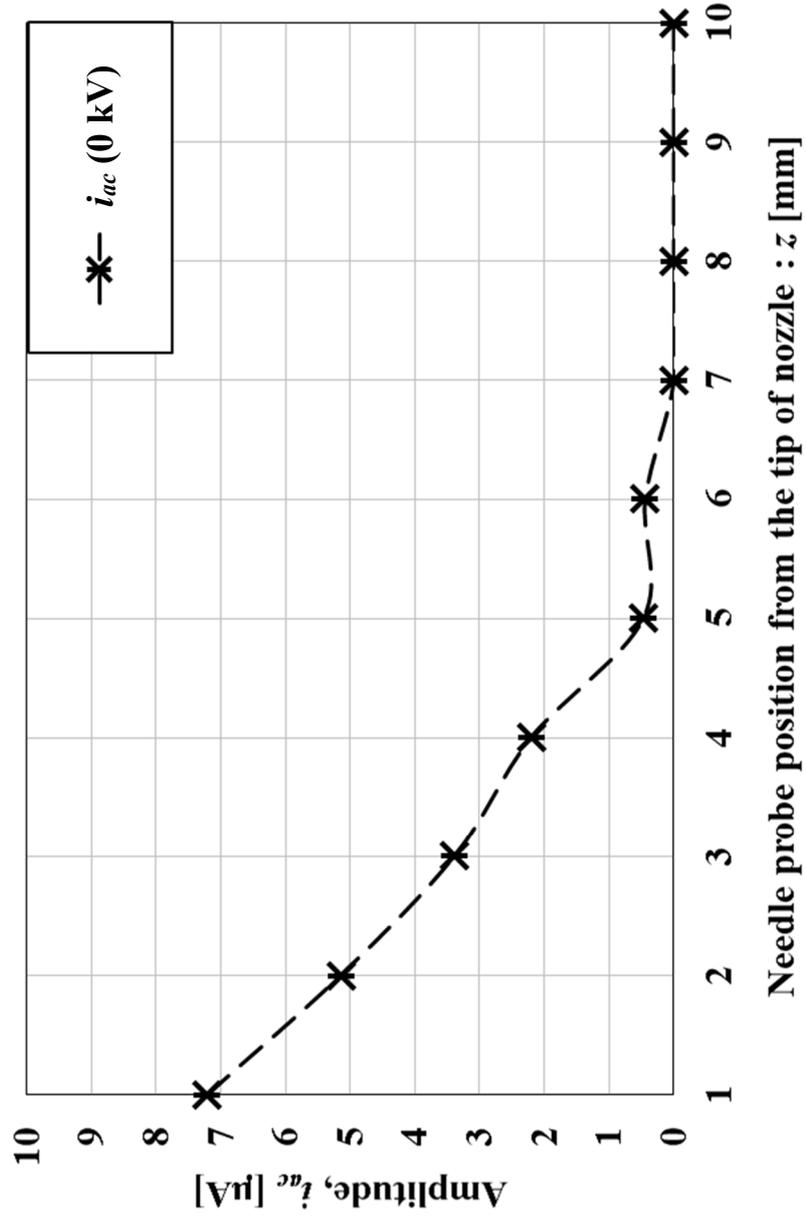


Fig.2.6 i_{ac} in amplitude as a function of z ($V_{in} = 0$ kV).

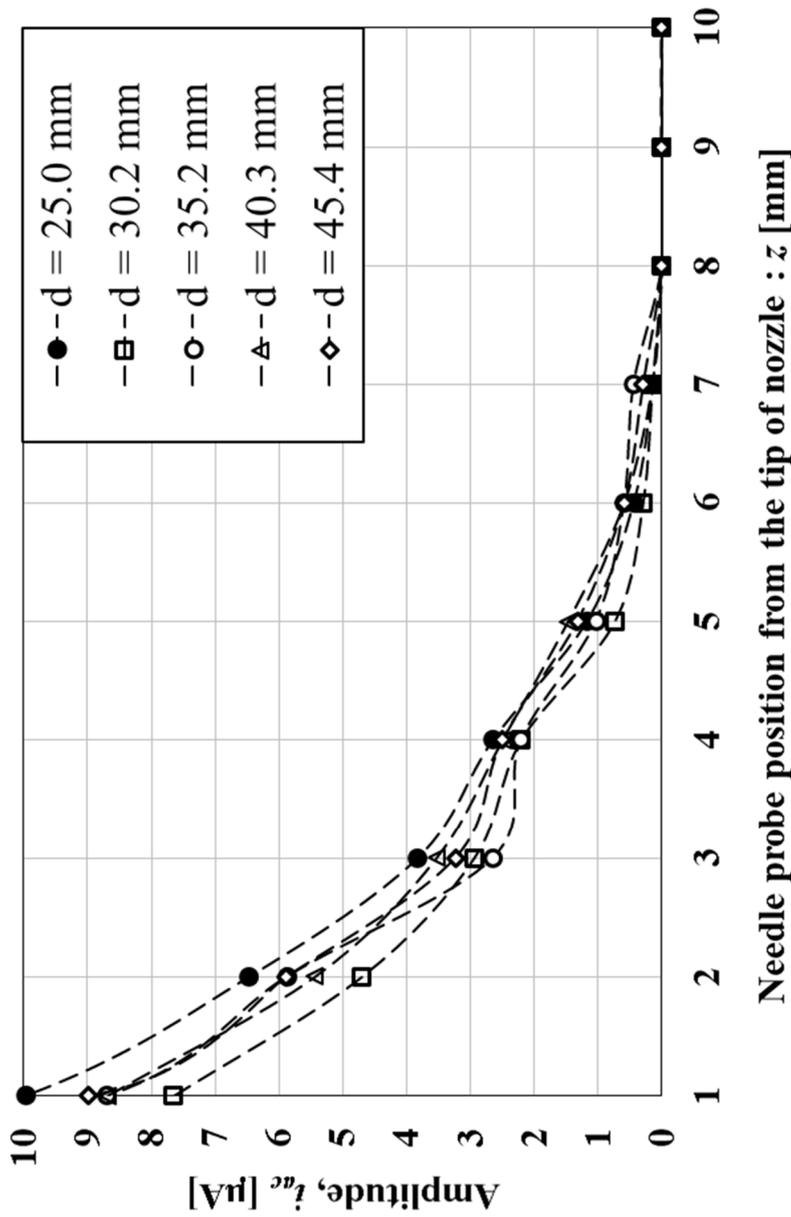


Fig.2.7 i_{ac} in amplitude as a function of z ($V_{in} = 7$ kV).

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, Vol.43, No.4, 181 頁, 2019 年

2.5 考察

実験結果から、噴霧の可視化では静電誘導の有無によらず、液膜分離点を評価することはできなかった。しかし、ノズル噴出口から液膜が形成され水粒子に微粒化する様子を定性的に把握することができた。

プローブ測定(触針法)において液膜内外の分離位置を評価した結果、印加電圧を付与しない($V_{in}=0$)場合、供試ノズルの液膜分離点(位置)はノズル先端から $z=7.0$ mmであった。一方、静電誘導時では z 方向に 1.0 mm 延伸して $z=8.0$ mm に液膜分離点が位置した。液膜分離点が延伸した理由は、誘導電極(正極性)と帯電した液膜(負極性)の間に静電引力が生じていたため、マックスウェル歪み応力によって液膜が誘導電極側へ引き伸ばされたのではないかと考えられる。一般に中空円錐状の噴霧は、ノズル噴出口から液膜が連続的に形成されて液膜分離点近傍まで広がるほど液膜の厚みは薄くなる。すなわち、液膜が水粒子に分裂する箇所では液膜が薄く電荷分離が起きやすいと考えられる。何故、液膜が静電誘導により延伸したのかを詳細に知るためには数値電界計算により電界分布を定量する必要がある。これは今後の研究課題である。

静電誘導帯電によって液膜分離点の変位が明確となったことは、ノズル先端に誘導電極を配置する際の一つの指針になると考える。次章(3章)にて液膜分離点と誘導電極の相対位置が比電荷に及ぼす影響について知見となる検討を行う。

2.6 まとめ

本章では、静電誘導の有無における液膜分離点を噴霧の可視化とプローブ測定(触針法)から検討した。得られた知見を下記に示す。

- (1) 噴霧の可視化では、ノズル噴出口から液膜が形成され水粒子に微粒化する様子を定性的に把握することができた。液膜はノズル噴出口から伸びて、その先端で微粒化している。誘導電極を設計するにあたっては、液膜分離領域に静電誘導を効果的に発生させるように検討する必要がある。
- (2) 触針法の実験から本供試ノズルの液膜分離点は、印加電圧を付与しない(0 kV)場合に $z = 7.0 \text{ mm}$ であったのに対して、静電誘導時(1~10 kV)では z 方向に 1.0 mm 延伸することがわかった。
- (3) 静電誘導により液膜分離点が延伸した理由は、誘導電極(正極性)と帯電した液膜(負極性)の間に静電引力が生じていたため、マックスウェル歪み応力によって液膜が誘導電極側へ引き伸ばされた結果であると考えられる。また、液膜が水粒子に分裂する箇所では液膜が薄く電荷分離が起きやすいと考えられる。

[第 2 章の参考文献]

- [2.1] S.E.Law and H.D.Bowen: Charging liquid spray by electrostatic induction. Transactions of the ASAE / American Society of Agricultural Engineer, Vol.9, No.4, pp.501-506 (1966).
- [2.2] 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, Vol.24, pp.70-71 (1988).
- [2.3] 池松建治, 高木賢二, 挾間貴雅, 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).
- [2.4] Tokuoka N., Nagaosa S., Hora S., and Sato G., : Study on the disintegration of a liquid film by air impingement. Atomization and Spray Technology, Vol.1, No.2, pp.103-123 (1985).
- [2.5] 森 章夫, 桂川直己, 徳岡直静: 薄い液膜の分裂に関する研究(第 1 報: 触針法による分裂要因の分離). 微粒化, Vol.5-3, No.11, pp.30-37 (1996).
- [2.6] 河原信幸, 富田栄二, 住田守: スワールインジェクタのノズル近傍における分裂過程の可視化. 微粒化, Vol.16, No.54, pp.24-33 (2007).
- [2.7] 吉村一樹, 安田義人, 石井英二, 小林信章: ポート噴射エンジン用多孔スワールインジェクタによる噴霧の微粒化に関する研究. 日本機械学会論文集, Vol.81, No.831, pp.1-16 (2015).
- [2.8] Hazmi Abdul Halim, Ryu-ichiro Ohyama, Toshihide Tsuji, Tetsuo Yoshida : Influence of Electrostatic Induction Electrode Configuration on Water Mist Charging. IEEE CDIDP proc. pp.231-234 (2011).

第3章 比電荷の評価

3.1 はじめに

本章では、前章 2.4 節にて述べたように静電誘導の有無による液膜分離点の変位を踏まえて誘導電極に対する水粒子の比電荷を評価した。噴霧された水粒子の帯電量については、比電荷(水粒子に静電気を帯電させた際の指標となる水 1 kg 当たりの電荷量:C/kg)を用いた[3.1-3.3]。比電荷の測定にはファラデーケージを用いた。本章では液膜分離点と誘導電極の相対的な配置を検討することが目的である。山根らは環状誘導電極(真鍮製)を噴霧角度の形状に沿うように内面をテーパ形状にして内径を 38 mm に固定した。噴霧角度の外縁に対して法線方向の間隔を変化させた場合の比電荷の結果を示している[3.4]。本章では、静電誘導による液膜分離点の変位を踏まえてノズル先端に配置する誘導電極と液膜分離点の関係から比電荷を照らし合わせた検討を行い考察する。

以下に測定方法と実験結果、結果と考察を踏まえて詳しく記述する。

3.2 実験装置および実験方法

本節では水粒子の比電荷の測定に対してファラデーケージを構成した。それによる測定方法について述べる。なお、比電荷の測定に用いた供試ノズルと誘導電極の様子は 2.2.1 節で述べた通りである。また、供試ノズルへの作動流体は 2.2.2 節で述べた井戸水を用いた。ファラデーケージは帯電した物体の電荷量を測定する方法で一般的に広く使用されている[3.5]。図 3.1 に比電荷の測定装置(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)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. 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, ϕ 510 mm \times H570 mm)を設けた. 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, ϕ 470 mm \times 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)により測定した. 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 R (200 k Ω) から電流値 i (C/s) を算出した. 比電荷 q_{mist} (C/kg) は i (C/s) と Q (kg/s) から次式より算出した.

$$q_{mist} = \frac{i}{Q} = \frac{\left(\frac{V_{average}}{R}\right)}{Q} \quad (3.1)$$

比電荷は, 噴霧した状態で誘導電極の印加電圧 V_{in} を1分毎に1 kV から10 kV まで1 kV の刻みにて可変して測定し, 1 分間の時間平均を用いて評価した. 測定は各5回ずつ行った. なお, 比電荷の測定の前に誘導電極へ印加電圧を付与しない ($V_{in} = 0$) 場合において, オペアンプにより電圧変換した電圧の平均値 $V_{average}$ が0 V を示し水粒子が帯電していないことを事前に確認している.

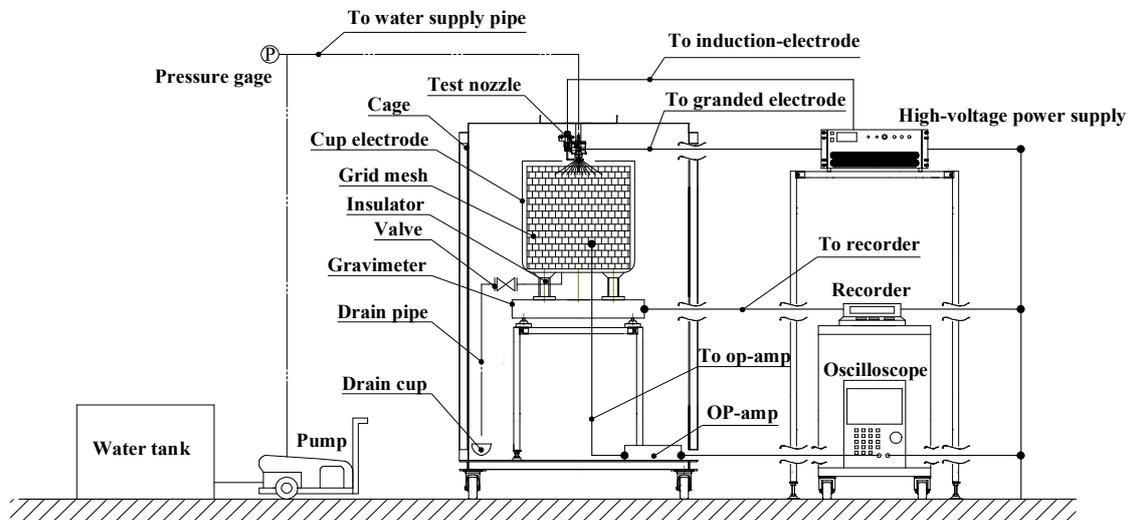


Fig.3.1 Experimental equipment for measurement of charge-to-mass ratio q_{mist} by Faraday cage.

Fig.3.1 は静電気学会誌より許諾を得て転載
 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, Vol.43, No.4, 179 頁, 2019 年

3.3 実験結果

図 3.2 は印加電圧 V_{in} に対する比電荷 q_{mist} の測定結果である。 q_{mist} は印加電圧 V_{in} に依存して増加し、その値は 10^{-4} C/kg オーダーであることが確認された[3.4]。 供試した 5 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。 この比電荷の特性は印加電圧 V_{in} に依存しており、印加電圧が 8 kV までほぼ線形的に増加している。 また、9, 10 kV において比電荷が飽和または減少している。

図 3.3 はノズル先端から誘導電極環中心までの距離 (z) に対する比電荷 q_{mist} の測定結果である。 q_{mist} は印加電圧 V_{in} に依存すると共に、誘導電極環中心がノズル先端から遠ざかるほど増加していることが確認された。 ノズル先端から $z = 9.5$ mm に誘導電極を配置した時に比電荷が高い値を示していることが確認できる。

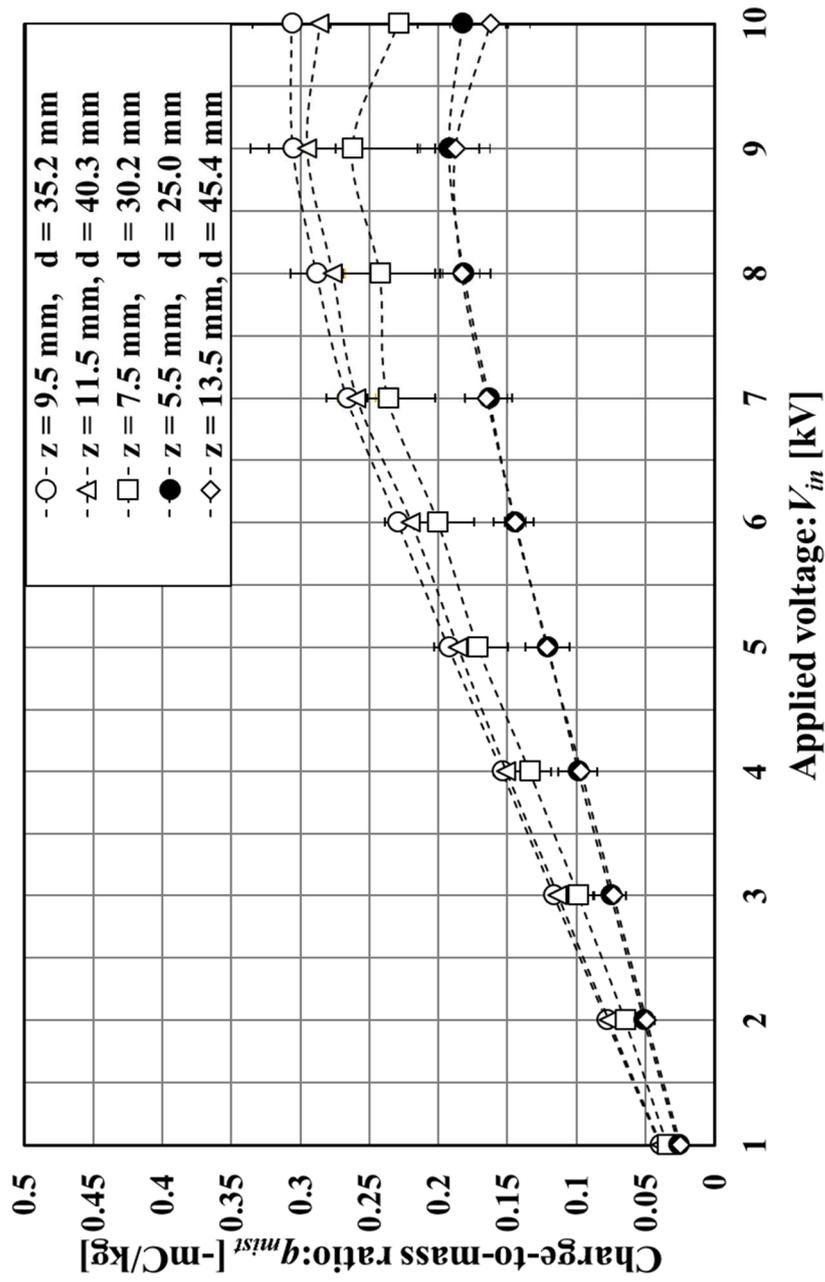


Fig.3.2 Characteristics of q_{mist} as a function of V_{in} .

Fig.3.2 は静電気学会誌より許諾を得て改変して転載
 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, Vol.43, No.4, 179 頁, 2019 年

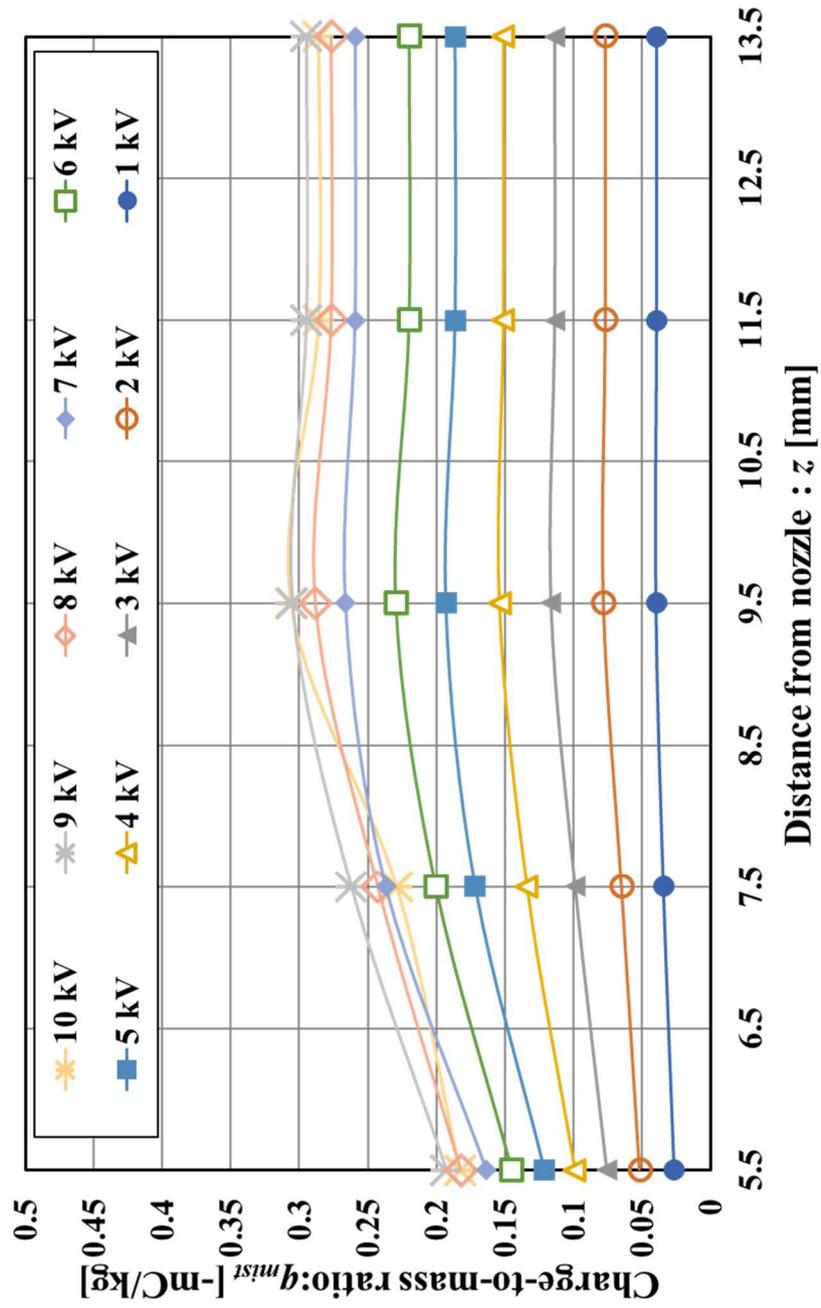


Fig.3.3 Relationship between z and q_{mist} .

3.4 考察

図 3.2 に示した比電荷の結果は, 印加電圧 V_{in} が 8 kV まで線形的に増加し, 9, 10 kV において比電荷が飽和または減少した. 山根ら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られる[3.4, 3.6]. 帯電した水粒子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.

2.4 節において述べた通り液膜分離点は, 印加電圧 V_{in} の増加に依存することなく液膜分離点は $z = 8.0$ mm であった. 液膜分離点と誘導電極の配置に関して, 図 3.3 に示した結果から, $z = 5.5$ 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. $z = 13.5$ 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. $z = 7.5$ mm の誘導電極は液膜分離点に近接している. $z = 9.5$ mm および 11.5 mm は液膜分離点よりも z 方向にやや下流側にある. 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は, ノズル噴出口から液膜が連続的に形成されて液膜分離点近傍まで広がるほど液膜の厚みは薄くなる. すなわち, 液膜が水粒子に分裂する箇所では液膜が薄く電荷分離が起きやすいと考えられる. 液膜分離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って比電荷が高い値を示したと考えられる. なお, 今後は液膜分離点の $z = 8.0$ mm に誘導電極を配置した際の比電荷の傾向, 誘導電極径を固定した際の比電荷の特性を調査していくことになる.

3.3 節の噴霧角度の形状に沿わせた誘導電極を用いてノズル先端から誘導電極環中心までの距離に応じた比電荷を測定した結果, 誘導電極内径 $d = 35.2$ mm (ノズル先端から誘導電極中心までの距離 $z = 9.5$ mm) において比電荷が高い値を示した. また, 2.4 節より液膜分離点の位置は静電誘導時(1~10 kV)に $z = 8.0$ mm 付近である

と推定された。この結果を踏まえて、さらなる比電荷の増加に適した誘導電極を製作し、誘導電極の配置に関して検討した。山根らの先行研究では誘導電極と噴霧液滴が接触しない最小の距離にした際に比電荷は高くなると報告されたことから[3.4]、著者も噴霧液滴が接触しない誘導電極内径を検討した。誘導電極の内径を $d = 33 \text{ mm}$ に製作して、誘導電極の配置は静電誘導による液膜分離点 ($z = 8.0 \text{ mm}$) を基準として比電荷の測定を行い考察した。

3.4.1 供試ノズルと誘導電極の最適化

供試ノズルと誘導電極の構造は 2.2.1 節と異なるため、下記に詳細を記述する。ノズル本体は図 3.4 に示すような絶縁体(硬質ポリ塩化ビニル樹脂)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 $\phi 11.6 \text{ mm}$)を配置した。誘導電極は丸棒(SUS304 製, 線径 $\phi 5.0 \text{ mm}$)を環状($d = 33.0 \text{ mm}$)に加工したものを使用した。その表面には軟質ポリ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。表 3.1 に供試ノズルに関する実験条件を示す。供試ノズルへの作動流体は 2.2.2 節で述べた井戸水を用いた。比電荷の測定装置および方法は 3.2 節に述べた通りである。誘導電極への印加電圧 V_{in} は 1 分毎に 5 kV から 10 kV まで 1 kV の刻みにて測定した。測定は各 2 回ずつ行った。

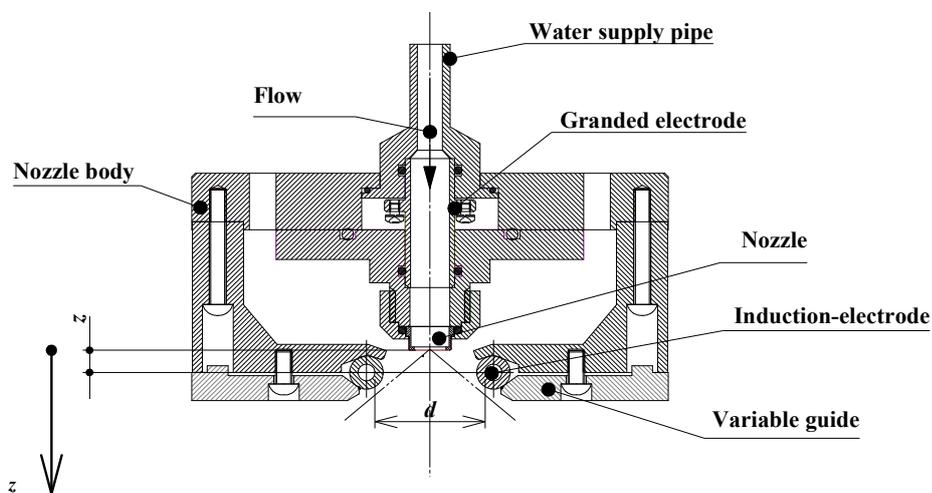


Fig.3.4 Experimental nozzle and induction-electrode system.

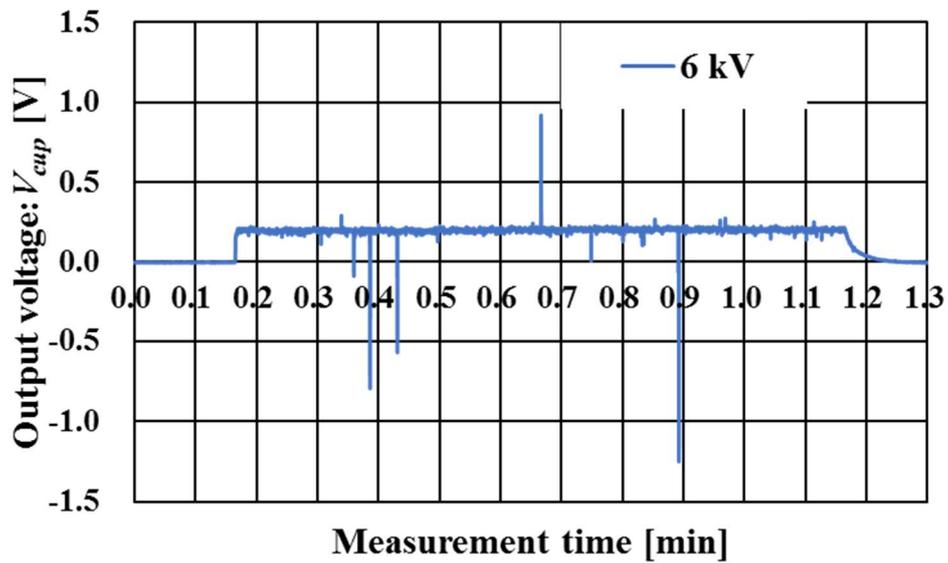
Table 3.1 Experimental condition.

Applied voltage: V_{in} [+kV]	5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0
Wire diameter [mm]	ϕ 5.0
Inner diameter: d [mm]	33.0
Distance from nozzle : z [mm]	7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.5

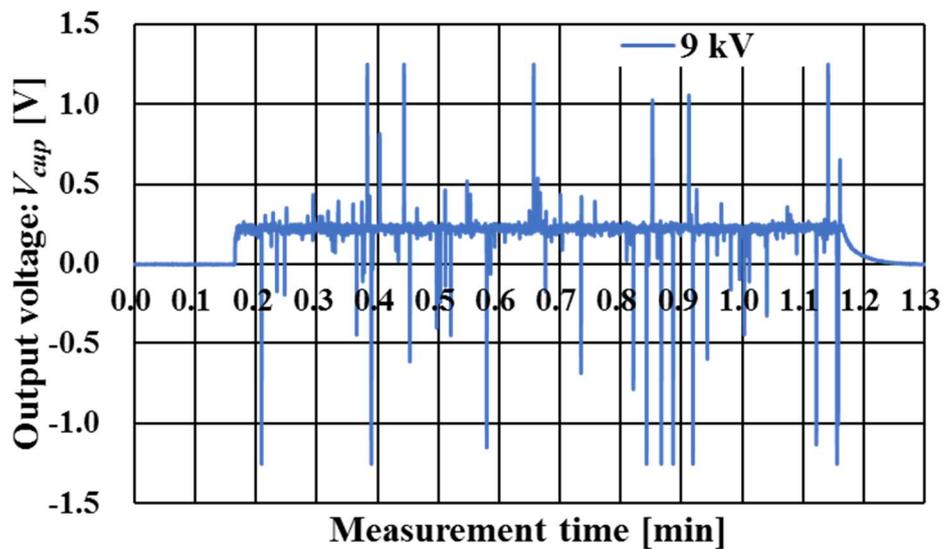
Fig.3.4 は東海大学紀要工学部より許諾を得て転載
 Table 3.1 は東海大学紀要工学部より許諾を得て改変して転載
 吉田哲雄, 辻 利秀, 大山龍一郎, ホローコーンノズルを用いた水噴霧の静電誘導帯電に関する実験,
 東海大学紀要工学部, Vol.58, No.2, 22 頁, 2018 年

図 3.5 にファラデーカップにおいて検出された電圧 V_{cup} (接地 0 V からの電位) の経時データ例を示す. 誘導電極の位置 z は 7.5 mm, 印加電圧 V_{in} は 6 kV および 9 kV 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. 印加電圧 V_{in} の増加に伴い, 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, 印加電圧 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ナノ秒である. 図 3.5 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. 山根らは誘導電極からコロナ放電の発生をカメラにて撮影している. コロナ放電の発生要因は誘導電極が静電誘導による帯電した水粒子が誘導電極に付着したことで発生している. しかしながら, 本研究では, 誘導電極の素地に対して電氣的に絶縁性に優れた軟質ポリ塩化ビニル樹脂コーティングを施している. 従って, コロナ放電の発生は考えにくい. 実験時の確認では, 暗室状況で目視及びカメラにて確認を行ったが気中放電は見られなかった. コロナ放電が誘導電極から発生することで比電荷に影響を及ぼすかの原因に関しては, 誘導電極と直流高電圧電源の正極側にロゴスキーコイルを介すことで, コロナ放電特有のパルス状の電流がナノ秒で発生するのかが確認する必要がある. 今後の研究課題のひとつである.

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 $V_{average}$ を用いた. この電圧の平均値 $V_{average}$ とオペアンプ内の抵抗値 R (200 k Ω) から電流値 i (C/s) を算出し, 比電荷 q_{mist} (C/kg) は 3.2 節に述べた (3.1) 式より算出した.



(a) $V_{in} = 6$ kV



(b) $V_{in} = 9$ kV

Fig.3.5 Output voltage V_{cup}
 ($z = 7.5$ mm, $d = 33.0$ mm, $V_{in} = 6$ kV, 9 kV).

Fig.3.5 は東海大学紀要工学部より許諾を得て改変して転載
 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, Vol.58, No.2, 24 頁, 2018 年

図 3.5 の V_{cup} の時間平均値 $V_{average}$ を基に(3.1)式より算出した比電荷の結果を図 3.6 に示す. 図 3.6 は誘導電極の位置 z を 7.0 mm から 9.5 mm まで可変し, 誘導電極の印加電圧 V_{in} も 5 kV から 10 kV まで可変した際の比電荷の結果である. $z = 7.0$ 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 $z = 8.0$ mm において高い値であった. 3.3 節の比電荷に比べ 2 倍の比電荷となっている. すなわち, 誘導電極と噴霧液滴が接触しない最小の距離かつ液膜分離点の位置に誘導電極を配置した場合に比電荷は最も高くなることが本研究より判明した.

一般に中空円錐状の噴霧は, ノズル噴出口から液膜が連続的に形成されて液膜分離点近傍まで広がるほど液膜の厚みは薄くなる. すなわち, 液膜が水粒子に分裂する箇所では液膜が薄く電荷分離が起きやすいと考えられる. 静電誘導により液膜が誘導電極側へ引き伸ばされた位置に誘導電極を配置したことで, 比電荷が高まったと考えられる.

液膜分離点が静電誘導により変位する位置に誘導電極環中心を設けることで, 帯電した水粒子の比電荷は増加する. この知見により浮遊粉じんの除塵では, 帯電した水粒子と粉じんの吸着力がさらに高まることで粉じん濃度の低減が見込まれる. また, 消火・消煙では, 未燃焼材料部分への水付着量の増加によって初期消火の実現や有害煙の低減が見込まれるものになると考えられる. 比電荷の特性は, 液膜分離点と誘導電極位置および径に依存する重要な知見を得ることができた. 液膜分離点の位置および比電荷の特性を明らかとしたことで, ノズル先端に誘導電極を配置する設計指針を示すことができたと考える. なお, 今後は液膜の電界分布との関係を調査すること

が必要であると考えている.

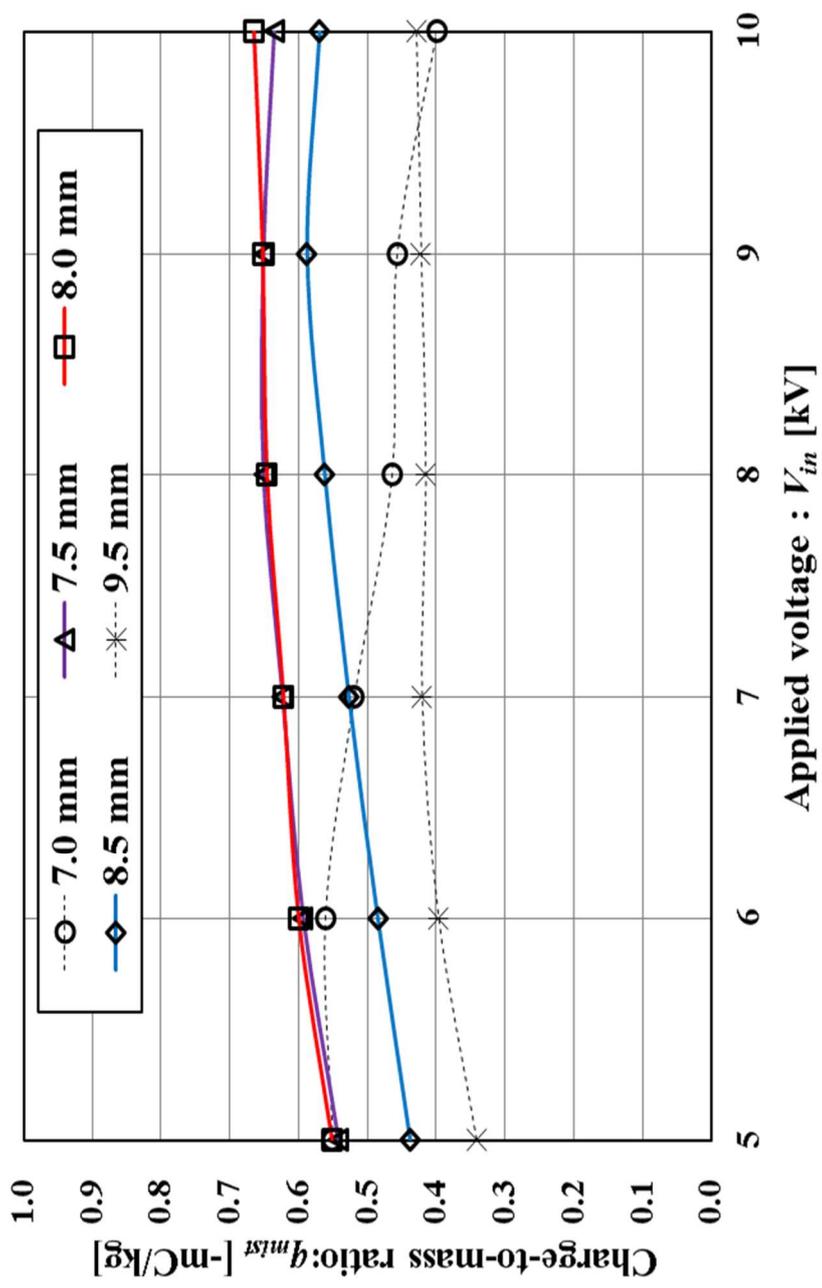


Fig.3.6 Characteristics of q_{mist} as a function of V_{in} .

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, Vol.58, No.2, 24 頁, 2018 年

3.4.2 静電誘導による噴霧水の粒径

3.4.1 節の比電荷の特性から、液膜分離点($z = 8.0$ mm)の位置に誘導電極環中心($d = 33.0$ mm)を配置した場合において比電荷が高い値を示していた。ここでは、静電誘導帯電の付与および付与しない場合での水粒子径について、実験を踏まえて考察する。静電気力による水粒子径の微粒化は、一流体ノズルや二流体ノズルの放水流量(数 ml/min)が非常に少ない場合に粒子径が小さくなると言われている[3.7]。本研究に用いた流量が比較的多い一流体ノズルの場合においても、静電誘導によって粒子径が変化するのかを検討した。

図 3.7 に水粒子径を測定する装置の概略を示す。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、ノズルの直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。水粒子径を測定する箇所はノズル直下 1.5 m の位置とノズル直下 1.5 m から水平方向に 0.5 m 離れた位置の 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。測定は静電誘導帯電を付与しない($V_{in} = 0$)場合と静電誘導時($V_{in} = 1 \sim 10$ kV)にて行った。機器の仕様を表 3.2 に示す。水粒子径は、粒子個数が 7000 個のザウター平均粒子径として評価した。併せて水粒子の飛翔の様子を確認するため、静電誘導帯電を付与しない($V_{in} = 0$)場合と静電誘導時($V_{in} = 1 \sim 10$ kV)に対する噴霧の可視化を行った。可視化に用いた YAG レーザー(カトウ光研製,G6000)はスリット光(スリット幅 1.0 mm)を噴霧中心の断面に照射して可視化を行った。

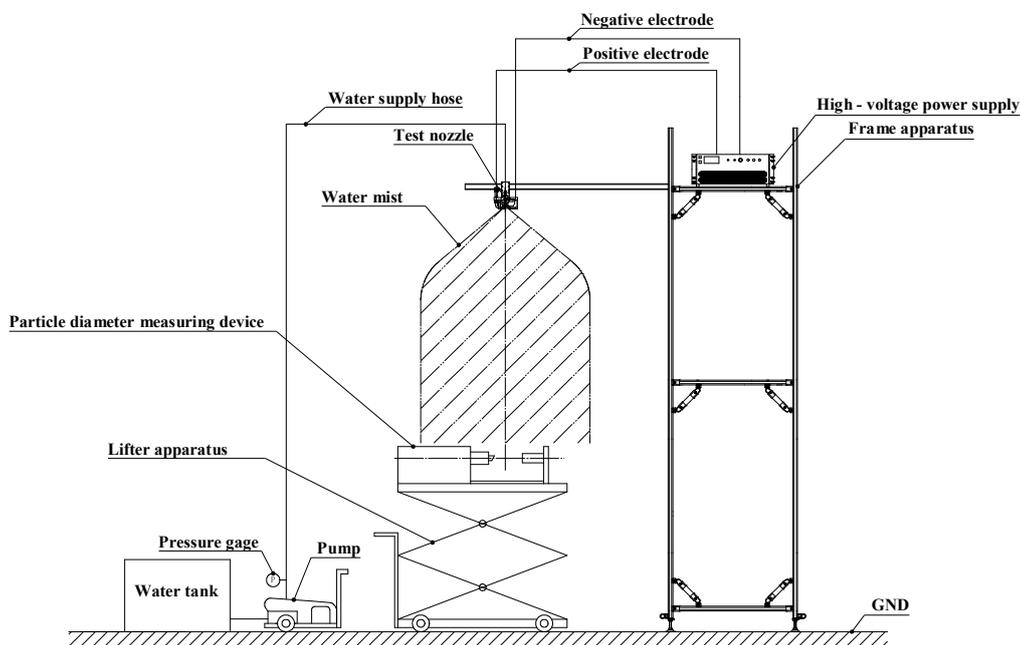


Fig.3.7 Experimental equipment for measurement of particle diameter.

Table 3.2 Experimental condition for measurement of particle diameter.

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

Fig.3.7 および Table 3.2 は東海大学紀要工学部より許諾を得て転載
 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, Vol.58, No.2, 23 頁, 2018 年

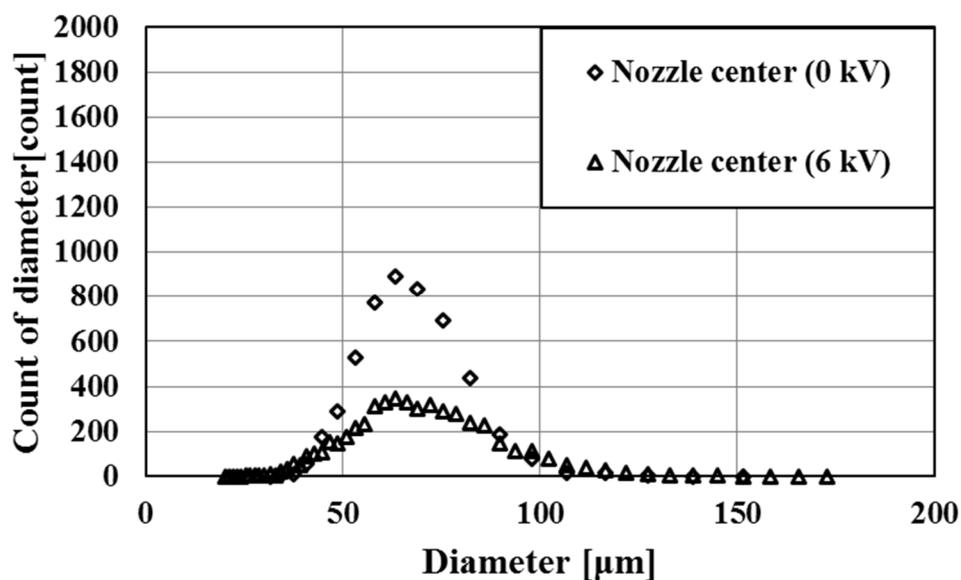
図 3.8 に液膜分離点 ($z = 8.0 \text{ mm}$) の位置に誘導電極環中心 ($d = 33.0 \text{ mm}$) を配置した場合の水粒子径の分布を示す. 図 3.8 は(a)ノズル直下 1.5 m の位置にて測定した粒子径, (b) ノズル直下 1.5 m から水平方向に 0.5 m 離れた位置にて測定した粒子径に対する粒子個数の分布である. ここでは一例として, 誘導電極 ($d = 33 \text{ mm}$) の印加電圧 V_{in} を 0 kV と 6 kV の場合の結果を示している. 図 3.8 に示した粒子径分布からザウター平均粒子径 D を求めた結果を表 3.3 に示す. また, 図 3.9 に図 3.8 の粒子径の範囲を狭めた分布を示す.

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. 図 3.9(a)より噴霧直下では静電誘導時 ($V_{in} = 6 \text{ kV}$) において, $30 \sim 40 \mu\text{m}$ 程度の粒径が静電誘導帯電を付与しない ($V_{in} = 0$) 場合に比べて粒子数が多く測定されている. また, 図 3.9(b)より水噴霧の外縁部でも静電誘導時 ($V_{in} = 6 \text{ kV}$) において, $120 \sim 190 \mu\text{m}$ 程度の粒径が静電誘導帯電を付与しない ($V_{in} = 0$) 場合に比べて粒子数が多く測定されている. この原因は, 帯電した小さな水粒子が斥力により互いに反発し静電微粒化の促進に伴って現れた現象であると考えられる. また, 噴霧外縁部の粒子径が $200 \mu\text{m}$ 以上では, 粒径と質量が大きいため静電微粒化していないと考えられる.

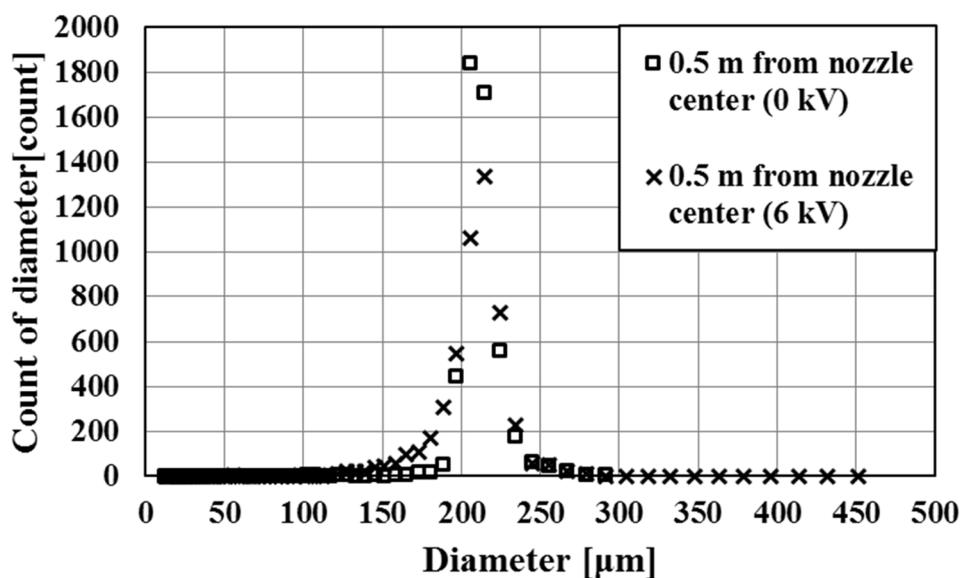
静電誘導時 ($V_{in} = 6 \text{ kV}$) には, 図 3.8 および図 3.9 に示したザウター平均粒子径に相当する粒子数が静電誘導帯電を付与しない ($V_{in} = 0$) に比べて少なくなっている. これは, 水粒子が帯電することによって開放空間中 (ノズル仕様の噴霧領域から外部) に飛散する水粒子が増えるためであると考えられる.

そこで, 静電誘導時 ($V_{in} = 6 \text{ kV}$) と静電誘導帯電を付与しない ($V_{in} = 0$) ときの噴霧飛散状況を確認した. 図 3.10 に(a) $V_{in} = 0 \text{ kV}$ 時, (b) $V_{in} = 6 \text{ kV}$ 時における噴霧の可視化を示す. 可視化により(a) $V_{in} = 0 \text{ kV}$ では, 噴霧の形態は噴霧角度に沿った形態となっていることが確認できる. (b)の $V_{in} = 6 \text{ kV}$ では, 静電誘導により水粒子が負に帯電しているため噴霧角度の形態で噴霧されておらず, 空間中に飛散していることが確認で

きる. すなわち, 帯電した小さな水粒子が斥力により互いに反発し静電微粒化の促進に伴って現れたことが要因として考えられる.



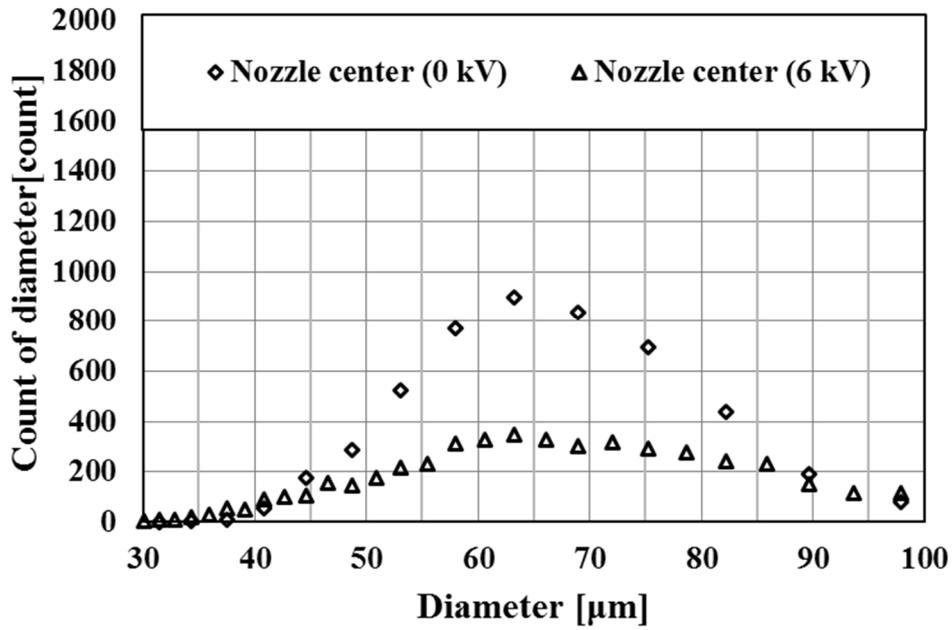
(a) Position of nozzle center



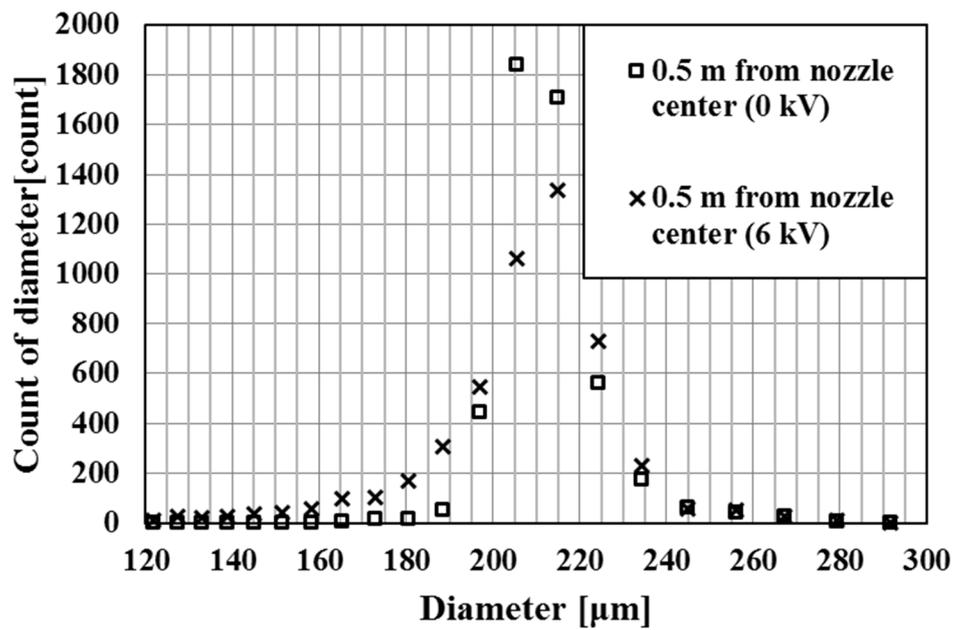
(b) Position 0.5 m from nozzle center

Fig.3.8 Distribution of particle diameter in water mist ($z = 8.0$ mm, $d = 33.0$ mm, $V_{in} = 0$ kV, 6 kV).

Fig.3.8 は東海大学紀要工学部より許諾を得て転載
 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, Vol.58, No.2, 25 頁, 2018 年



(a) Position of nozzle center



(b) Position 0.5 m from nozzle center

Fig.3.9 Distribution of particle diameter in water mist ($z = 8.0 \text{ mm}$, $d = 33.0 \text{ mm}$, $V_{in} = 0 \text{ kV}, 6 \text{ kV}$).

Fig.3.9 は東海大学紀要工学部より許諾を得て改変して転載
 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, Vol.58, No.2, 25 頁, 2018 年

Table 3.3 Result of sauter mean diameter.

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



(a) $V_{in} = 0$ kV



(b) $V_{in} = 6$ kV

Fig.3.10 Visualization of flowing water mist from electrostatic induction nozzle ($z = 8.0$ mm, $d = 33.0$ mm, $V_{in} = 0$ kV, 6 kV).

Table 3.3 は東海大学紀要工学部より許諾を得て転載
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, Vol.58, No.2, 25 頁, 2018 年

3.4.3 レイリー限界の評価

帯電した液滴表面の電荷は、ある限界(レイリー限界)に達するまで液滴の表面に留まる。すなわち、液滴の表面電荷密度が高まって電氣的な反発力が表面張力による凝集力を超えるまで帯電すると考えられている。このような水粒子の帯電量の限界を表す指標は、レイリー限界(理論最大帯電量: q_{limit})として次式にて定義されている [3.8].

$$q_{limit} = 8\pi(\epsilon_0\gamma r^3)^{1/2} \quad (3.2)$$

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、 r は水粒子の半径である。

3.4.1 節より測定した比電荷について、上述の(3.2)式からレイリー限界に対して何 %程度の帯電量であるのかを検討した。3.4.2 節に述べた水粒子径の測定結果から、水粒子径(直径)が主に $70 \mu\text{m}$ と $217 \mu\text{m}$ を各々の中心として分布していた。その結果、2箇所から測定したザウター平均粒子径 D は $144 \mu\text{m}$ (半径 r は $72 \mu\text{m}$) であった。水の表面張力 γ を 72.75 mN/m (水温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ の時)として、(3.2)式より理論最大帯電量 q_{limit} を算出すると 7.9 mC/kg となった。図 3.11 に 3.4.1 節より得られた比電荷 q_{mist} と理論最大帯電量 q_{limit} との割合を示す。

図 3.11 の結果から液膜分離点 ($z = 8.0 \text{ mm}$) の位置に誘導電極環中心 ($d = 33.0 \text{ mm}$) を配置した場合に、印加電圧 V_{in} の増加に伴い 7~8 %程度の帯電量であった。この値はレイリー限界 q_{limit} の 1 割に満たないことがわかった。また、誘導電極環中心 ($d = 33.0 \text{ mm}$) をノズル先端から $z = 7.5 \text{ mm}$ の位置に配置した場合にも同程度であることがわかった。

山根らは放水流量 1.1 L/min 、平均粒子径 $103 \mu\text{m}$ の一流体中空円錐噴霧ノズル

を用いた場合に約 0.5 mC/kg の比電荷を得ている[3.4]. 比電荷はレイリー限界に対して、1~3.6 %程度の帯電量である. 一方, S.E.Law は放水流量 73 mL/min, 平均粒子径 30 μ m の二流体ノズルを用いた場合に 12 mC/kg の比電荷を得ている[3.9]. この値はレイリー限界の 23 %に相当する. この結果は水粒子径が小さい程大きくなるものと言及されている[3.9]. 本研究では, 流量の比較的多い一流体ノズルを対象としているため, 直接的な比較対象とならない.

先行研究から二流体ノズルを用いた静電誘導帯電方式を適用する場合には, ノズル噴出口を覆うように誘導電極を配置することで比電荷を高める指針が示されている. しかしながら, 一流体ノズルではその配置に伴う設計指針が示されていない.

本研究から得られた比電荷の特性について, 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ている. 誘導帯電方式における一流体中空円錐型ノズルおよび誘導電極を設計するにあたっては, 静電誘導における液膜分離点の位置を考慮し, 誘導電極に液滴が接触しないような電極径とすることで比電荷を高めることができる. 以上のことから, 一流体ノズルを用いた静電誘導帯電方式の設計指針を示すことができたと考える.

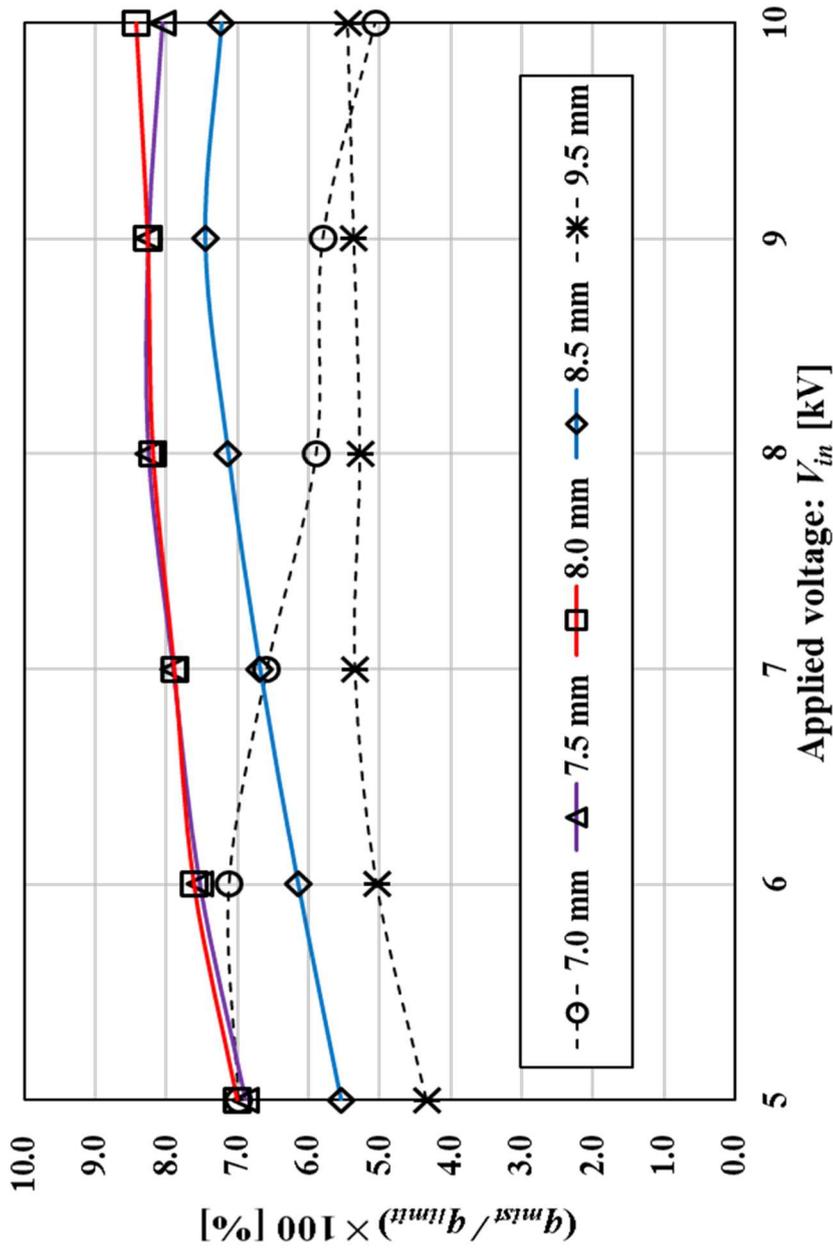


Fig.3.11 q_{mist} / q_{limit} as a function of V_{in} .

Fig.3.11は東海大学紀要工学部より許諾を得て改変して転載
 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, Vol.58, No.2, 25 頁, 2018 年

3.5 まとめ

本章では、2章で述べた静電誘導帯電の有無における液膜分離点の結果に基づき、噴霧角度に沿わせたノズル先端からの距離に応じた誘導電極を配置させた場合の比電荷を検討した。さらに、比電荷の増加に適した誘導電極を製作し、液膜分離点($z = 8.0 \text{ mm}$)を基準として比電荷を評価した。併せて、静電誘導による噴霧水の粒径とレイリー限界の評価から得られた知見を下記に示す。

- (1) 実験では、ノズル先端からの距離をパラメーターとして噴霧角度の外縁に沿わせて環状誘導電極を配置した。比電荷 q_{mist} は、印加電圧 V_{in} に依存して増加し、その値は 10^{-4} C/kg オーダーであることが確認された。また、誘導電極を配置する位置(z)が僅かに異なるだけでも比電荷 q_{mist} が変化することが明確となった。
- (2) 中空円錐状ノズルの噴霧は、ノズル噴出口から液膜が連続的に形成されて液膜分離点近傍まで広がるほど液膜の厚みは薄くなる。すなわち、液膜が水粒子に分裂する箇所では液膜が薄く電荷分離が起きやすいと考えられる。液膜分離点となる領域を覆うように誘導電極を配置した時に比電荷は高い値を示すものと考えられた。
- (3) 環状誘導電極($d = 33.0 \text{ mm}$)中心を液膜分離点($z = 8 \text{ mm}$)の位置に配置したとき、比電荷は最も高くなることが判明した。また、誘導帯電方式における一流体中空円錐型ノズルおよび誘導電極を設計するにあたっては、静電誘導における液膜分離点の位置を考慮し、誘導電極に液滴が接触しないような電極径とすることで比電荷を高めることができる。
- (4) 静電誘導を付与しない場合と付与した場合における水粒子径は、ほとんど粒子径に差は見られないものであった。静電誘導時は帯電した小さな水粒子が斥力により互いに反発して、静電微粒化の促進に伴って開放空間中に飛散することを確認

した.

- (5) 水粒子の比電荷は, 理論最大帯電量(レイリー限界 q_{limit}) に対して 7~8 %程度であった. この値は, 一流体中空円錐噴霧ノズルを用いた先行研究と比べて約 2 倍の値となった. このことから, 比電荷を高めるためのノズルの設計指針を示すことができたと考える.

[第 3 章の参考文献]

- [3.1] W.E.Splinter: Electrostatic charging of agricultural sprays.
Transactions of the ASAE, Vol.11, No.4, pp.491-495 (1968).
- [3.2] Webb.B.K and H.D.Bowen: Electrostatic field break down phenomena in applying charged particles. Transactions of the ASAE, Vol.13, No.4, pp.455-459 (1970).
- [3.3] R.A.Coffee: Electrodynamic crop spraying. Outlook on Agriculture,
Vol.10, No.7, pp.350-356 (1981).
- [3.4] 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, Vol.70, No.4, pp.115-122 (2008).
- [3.5] 静電気ハンドブック, 静電気学会編, オーム社, pp.319 (2006).
- [3.6] S.E.Law and H.D.Bowen: Charging liquid spray by electrostatic induction.
Transactions of the ASAE / American Society of Agricultural Engineer, Vol.9,
No.4, pp.501-506 (1966).
- [3.7] 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), Vol.37, No.298, pp.1178-1186 (1971).
- [3.8] RAYLEIGH Lord: On the equilibrium of liquid conducting masses charged with
electricity. Philosophy magazine, Vol.14, pp.184-186 (1882).
- [3.9] S.E.Law: Electrostatic pesticide spraying ; concepts and practice. IEEE
TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol.IA-19, No.2, pp.160-
168 (1983).

第4章 結論

本論文では、一流体ノズルの静電誘導帯電方式を浮遊粉じんの除塵や消火・消煙に応用するにあたって、水粒子の比電荷を高めるために有用な知見を見出すことを目的としている。具体的には、ノズル先端に配置する誘導電極の位置を検討した。まず、ノズル噴出口から放出する液膜が静電気力によって変位する物理的な詳細は未だに明らかとなっていなかったことから、液膜分離点の評価を検討した。その結果、静電誘導により液膜が誘導電極側へ引き伸ばされて延伸するという知見を得た。次に、液膜分離点の変位を踏まえて誘導電極に対する水粒子の比電荷を評価した。液膜分離点を覆うように誘導電極を配置することで、比電荷は高まる知見を得た。さらに、比電荷を増大させるために新たな環状誘導電極径を製作して、液膜分離点の位置を基準とした誘導電極の配置における比電荷の評価を行った。液膜分離点が静電誘導により変位する位置に誘導電極環中心を設けることで水粒子の比電荷は増加することから、液膜分離点と誘導電極の相対的な配置を見出した。静電誘導を付与しない場合と付与した場合における水粒子径は、ほとんど粒子径に差は見られないものであった。静電誘導時は帯電した小さな水粒子が斥力により互いに反発して、静電微粒化の促進に伴って開放空間中に飛散することを確認した。

本研究から得られた比電荷とレイリー限界(理論最大帯電量)との割合に関して評価を行った。その結果、水粒子の比電荷は、レイリー限界に対して7~8%程度であった。この値は、一流体中空円錐噴霧ノズルを用いた先行研究と比べて約2倍の値となった。すなわち、比電荷を高めるためのノズルの設計指針について明示することができた。

以下に本論文で得られた結果について総括する。

第1章 序論

第1章では、本研究の背景と目的について述べた。まず、静電噴霧の代表的な方式について特徴と先行研究の詳細について整理した。次に、本研究の目的と研究課題を提案し、その評価に関する実験の概略を示した。

第2章 液膜分離点の評価

第2章では、液膜分離点の評価するにあたって液膜分離点の測定方法について述べた。本研究では液膜分離点の評価するため、高速度カメラを用いた可視化とプローブ測定(触針法により液膜に流れる電流の有無の判定)を用いて検討した。

2章で得られた結果は以下の通りである。

- (1) 噴霧の可視化では、ノズル噴出口から液膜が形成され水粒子に微粒化する様子を定性的に把握することができた。液膜はノズル噴出口から伸びて、その先端で微粒化している。誘導電極を設計するにあたっては、液膜分離領域に静電誘導を効果的に発生させるように検討する必要がある。
- (2) 触針法の実験から本供試ノズルの液膜分離点は、印加電圧を付与しない(0 kV)場合に $z = 7.0 \text{ mm}$ であったのに対して、静電誘導時(1~10 kV)では z 方向に 1.0 mm 延伸することがわかった。
- (3) 静電誘導により液膜分離点が延伸した理由は、誘導電極(正極性)と帯電した液膜(負極性)の間に静電引力が生じていたため、マックスウェル歪み応力によって液膜が誘導電極側へ引き伸ばされたのではないかと考えられる。また、液膜が水粒子に分裂する箇所では液膜が薄く電荷分離が起きやすいと考えられる。得られた結果から、静電誘導帯電においてノズル噴口からの液膜から水粒子に分離する位置を把握する上で有効な実験結果であったと推察する。

第3章 比電荷の評価

3章では、前章2章で述べた静電誘導の有無による液膜分離点の変位を踏まえて誘導電極に対する水粒子の比電荷をファラデーケージにより評価した。測定方法と実験結果、噴霧の外縁に沿わせた誘導電極に対する比電荷から液膜分離点と誘導電極の相対的な配置を検討し考察した。また、比電荷の増加に適した誘導電極を製作して比電荷を評価した。

3章で得られた結果は以下の通りである。

- (1) 実験では、ノズル先端からの距離をパラメーターとして噴霧角度の外縁に沿わせて環状誘導電極を配置した。比電荷 q_{mist} は、印加電圧 V_{in} に依存して増加し、その値は 10^{-4} C/kg オーダーであることが確認された。また、誘導電極を配置する位置 (z) が僅かに異なるだけでも比電荷 q_{mist} が変化することが明確となった。
- (2) 中空円錐状の噴霧は、ノズル噴出口から液膜が連続的に形成されて液膜分離点近傍まで広がるほど液膜の厚みは薄くなる。すなわち、液膜が水粒子に分裂する箇所では液膜が薄く電荷分離が起きやすいと考えられる。液膜分離点となる領域を覆うように誘導電極を配置した時に比電荷は高い値を示すものと考えられた。
- (3) 環状誘導電極 ($d = 33.0$ mm) 中心を液膜分離点 ($z = 8$ mm) の位置に配置したとき、比電荷は最も高くなることが判明した。また、誘導帯電方式における一流体中空円錐型ノズルおよび誘導電極を設計するにあたっては、静電誘導における液膜分離点の位置を考慮し、誘導電極に液滴が接触しないような電極径とすることで比電荷を高めることができる。
- (4) 静電誘導を付与しない場合と付与した場合における水粒子径は、ほとんど粒子径に差は見られないものであった。静電誘導時は帯電した小さな水粒子が斥力により互いに反発して、静電微粒化の促進に伴って開放空間中に飛散することを確認した。

- (5) 水粒子の比電荷は、理論最大帯電量(レイリー限界 q_{limit})に対して7~8%程度であった。この値は、一流体中空円錐噴霧ノズルを用いた先行研究と比べて約2倍の値となった。すなわち、比電荷を高めるためのノズルの設計指針について明示することができた。

今後の研究課題

静電誘導帯電方式におけるノズルを設計する上では、本論文で述べた一流体中空円錐ノズル以外の充円錐、扇形、直進ノズルなどのノズルを用いる場合や誘導電極による電界の分布等まだ不明なことが多い。ノズルチップの形状や放水圧力の違いによって、液膜分離点および比電荷が変わることも十分に予測される。また、静電誘導の有無だけでなく、放水圧力、流量、ノズルチップ形状など、諸特性に影響を及ぼす因子は複数考えられるため今後もデータの蓄積が必要であると考えられる。また、誘導電極を配置した場合での液膜の電界分布との関係を照らし合わせて現象を解明していくことが課題となる。

以上が本博士論文における各章の総括である。

本研究において得た主な知見は、比電荷が誘導電極と液膜分離点の相対的な位置関係に大きく依存することである。本成果は流量が比較的多い一流体ノズルを用いた静電誘導帯電方式を設計する上での工学的な設計指針になる。建築・土木現場で発生する浮遊粉じんの洗い落とし(除塵)をする分野に応用するにあたって、静電噴霧ノズルの開発をする上で重要な知見の一つを明示できたと考えられる。また、消火・消煙効果も十分に期待できることから新たな消防機器としての発展も大いに期待できる。人命救助の観点から社会に広く普及できる産業応用に繋がることを願い、今後の研究に役立てられることを願うものである。

謝辞

本論文は、著者がホーチキ株式会社の研究業務である静電誘導帯電ノズルに関する研究成果を東海大学大学院博士論文として纏めたものである。

学位論文を纏めるにあたって、指導教員である東海大学大学院総合理工学研究科総合理工学専攻教授 大山 龍一郎 博士にはご助言を戴くとともに細部にわたりご指導を戴きました。ここに深謝の意を表します。

学位論文審査において、貴重なご指導とご助言を頂きました主査である同専攻教授 沖村 邦雄 博士，同専攻教授 新屋敷 直木 博士，工学部機械工学科教授 畔津 昭彦 博士，工学部機械工学科教授 岡永 博夫 博士，元工学部機械工学科教授 青木 克己 博士に御礼申し上げます。

長年の目標でありました博士号を取得する機会を与えて下さいました，米澤 裕道 取締役上席執行役員(ホーチキ㈱技術生産本部)ならびに秋葉 浩司 執行役員 兼 副本部長 兼 開発研究所長(ホーチキ㈱技術生産本部)に厚く御礼申し上げます。

2008 年のホーチキ㈱入社以来，今日に至るまで二人三脚にて静電噴霧の研究，技術開発そして商品化を目指して，社内における大先生として多くの技術を教授して頂きながら業務を遂行して辻 利秀 専門部長(ホーチキ㈱開発研究所)には，感謝してもしきれない思いです。この場を借りて御礼申し上げます。また，茨木 博 課長 兼 工学博士(ホーチキ㈱開発研究所)は同じ社会人博士として東海大学にて学位を所得した先輩であり，多くのアドバイスを頂き業務との両立に関しても便宜を図って頂きました。心より感謝致します。

静電噴霧の技術を共同研究にて応用するにあたり，高木 賢二 担当部長 兼 工学博士(鹿島建設技術研究所)，挟間 貴雅 主任研究員 兼 工学博士(鹿島建設技術研究所)，池松 建治 グループ長(鹿島建設㈱土木管理本部)，末吉 隆信 次長(鹿島建設㈱土木管理本部)および数多くの現場にてお世話になった方々に厚く御礼申し上げます。静電噴霧の技術を応用してマイクロ EC ミスト[®] にて建築・土木の作業現場に粉じん対策技術として実績を積み重ねた結果，平成 30 年度土木学会環境賞といった非常に名誉ある賞を受賞できたことを心より感謝致します。

そして，私が東海大学の学部生・修士時代，社会に出た後にも研究に対する助言を頂きました東海大学 青木 克己 名誉教授に厚く御礼申し上げます。

最後に、社内の先輩をはじめ同僚，同期，友人と多くの方々からのご支援，母親の支えがあったからこそ，本論文を纏めることができました。ここに深く感謝申し上げます。

令和 2 年 3 月

吉田 哲雄