

噴霧塗装における運動中の液滴の表面電位測定に関する研究

栗原 悠太^{*,1}, 神 凜人*, 大黒 正敏*, 城田 農**, 宮川 泰明**,
岡部 孝裕**, 松川 嘉也***, 青木 秀之***, 斎藤 泰洋****, 福野 純一*****

(2025年3月3日受付; 2025年9月5日受理)

Measurement of Surface Potential of Moving Liquid Droplets in Spray Painting

Yuta KURIHARA ^{*,1}, Rito JIN*, Masatoshi DAIKOKU*, Minori SHIROTA**,
Taimei MIYAGAWA**, Takahiro OKABE**, Yoshiya MATSUKAWA***
Hideyuki AOKI***, Yasuhiro SAITO**** and Junichi FUKUNO*****

(Received March 3, 2025; Accepted September 5, 2025)

To clarify the electrical properties of liquid droplets formed during automotive spray painting, their surface potential was measured and compared with the estimated value. In preliminary tests using an electrostatic sensor, the surface potential of a metallic disk and a metallic sphere was measured, and it was found that accurate values were obtained regardless of the applied voltage, even when the radius of metallic objects was small. The surface potential of a liquid droplet in motion was then measured using electrostatic sensors with different time constants. For a large time constant of 20 ms, the measured values were only about 1/4 of the estimated ones. However, for a small time constant of 50 μ s, the results were in good agreement with the estimated values, regardless of the droplet velocity.

1. 緒言

自動車塗装工程における噴霧塗装では、塗料の30%程度が塗着せず廃棄されている。また、塗装工程で消費されるエネルギーは自動車製造全工程の25~40%を占めている。塗着効率の向上が望まれている。

キーワード: 噴霧塗装, 液滴, 表面電位, 帯電量

* 八戸工業大学

(〒031-8501 青森県八戸市大字妙字大開 88-1)
Hachinohe Institute of Technology, 88-1, Myo Ohbiraki,
Hachinohe-shi, Aomori 031-8501, Japan

** 弘前大学

(〒036-8561 青森県弘前市文京町 3)
Hirosaki University, 3, Bunkyo-cho, Hirosaki-shi, Aomori
036-8561, Japan

*** 東北大学

(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6)
Tohoku University, 6-6, Aramaki Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi,
Miyagi 980-8579, Japan

**** 九州工業大学

(〒804-8550 福岡県北九州市戸畠区仙水町 1-1)
Kyushu Institute of Technology, 1-1, Sensui-cho, Tobata-ku,
Kitakyushu-shi, Fukuoka 804-8550, Japan

***** 本田技研工業

(〒321-3325 栃木県芳賀郡芳賀町芳賀台 6-1)
Honda Motor Co., Ltd., 6-1, Hagadai, Haga-machi, Haga-gun,
Tochigi 321-3325, Japan

¹ m241002@hi-tech.ac.jp

DOI : <https://doi.org/10.34342/iesj.2025.49.6.206>

現在の自動車塗装工程では、高速ロータリーベルカップアトマイザが用いられており、これまで多くの塗装プロセス研究が行われてきた。塗装プロセスは、微粒化プロセス、飛行塗着プロセス、塗膜形成プロセスの3つに分けられる。まず、微粒化プロセス研究について、Ogasawara et al. は、ベルカップ回転数および液体供給流量が変化した際のベルカップ内面における液膜の流動パターンを分類し、そのパターンがベルカップエッジ部での液体の分裂パターンに及ぼす影響を実験的に調べた¹⁾。Soma et al. は、塗装条件下で、カップ面における液膜形成を自由表面の解析手法 Volume of Fluid (VOF) 法を用いてシミュレーションし、ベルカップ上を通過する液膜の流体力学的挙動を明らかにした²⁾。畠山らは、ベルカップ周端に溝を有する高速ロータリーベルカップから発生する液糸の分裂までの過程を実験的に観察し、画像処理による液糸直径などの定量評価を行い、算術平均粒径で規格化した生成液滴径の粒度分布が、 Γ 分布でよく表現できることを明らかにした³⁾。澤口らは、ノズルから液体を噴出させ、発生した液柱に高速気流（シェーピング・エア）を衝突させることで、ベルカップエッジ部における溝1本あたりの液糸を再現した実験を行い、その結果をもとに噴霧の飛翔角度はレイノルズ数により、噴霧全体の平均粒径はウェーバー数により無次元整理した⁴⁾。

近年、高速ロータリーベルカップアトマイザを用いた噴霧塗装において、計測が困難な液滴の挙動などを数値流体

力学により調べる研究が多く報告されている。Matsushita et al.は、高速ロータリーベルカッパトマイザにおける噴霧流れを、大きなスケールの渦を直接計算する乱流モデル (Large Eddy Simulation : LES) および乱流の運動エネルギー k とその散逸率 ε という2変数を用いて乱流特性を計算する k - ε 2方程式モデルを用いて解析するとともに、その解析精度を評価し、乱流モデルが噴霧粒子挙動に与える影響を報告した⁵⁾。しかし、高電圧印加時の帶電を伴う微粒化プロセスは現象が非常に複雑であり、未だ現象解明やモデル化に至っていない。

我々の塗装プロセス研究は、飛行塗着プロセスや塗膜形成プロセスに移行してきており、高電圧印加時の帶電を伴う条件での研究が進められている。飛行塗着プロセスについて、安村らは、高速ロータリーベルカッパ周囲の噴霧の流れをシミュレーションし、粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry : PIV 法) を用いた実験結果と比較することで、塗着効率を低下させる要因を特定するとともに、シェーピング・エアおよび印加電圧が液滴挙動に及ぼす影響を明らかにした⁶⁾。

塗膜形成プロセスについて、白井らは、帶電液滴の透明導体基盤への衝突実験を行い、液滴の帶電量が衝突直前に形成されるディンプル形状と、衝突時に補足される気泡の大きさおよび数密度の分布に与える影響を調べた⁷⁾。また、児玉らは、液膜への液滴衝突実験を行い、液滴の広がり過程で 100 nm オーダーの空気薄膜が形成された時の接触線速度の時間変化についても調べている⁸⁾。しかし、塗料液滴の帶電および放電特性については、いまだ不明な点が多い⁹⁾。

電圧印加時のベルカッパから生成される液糸から分裂する液滴の帶電メカニズムの解明および自動車の静電噴霧塗装に関するシミュレーションの精度向上には、初期条件となる生成液滴径やその液滴1個あたりの帶電量等を正確に見積もることが重要である。清家は、半導体デバイス洗浄プロセスにおける静電気障害防止技術の確立を目的に、純水を高圧噴射した際に発生する噴霧全体の帶電量を測定している¹⁰⁾。また、田畠や遠藤によって、液体の噴霧時間または単位質量あたりの帶電量については報告されているものの¹¹⁻¹³⁾、高電圧を印加した場合の单一液滴の帶電量については報告が少ない¹⁴⁾。

本報では、噴霧の基本的な電気的特性の解明を目的に、液滴の帶電特性を調べ、運動中の液滴の表面電位測定結果と帶電量測定結果を基にした表面電位推算値との比較検討を行った結果について報告する。

2. 実験装置および実験条件

図1に帶電液滴の帶電量および表面電位測定系を示す。①シリジングポンプを使用して試料液体を一定流量 (12 mL/h) で②ノズル (ステンレス製注射針 18G, (外径 $\phi 1.25 \pm 0.02$ mm, 内径 $\phi 0.82 \pm 0.03$ mm)) に連続供給し、ノズル端から液滴を滴下させる。ノズルに③高電圧装置 (株式会社 MECC 製負極性高電圧電源 (HVU-30N100)) を接続し、帶電液滴を生成する。生成された帶電液滴を④ファラデーケージ (春日電機株式会社製静電荷量測定器 (KQ-1400)) に10個滴下し、⑤エレクトロメータ (株式会社エー・ディー・シー製 (8252型)) を用いて帶電量を測定する。この時、ノズル先端や電圧印加部からの電場の影響を軽減するために、⑥シールドをノズル先端から垂直距離 50 mm の位置に設置した。また、印加電圧を精度よく求めるために⑦高電圧計 (菊水電子工業株式会社製 (149-10A)) を用いた。さらに、落下中の帶電液滴の表面電位を時定数の異なる2種類の⑧静電気センサ (春日電機製 KSD-3000 および TREK Model 370-1) により測定し、その測定データは⑨マルチ入力データロガー (KEYENCE 社製 (NRX-100 および NR-HV04)) を用いてPC内に取り込む。なお、Model 370-1 の時定数は 50 μs (1000 V), KSD-3000 の時定数は約 20 ms である。

帶電液滴の生成・分裂挙動は、⑩高速度カメラ (株式会社フォトロン製リアルタイム圧縮・ストリーミング・ハイスピードカメラ INFINICAM・S/N: 16753004116・Type: M) を用いて、1000 fps で撮影した。この時、光源として LED 光源 (武藤工業株式会社製 MUTOH TRACER/LitaVi SLT-A4C) を使用した。

液滴の帶電量測定は印加電圧を 0~−8000 V の範囲で変化させて行った。この時の液滴の生成周期は 6.8~0.9 s 程度であり、その時に生成される液滴径は均一であると仮定し、10個の液滴の生成時間、供給流量から1個あたりの体

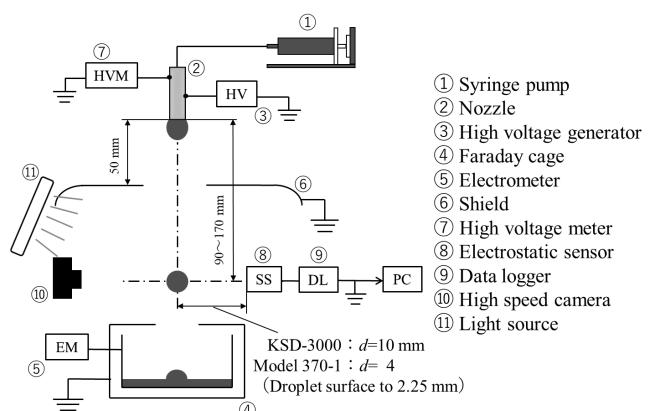


図1 液滴の帶電量および表面電位測定系

Fig.1 Measurement system of charge and surface potential for liquid droplet.

積を算出して液滴径を求めた。

本研究では、実際の塗料噴霧と同じように運動する液滴の表面電測定の可能性を検討するために、液滴速度の表面電位測定値への影響を調べた。そのためにノズル端から落下する液滴について、その測定位置を 90~170 mm と変化させることで、異なる速度での液滴表面電位を測定した。この時の各測定点における液滴のセンサ部通過速度は、高速度カメラで撮影して求めた。なお、液滴速度と表面電位の測定は印加電圧 -1000 V の条件で行った。

試料液体は蒸留水（共栄製薬株式会社製）で、恒温槽を用いて 20°C で一定とし、室温 20~29°C、相対湿度は 48~68% の範囲で実験を行った。

静電気センサは大きな平面の表面電位を測定するものであるため、微小液滴の表面電位測定の予備実験として、まず金属円板直径やセンサ - 金属円板距離の表面電位表示値への影響、続いて、金属球直径やセンサ - 金属球距離の表面電位表示値への影響を調べた。

図 2 に円板および球の表面電位測定系を示す。金属円板および金属球をそれぞれ後方に取り付けた金属製ロッドに

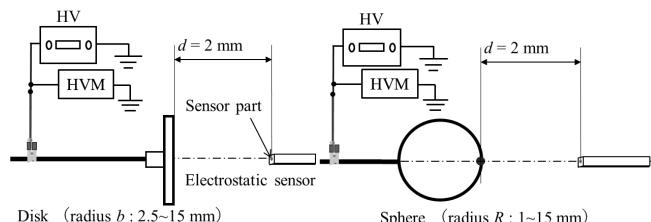
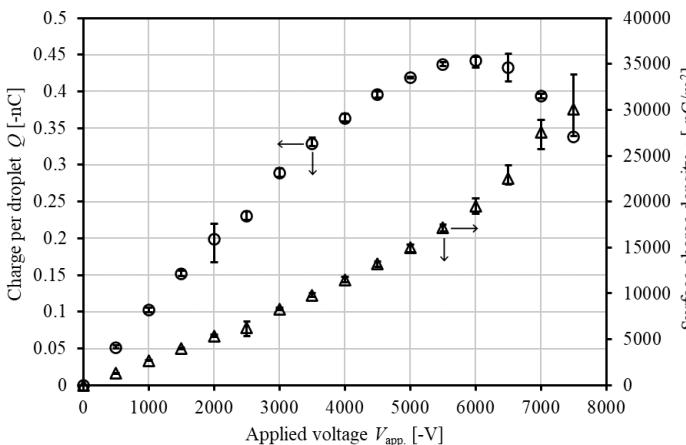


図 2 円板および球の表面電位測定系
Fig.2 Experimental apparatus for measurement of surface potential of disk and sphere.



(1) 帯電量および表面電荷密度の印加電圧による変化
(1) The variation of charge per droplet and surface charge density with applied voltage

図 3 液滴 1 個あたりの帶電量、表面電荷密度および液滴径の印加電圧による変化 (流量 12 mL/h)
Fig.3 The variation of charge per droplet, surface charge density and droplet diameter with applied voltage. (Flow rate 12 mL/h)

より固定する。この円板 (半径 $b = 2.5 \sim 15 \text{ mm}$) および球 (半径 $R = 1.0 \sim 15 \text{ mm}$) を高電圧装置で電圧を印加し、静電気センサ (TREK Model 370-1) を用いて表面電位を測定する。実験は印加電圧 -500 V, -1000 V, -2000 V の 3 条件で行った。

3. 液滴の帯電量測定

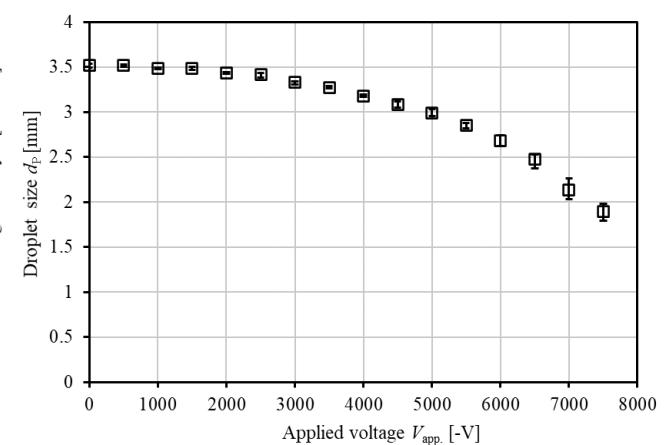
図 3(1)に純水の液滴 1 個あたりの帯電量 Q [-nC] (図中○) および液滴表面電荷密度 σ [-nC/m²] (図中△) の印加電圧による変化を複数回測定した平均値を示す。1 個あたりの帯電量は印加電圧とともに増加した後に -6000 V でピーク値をとり、それ以後は減少することがわかる。このような減少傾向は、印加電圧增加に伴い、液滴径が小さくなることに加えて、余滴の発生や微粒化が活発となり¹⁵⁾、さらに液滴からの放電等⁹⁾が原因と考えられる。なお、本実験範囲では、周囲湿度の帯電量への影響¹⁶⁾はわずかであった。

図 3(2)に液滴径 d_p [mm] の印加電圧による変化を示す。液滴径は印加電圧の増加に伴い減少することがわかる。これは印加電圧の増加に伴い液滴に作用する静電気力が増加し生成周期が短くなるため、より小さい液滴が生成されるためと考えられる。このように液滴径が小さくなることで表面電荷密度は増加し続ける (図 3(1)) のである。

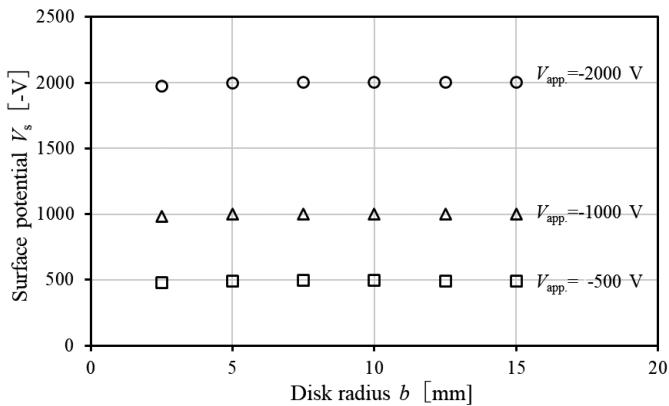
4. 表面電位測定

4.1 静止金属円板・金属球の表面電位測定

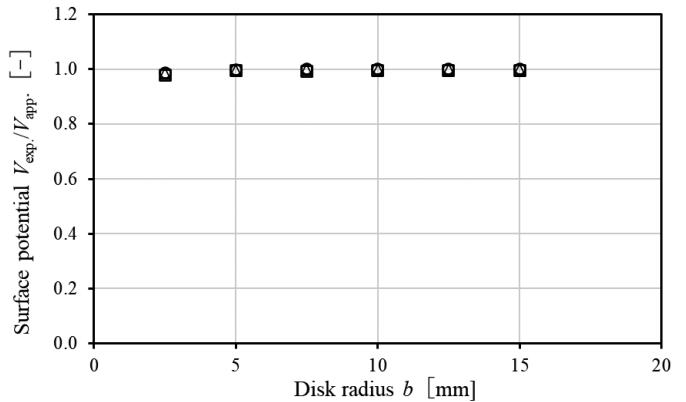
図 4(1)に金属円板表面電位の半径による変化を示す。表面電位表示値は、円板半径によらず、被測定物が平面のためにそれぞれの印加電圧とよく一致していることがわかる。



(2) 液滴径の印加電圧による変化
(2) The variation of droplet diameter with applied voltage

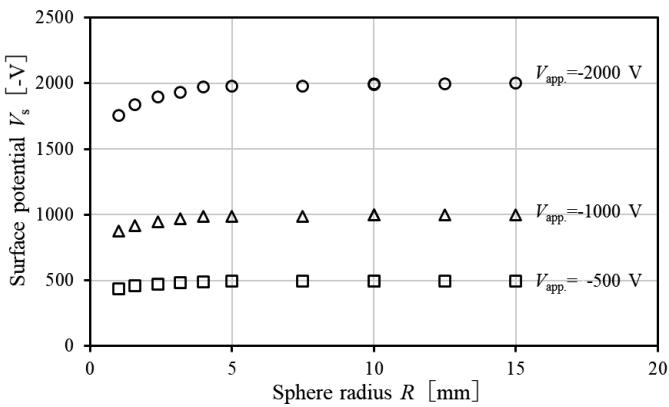


(1) 表面電位 V_s の円板半径による変化
 (1) The variation of surface potential V_s with disk radius

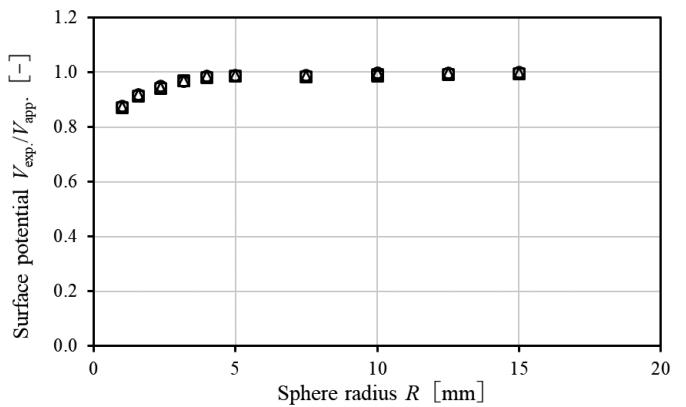


(2) 無次元表面電位の円板半径による変化
 (2) The variation of non-dimensional surface potential with disk radius

図4 表面電位の円板半径による変化
 Fig.4 The variations of surface potential with disk radius.



(1) 表面電位 V_s の球半径による変化
 (1) The variation of surface potential V_s with sphere radius



(2) 無次元表面電位の球半径による変化
 (2) The variation of non-dimensional surface potential with sphere radius

図5 表面電位の球半径による変化
 Fig.5 The variations of surface potential with sphere radius.

図4(2)は図4(1)に示した結果を無次元化した表面電位 $V_{\text{exp}}/V_{\text{app}}$ で表したものである、いずれの電圧の場合でも実験結果は重畳しており、円板半径によらず同等の特性を示すことがわかる。

図5(1)に金属球表面電位の半径による変化を示す。表面電位表示値は、球半径 $R = 5 \text{ mm}$ 以上では、印加電圧によらず真値とよく一致している。しかし、表面電位計は平面の表面電位を測定するものであり、球半径が小さくなると真値よりも小さく表示する傾向になることがわかる。

図5(2)は無次元表面電位 $V_{\text{exp}}/V_{\text{app}}$ で表した結果であり、いずれの電圧の場合でも、円板の場合と同様に球半径によらず同等の特性を示すことがわかる。球半径が小さくなると、表面電位表示値と真値との間の誤差が大きくなるものの、 $R = 1 \text{ mm}$ でも表面電位は印加電圧によらず 8割以上の値を示しており、球の形状を考慮した妥当な修正法を用い

れば、微小球についても高精度の測定が可能と思われる。

本研究では、印加電圧 -7500 V の場合でも生成される液滴半径は 0.95 mm 程度（図3(2)）を示しており、今回使用した金属球の最小半径 1 mm と同程度のため、液滴の表面電位測定が可能であり、さらに時定数の小さいセンサを用いれば、運動中の液滴の表面電位も測定が可能と考えられる。

4.2 運動中の液滴の表面電位測定

時定数の大きいセンサを用いて運動中の液滴表面電位測定¹⁴⁾を試みた結果では、液滴径が小さく、さらにその運動速度の影響により、表面電位表示値は推算値 V_s の $1/10$ 程度となった。なお、表面電位推算値 V_s は Gauss の法則¹⁷⁾により、次式で求めた。

$$V_s = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R} \quad (1)$$

ここで、 Q は液滴 1 個あたりの帶電量、 ϵ_0 は真空の誘電率、 R は液滴半径である。

本研究では、運動速度の表面電位表示値への影響を小さくするために、より時定数の小さいセンサを用いて運動中の液滴の表面電位測定を試みることにした。

図 6 に液滴表面電位 V_s のセンサ部通過速度 U による変化を示す。図中の▲は Model 370-1 の表示値、○は KSD-3000 の表示値、●は KSD-3000 の表示値に対して粒径 R およびセンサ - 被測定物間距離 d に対する修正を行った結果¹⁴⁾；

$$V_{\text{mod.}} = \frac{R}{34.14 \left(\frac{R}{d+R} \right)^2} V_{\text{exp.}} \quad (2)$$

である。なお、破線は(1)式で求めた表面電位推算値 V_s である。時定数の大きなセンサを用いて測定した液滴の表面電位表示値は、推算値 V_s の 1/10 程度であり、(2)式で粒径に対する修正を行った場合●でも、推算値の 1/4 程度となっている。これは、センサの時定数が約 20 ms であり、液滴半径 $R = 1.75$ mm、通過速度 $U = 1.5$ m/s では、センサ部(寸法 2×8 mm) 通過時間 $t = 2.3$ ms 程度と短いため、十分な出力が得られないままに液滴が通過することが原因と考えられる。それに対して、時定数の小さなセンサを用いて測定した液滴表面電位表示値▲は、センサ部通過速度によらず推算値 V_s とほぼ一致していることがわかる。Model 370-1 の時定数は 50 μs であり、液滴のセンサ部(寸法 5×5 mm) 通過時間(5 ms 程度)と比べて十分に小さいために、真値に近い液滴表面電位表示値を示すと考えられる。

本研究では、センサ部通過速度 $U = 1.25 \sim 1.72$ m/s で測定を行ったが、この速度範囲内では、表面電位表示値は速度の影響をほとんど受けないことがわかる。これにより、センサ時定数が液滴通過時間に比べて小さければ、微小な液滴であっても正確な表面電位測定が可能であると考えら

れる。このように個々の液滴の表面電位測定が可能であると考えられるため、将来的には粒度分布を持つ噴霧液滴群についても、さらに測定を進めていきたい。

5. 結言

本報では、運動中の液滴の表面電位測定を行うために静止金属円板・金属球を用いた予備実験を経て、液滴表面電位の実験結果と帶電量測定結果を基にした推算値との比較検討を行い、以下の結論を得た。

- 1) 液滴 1 個あたりの帶電量は -6000 V まで増加し、それ以降は減少する傾向が見られた。
- 2) 印加電圧の增加に伴い、液滴に作用する静電気力が増加して液滴の生成周期が短くなるため、液滴径は減少する。
- 3) 表面電荷密度は、印加電圧の増加に伴い液滴径が小さくなるため、増加し続ける。
- 4) 金属円板の表面電位表示値は半径によらず、真値とよく一致する。
- 5) 金属球の表面電位表示値は半径 5 mm 以上では半径によらず、真値とよく一致する。
- 6) 金属球半径 5 mm 未満では、表面電位真値よりも小さい表示値になるが、表示値の修正により微小球についても表面電位測定が可能である。
- 7) 運動中の液滴表面電位について、時定数が液滴通過時間に比べて十分に小さいセンサ(本研究では 50 μs)を用いれば、微小な液滴であっても正確な表面電位測定が可能である。

参考文献

- 1) S. Ogasawara, M. Daikoku, M. Shirota, T. Inamura, Y. Saito, K. Yasumura, M. Shoji, H. Aoki and T. Miura: Liquid Atomization

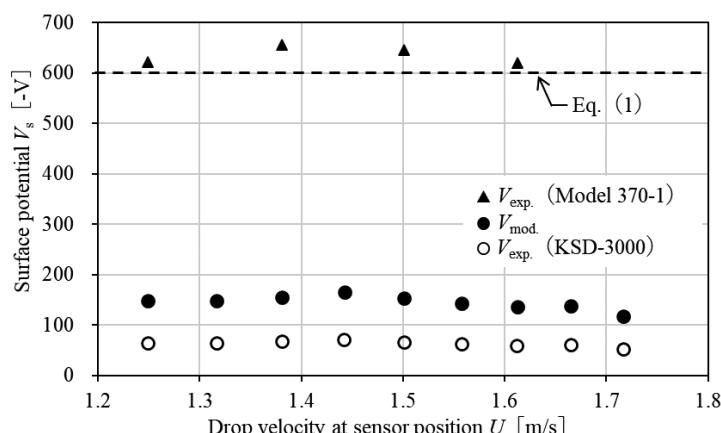


図 6 液滴表面電位のセンサ部通過速度による変化 (印加電圧 -1000 V, 流量 12 mL/h)
Fig.6 The variation of droplet surface potential with drop velocity through sensor section.
(Applied voltage -1000 V, Flow rate 12 mL/h)

- Using a Rotary Bell Cup Atomizer. *J. Fluid Sci. Technol.*, **5** (2010) 464
- 2) T. Soma, T. Katayama, J. Tanimoto, Y. Saito, Y. Matsushita, H. Aoki, D. Nakai, G. Kitamura, M. Miura, T. Asakawa, M. Daikoku, T. Haneda, Y. Hatayama, M. Shirota and T. Inamura: Liquid film flow on a high speed rotary bell-cup atomizer. *Int. J. Multiphase Flow*, **70** (2015) 96
 - 3) 畑山陽介, 羽田俊樹, 城田 農, 稲村隆夫, 大黒正敏, 相馬達哉, 斎藤泰洋, 青木秀之: 高速回転ベルカップアトマイザによる液糸の形成と分裂 (第1報: 液糸の形成および分裂の実験的観察と定量評価). 日本機械学会論文集 (B編), p. 1081 (2013)
 - 4) 澤口志信, 大黒正敏, 松森 悟, 岡部孝裕, 城田 農, 松川嘉也, 青木秀之, 松下洋介, 福野純一: 噴霧塗装におけるシェーピング・エアによる液柱の分裂特性. 日本機械学会2020年度年次大会講演論文集, (2020)
 - 5) Y. Matsushita, T. Katayama, Y. Saito, Y. Matsukawa, T. Okabe, M. Shirota, T. Inamura, M. Daikoku, J. Fukuno and H. Aoki: A Spray Painting Simulation Using High-Speed Rotary Atomizer - Model development and comparison of LES and RANS. Results in Eng., **21** (2024) 101697
 - 6) 安村光太郎, 斎藤泰洋, 庄子正和, 松下洋介, 青木秀之, 三浦隆利, 小笠原慎, 大黒正敏, 城田 農, 稲村隆夫: 超高速回転ベルカップ塗装機における噴霧粒子挙動の定量評価法の提案. 化学工学論文集, p. 296 (2011)
 - 7) 白井啓大朗, 秋山由佳, 岡部孝裕, 城田 農, 松川嘉也, 青木秀之, 松下洋介, 大黒正敏, 福野純一: 帯電液滴衝突面中央部の界面変形. 混相流, **36** [3] (2022) 353
 - 8) 児玉彩花, 白井啓大朗, 宮川泰明, 岡部孝裕, 松下洋介, 松川嘉也, 青木秀之, 大黒正敏, 斎藤泰洋, 福野純一, 城田 農: 平滑面に衝突する液滴接触線速度のステップ低下. 混相流, **37** [2] (2023) 226
 - 9) 神 凜人, 大黒正敏, 松川嘉也, 青木秀之, 城田 農, 岡部孝裕, 松下洋介, 宮川泰明, 斎藤泰洋, 福野純一: 噴霧塗装における液滴の分裂および電気的特性に関する研究. 日本機械学会東北支部第58期総会・講演会予稿集, No. 2023-1, pp.18-19, 日本機械学会 (2023)
 - 10) 清家善之: 環境を配慮した半導体デバイス洗浄プロセスにおける静電気障害防止技術の確立. 平成29年度研究報告書, 日比科学技術振興財団 (2017) 123
 - 11) 田畠泰幸, 児玉 勉, 大澤 敦: 噴霧による液体の帶電特性. 産業安全研究所特定研究報告書, NIIS-SRR-No.17(1999) 59
 - 12) 遠藤雄大: 可燃性溶剤の噴霧帶電量と導電率の関係. 安全工学, **59** [3] (2020) 175
 - 13) 遠藤雄大: 酢酸エチルの噴霧帶電量と噴霧条件の関係. 安全工学, **59** [5] (2020) 296
 - 14) R. Jin, Y. Kurihara, M. Daikoku, M. Shirota, T. Miyagawa, T. Okabe, Y. Matsukawa, H. Aoki, Y. Saito and J. Fukuno: A study on the measurement of charge and surface potential of charged liquid droplets in spray painting. *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.*, **19** [2] (2025) e02012
 - 15) 東山禎夫, 賈 振武, 浅野和俊: エアレスノズルから噴出する液滴の誘導帶電と接地円板近傍での液滴のふるまい. 静電気学会誌, **20** [3] (1996) 163
 - 16) D. Choi, H. Lee, D. J. Im, I. S. Kang, G. Lim, D. S. Kim and K. H. Kang: Spontaneous electrical charging of droplets by conventional pipetting. *Sci. Rep.*, **3** (2013) 2037.doi:10.1038/srep02037.
 - 17) 小塙洋司: 電気磁気学 (新装版), p.48, 森北出版 (2012)