

# 細管電極先端の微小水滴からの 負極性コロナ放電時の振動特性

中島 拓弥\*, 東山 禎夫\*<sup>1</sup>

(2016年9月29日受付; 2018年5月14日受理)

## Vibration of a Water Droplet Located at a Capillary Electrode during Negative Corona Discharge

Takuya NAKAJIMA\* and Yoshio HIGASHIYAMA\*<sup>1</sup>

(Received September 29, 2016; Accepted May 14, 2018)

DC corona discharge from a sessile water droplet formed at a capillary and ring electrode system is accompanied with periodical formation and disruption of a Taylor cone under an appropriate electric field. Thus, corona discharge from the water droplet occurs intermittently with a regular interval. To occur such corona discharge regularly under the lower voltage around 2kV, a capillary electrode with an outer diameter of 0.18 mm was set at a distance of a few millimeter from the ring electrode. The influence of a droplet volume on the waveform of corona discharge current and on the vibrating motion was investigated. Occurrence frequency of a series of corona pulse group depends on the volume of a droplet. For the droplet volume from 1.7 nL to 6.9 nL, the frequency decreased from 2.2 kHz to 0.7 kHz. The first corona pulse and following pulses in a corona pulse group increased with applied voltage. The time variation of the shape of a water droplet taken with a high speed camera was compared with the occurrence of corona pulses. Field simulation showed that the distribution of the electric field strength at a vicinity of the cone-shape droplet was satisfied with a criteria for corona onset.

### 1. はじめに

細管電極先端に形成した水滴に直流電界を印加すると、水滴は先端の尖鋭化とともにコロナ放電によって電荷を放出し、尖鋭化と分裂を規則的に繰り返し、コロナパルス群が繰り返し起きる<sup>1,4)</sup>。この過程で放出される帯電微小水滴による花粉の不活化<sup>5)</sup>、脱臭作用、除菌作用を利用した応用<sup>6)</sup>ガス処理に利用するための検討<sup>7)</sup>が行われている。

これまで、水の表面張力<sup>2,7)</sup>や粘度<sup>4,7)</sup>、導電率<sup>7)</sup>を変化させた際の水滴からのコロナ放電特性について調査が行われてきた。表面張力が小さい場合には水滴が尖鋭化しやすく放電時の水滴の変形に影響を及ぼすことが明らかになっている。一方、粘度が増加した場合には水滴が尖鋭化するまでに時間を要し、水滴からのコロナ放電時の振動周波数が低くなるだけでなく、粘度がさらに大きくなると、伸びた液柱に沿ってコロナ放電が起きる。

本研究では、体積数 nL の水滴の分裂に伴う微小水滴の放出量を制御することを目的として、コロナ放電に伴う水滴振動数を高めるために、水滴体積をできるだけ小

さくすることを試みた。内径が 0.18 mm の細管電極を使用して電極先端に数 nL の水滴を形成し、負極性のコロナ放電が起きる際の放電電流波形と水滴の挙動との関係を調査した。その際、できるだけ低い電圧で微小水滴を発生させるために、電極の位置を変えて放電開始電圧を求めた。また、水滴の体積が変化する際のコロナ放電中の水滴の振動と放電電流との関係を明らかにした。さらに、水滴が振動しているときの水滴先端近傍の電界分布を計算し、コロナパルスが発生している状態では、放電開始条件を満たしていることを確認した。

### 2. 実験装置および方法

水滴からのコロナ放電を発生させるために微小水滴を形成する細管と対向リング電極の配置を図 1 に示す。内径 0.1 mm、外径 0.18 mm の細管電極先端から距離  $d$  の位置に内径  $D$ 、外径 10 mm、厚さ 0.5 mm のリング電極を配置した。

細管先端の水滴からコロナ放電を発生し、放電電流波形および水滴の挙動を測定するための装置図を図 2 に示す。マイクロシリンジポンプ (kdScientific, kds-100) から細管に水を供給し、リング電極に正極性の電圧を印加して、水滴から負極性のコロナ放電を起こした。使用した水の温度は 25℃で、表面張力、粘性係数および導電率は、それぞれ、72 mN/m, 0.9 mPa·s, および 3 μS/cm である。測定は気温 21~25℃, 相対湿度 45~55 % の室

キーワード: 水滴, 細管電極, コロナ放電, コロナパルス群

\* 山形大学学術研究院理工学研究所

(〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16)

Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University, 4-3-16, Jonan Yonezawa 992-8510, Japan

<sup>1</sup> higashi@yz.yamagata-u.ac.jp

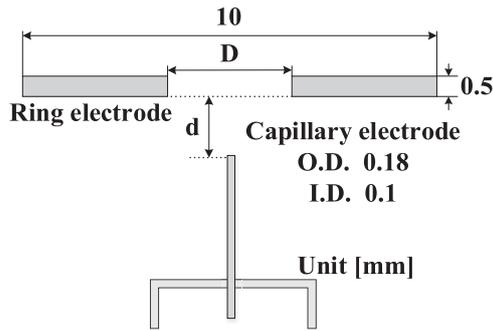


図1 リング電極と細管電極の配置  
Fig.1 Configuration of a ring and capillary electrode.

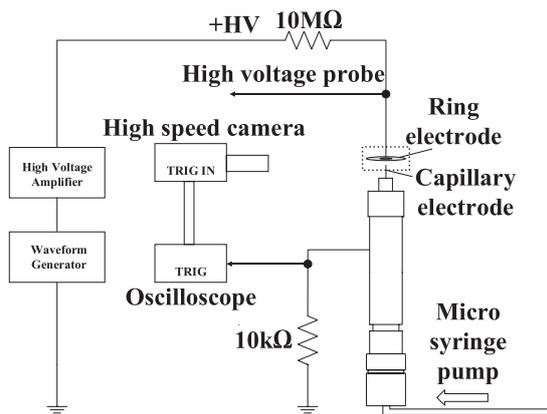


図2 細管先端の水滴からのコロナ放電電流測定系  
Fig.2 Electrode system for measuring corona discharge current at a water droplet extruded from a capillary electrode.

内空気中で行った。

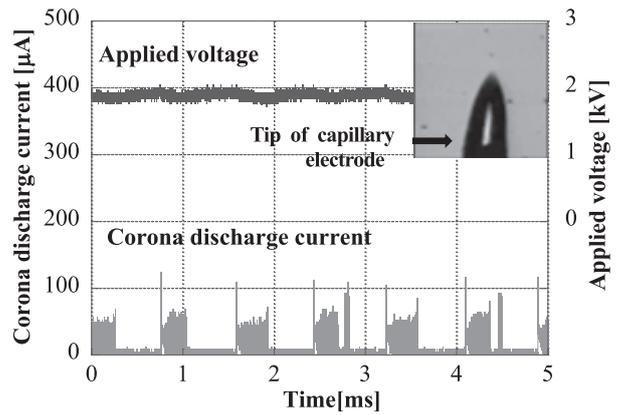
コロナ放電電流波形をデジタルオシロスコープで測定するとともに、オシロスコープと同期して高速度ビデオカメラ (PHOTORON, FASTCAM-ultima II) により水滴の挙動を 40,500 fps で撮影した。水滴が先鋭化したときの画像から細管から突き出ている部分の水滴の体積を求めた。

### 3. 実験結果および検討

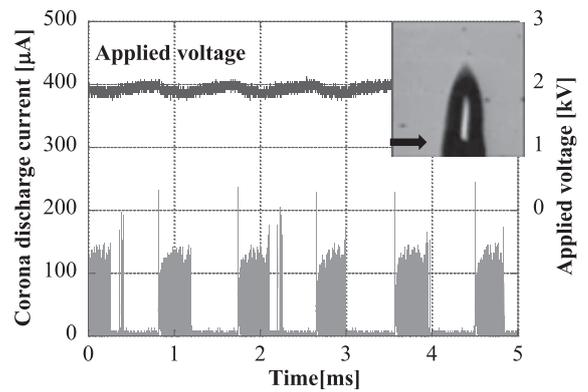
#### 3.1 水滴からのコロナ放電に及ぼす印加電圧の影響

細管電極に供給する水の流量を 8.3 nL/s, 細管とリング電極との間隔を 0.5 mm に設定し, リング電極への印加電圧を変えたときの水滴からのコロナ放電波形を図3に示す。図の写真は水滴が最も先鋭化したときの画像であり, 矢印の位置が, 細管先端の位置を示している。

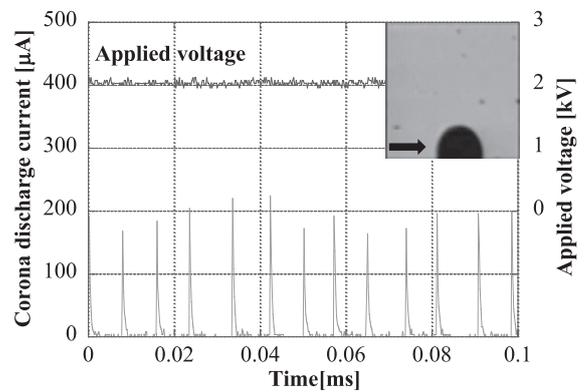
リング電極と細管電極の距離が近いので, 印加電圧の数 10 V のわずかな変化で放電様相は大きく変化する。図3 (a) および図3 (b) に示すように, 放電は大きなパルスの後にパルス列が続く。いったん停止した後, 再びコロナ放電によるパルス列が繰り返される。パルス群



(a) 1.92 kV



(b) 1.98 kV



(c) 2.04 kV

図3 リング電極への印加電圧を変えたときの水滴からのコロナ放電電流波形  
Fig.3 Waveform of negative corona discharge from a water droplet under a different applied voltage to the ring electrode.

の初めの大きなパルスを第1パルスと定義する。このパルスは, 水滴が先鋭化し, 帯電した微小水滴が放出された際に発生するパルスであり, コロナパルス群の中で波高値が最大のパルスとなる。第1パルスが発生した直後, 直流分を含んだトリチェルパルスに類似した放電が発生し, 時間の経過とともに直流分がなくなりバーストパルスが発生して放電が止まる<sup>1)</sup>。

印加電圧が 1.92 kV のときにはコロナ放電は図3 (a)

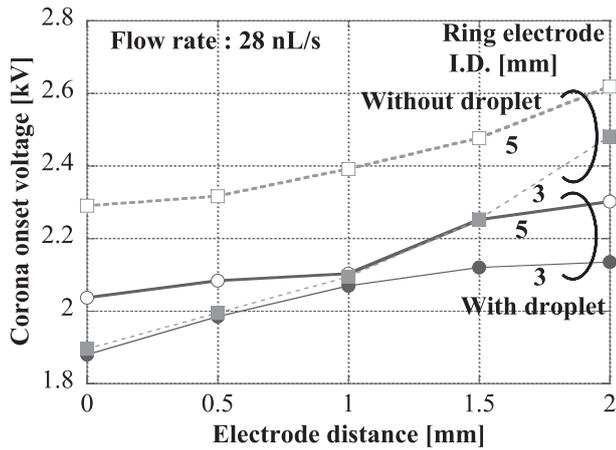


図4 細管電極先端で先鋭化した水滴からのコロナ開始電圧  
Fig.4 Corona onset voltage of a water droplet extruded from the tip of a capillary electrode.

に示すように、規則的に発生しているが、パルス群全体の波高値が低い。一方、印加電圧が高くなると第1パルスおよび後続のパルス列全体の波高値が増加し、図3(b)に示すように1.98 kVでは、第1パルスおよび後続パルスの波高値が1.92 kVのときの2倍程度となる。

印加電圧がさらに高くなり、2.04 kVになると図3(c)に示すように、規則的な水滴の振動を伴う放電波形とは異なり、金属電極からのコロナ放電に似た断続的なパルス波形となる。このとき、水滴先端の形状は変化せず、丸い形を維持した状態でコロナ放電が起きている。

リング電極の内径  $D$  を3 mmと5 mmに設定し、電極間隔  $d$  を0から2 mmまで変えたときの水滴からのコロナ開始電圧を表したものが図4である。図には、水を供給せず細管先端から起きるコロナ放電電圧も併せて示している。

リング電極への印加電圧が2 kV程度で水滴からコロナ放電を起こすことができる。同じ電極条件でも水滴からのコロナ放電開始電圧が細管電極よりも低いのは、水滴が尖鋭化するためである。細管電極先端の水滴の有無にかかわらず、電極間隔を狭くするとコロナ開始電圧は減少する。水滴からコロナ放電を起こす場合には、リング電極の内径の違いによるコロナ開始電圧の差は小さい。

### 3.2 水滴の振動周波数

図5に印加電圧を変えたときの水滴からのコロナパルス群の発生頻度を示す。水滴からのコロナ放電では、水滴の尖鋭化、水滴の分裂と微小水滴の放出、そして元の丸い形状に戻る形状変化を繰り返すので水滴は振動しているように見える。コロナパルス群の第1パルスの発生間隔を基準にとって第1パルスが起きる時間間隔を周期とすれば、この逆数がコロナパルスの発生周波数、すな

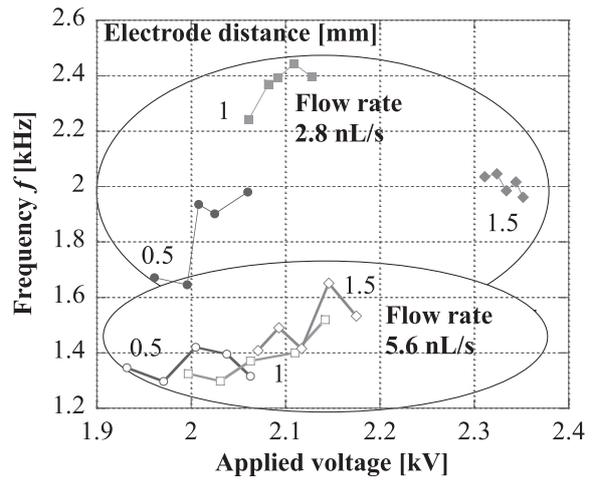


図5 リング電極への印加電圧と水滴からのコロナパルス群の発生頻度  
Fig.5 Occurrence frequency of corona pulse groups for an applied voltage to the ring electrode.

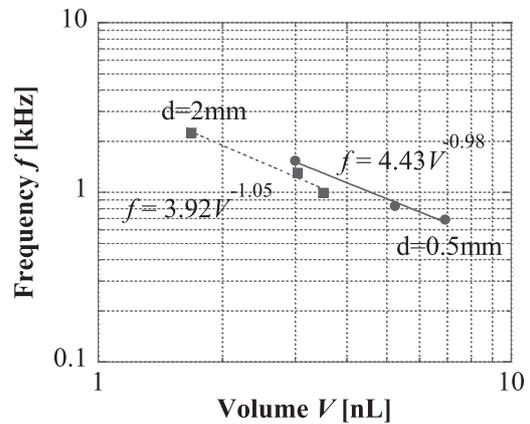


図6 コロナ放電パルス発生頻度と水滴の体積の関係  
Fig.6 Relationship between the volume of a water droplet and the occurrence frequency of corona pulse group.

わち水滴の振動周波数となる。

電極間隔や印加電圧の変化に対して水滴の振動周波数に大きな変化はみられない。流量2.8 nL/sの時は水滴の振動周波数は1.6~2.5 kHz、流量5.6 nL/sの時は1.2~1.7 kHzの範囲に分布している。細管に供給する試料水の流量が小さくなると形成される水滴の体積が小さくなり、結果として水滴の振動周波数が高くなる。

細管先端に形成した水滴の体積と規則的なコロナ放電発生時の振動周波数の関係を図6に示す。水滴の体積は水滴が尖鋭化したときの画像から水滴中心線から輪郭までの半径を求めて、水滴先端から細管電極まで数値積分することにより計算した値である。この振動周波数は、図3で示したようなデジタルオシロスコープで得られた3枚分の波形に対する平均値を求めたものである。水滴の体積  $V$  が小さくなることで水滴の振動周波数  $f$  が高

くなる。水滴の体積が 6.9 nL から 1.7 nL まで小さくなると水滴の振動周波数は 0.7 kHz から 2.2 kHz まで変化する。電極間隔が 0.5 mm と 2 mm の場合には、電極への印加電圧が異なるが、体積と振動周波数の関係には大きな変化がみられない。両者とも周波数はほぼ体積の -1 乗に比例している。

平板上に置かれた水滴や自由空間の水滴の共振周波数は体積の -1/2 乗に比例して変化することが知られている<sup>8-10)</sup>。直流コロナ放電を伴う振動においても、水滴の体積が水滴振動周波数に影響を及ぼすことになるが、固有振動数とは異なる形態をとっていることが考えられる。コロナ放電を伴う水滴の振動現象については、水滴の体積が及ぼす影響を検討する必要がある。

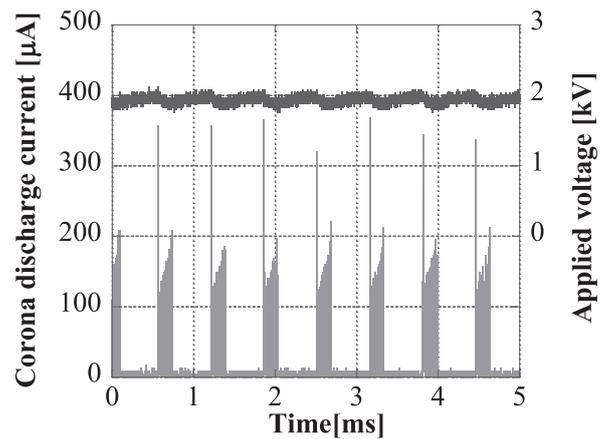
### 3.3 コロナ放電時の水滴の挙動

マイクロシリンジポンプの流量を 8.3 nL/s に設定し、電極間隔 0.5 mm で水滴から印加電圧 1.98 kV でコロナ放電を発生させた際の放電波形と水滴の挙動を図 7 および図 8 に示す。水滴の体積は時間の経過とともに変化する。それぞれ 3 nL および 6.9 nL のときのコロナ電流波形と水滴の挙動を示している。ここで示す水滴の体積は、水滴が尖鋭化したときの画像から計算した値である。図 7 (c) および図 8 (c) 中の写真の文字は、図 7 (b) および図 8 (b) 中の文字に添えた矢印で示す時間に対応している。

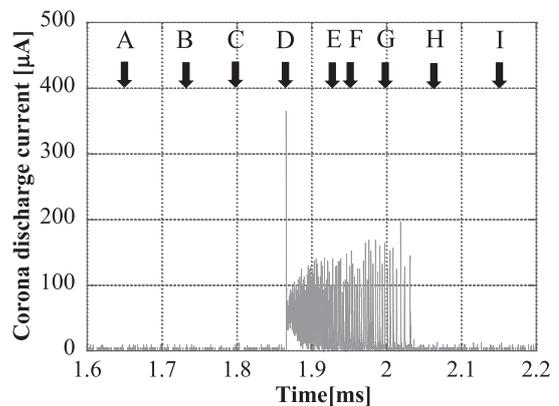
水滴の体積が大きくなるとコロナパルス群の発生頻度が少なくなり、一つのコロナパルス群の持続時間が長くなる。また、体積 3 nL のときの約 350  $\mu\text{A}$  から 6.9 nL のときの約 200  $\mu\text{A}$  まで、第 1 コロナパルスの波高値が減少している。後続パルスの大きさには違いがみられない。水滴の体積が小さいほうが水滴尖鋭化時の伸びは小さい。

図 7 (c) の画像 D, E, F, G の水滴形状では図 7 (a) のコロナパルス列に示すようにコロナ放電が起きており、画像 F では、水滴先端の形状が丸くなっている。これは、水滴尖鋭化に伴う上向きの液流によって先端部に水が移動したためである。結果として、水滴先端でコロナ放電が持続することになる。

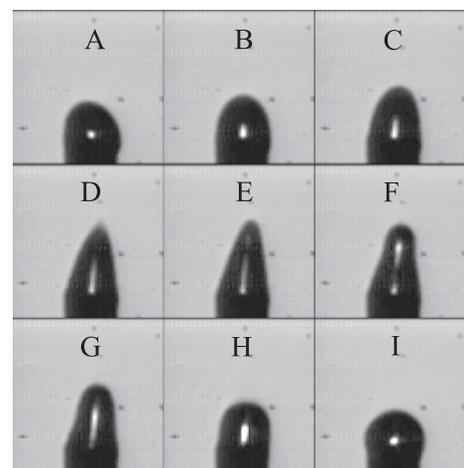
細管先端の水滴の体積がさらに大きくなった場合、図 8 (c) に示すように、水滴が尖鋭化した後、元に戻る間に、水柱の根元からより多くの水が供給されることになるので、水滴の高さは低くならず、丸みを帯びた水滴先端の電界の強さが比較的長い時間持続することになり、コロナ放電が持続する。画像 G では水滴先端が最も丸くなり、その後、画像 H で尖り始める。結果として、図 8 (b) の波形にみられるように、画像 G に対応する時間帯のコロナパルスは水滴先端の電界が弱まるために



(a) Corona pulse group



(b) Corona pulse train



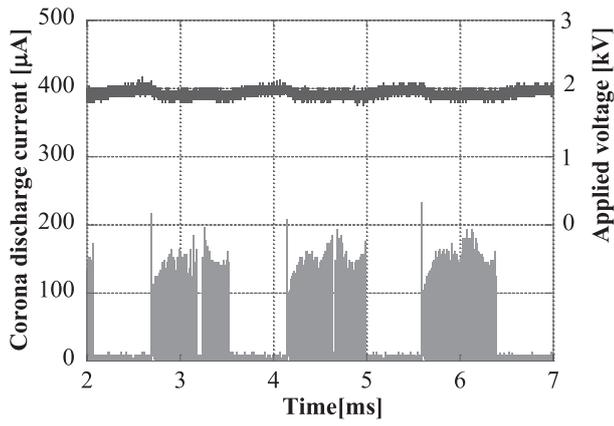
(c) Variation of shape of the water droplet

図 7 体積 3nL の水滴からのコロナ放電波形と水滴の挙動  
Fig.7 Waveform of negative corona discharge from a 3nL water droplet and its behavior.

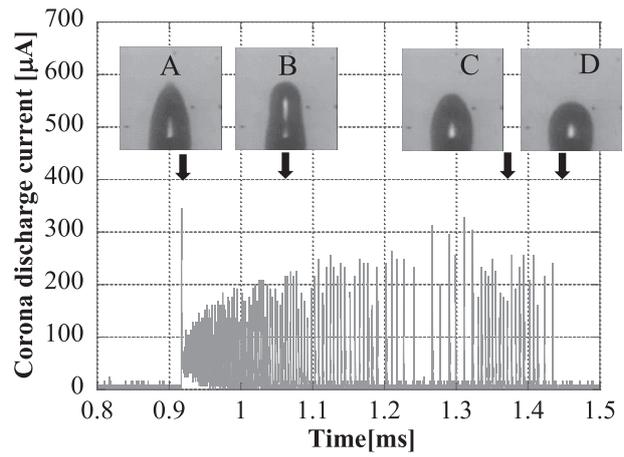
まばらになり、水滴が尖っている画像 H に対応する時間帯では電界が強くなるのでパルス間隔が狭くなる。

### 3.4 水滴振動時の水滴先端近傍の電界分布

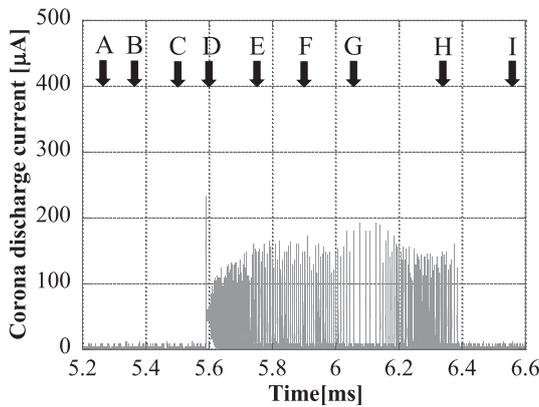
水滴尖鋭化後のコロナ放電の持続状況を確認するために、水滴先端近傍の電界分布を電界計算ソフトウェア



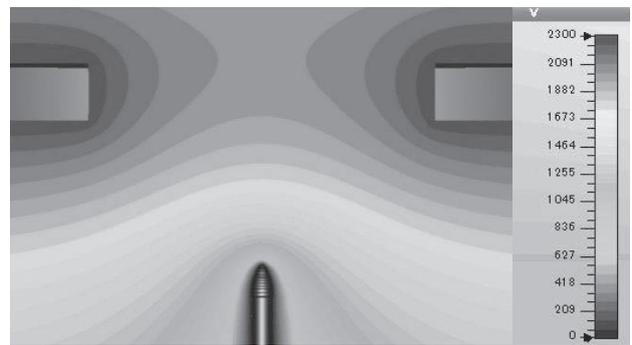
(a) Corona pulse group



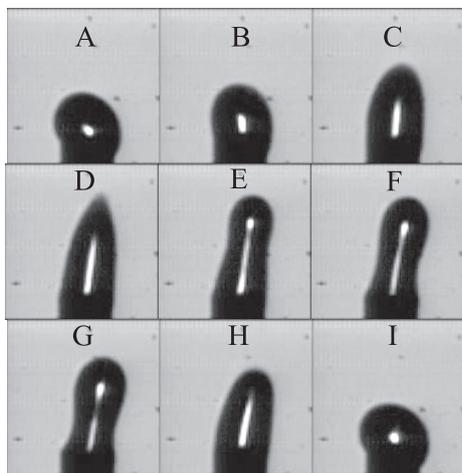
(a) Waveform



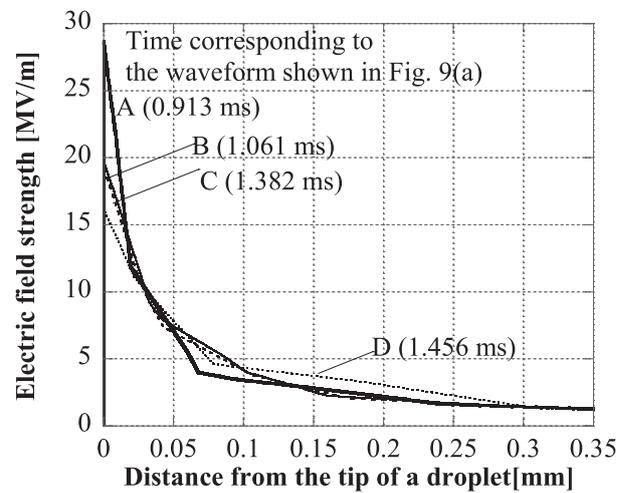
(b) Corona pulse train



(b) Potential distribution for the image A at 0.931 ms



(c) Variation of shape of the water droplet



(c) Electric field distribution

図8 体積 6.9 nL の水滴からのコロナ放電波形と水滴の挙動  
Fig.8 Waveform of negative corona discharge from a 6.9 nL water droplet and its behavior.

図9 コロナ放電時の体積 3.2 nL の水滴先端の電界の強さ  
Fig.9 Electric field strength at the vicinity of a coned water droplet with 3.2 nL during corona discharge.

(エーイーティー, CST STUDIO SUITE 2015) を用いて算出した. 図9に体積 3.2 nL の水滴からのコロナ放電波形と対応する水滴形状の変化, 一例として, 尖鋭化したときの水滴とリング電極間の電界分布および水滴先端を基準として, 垂直上向き方向に距離をとった電界分布を

示す. また, 図9(c)中の時間は図9(a)の波形の時間軸に対応している. 水滴尖鋭化時における先端の電界の強さは最大で 39 MV/m であり, 時間が経過するにつれて水滴先端が丸くなるとともに水滴の高さが低くなるので電界の強さの最大値は低下していく. 水滴が尖鋭し

ているときの電界の強さは、水滴先端からの距離が大きくなるにしたがって、急激に減少するが、水滴が丸くなると緩やかに減少する。図9(c)に示す電界分布  $E(x)$  [MV/m] を近似式で与えることにより、式(1)を用いて水滴先端でのコロナ開始条件を求めることができる<sup>11)</sup>。

$$\int_0^{x_0} (\alpha - \eta) dx = \int_0^{x_0} 0.2 \times \{E(x) - 23.4\}^2 dx = K \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$  は電離係数、 $\eta$  は付着係数であり、 $\alpha - \eta$  は実効電離係数である。 $x_0$  [cm] は水滴先端から垂直方向に向かう電離距離で電界強度が 23.4 kV/cm になるまでの距離を示している。コロナ放電開始基準を満たすのは、式(1)における定数  $K$  の値が 10 を超えた場合である<sup>11)</sup>。コロナパルス列が継続している時間帯と、コロナパルスが止まった時間帯の水滴先端からの放電開始条件を示す  $K$  の値を算出した結果を表1にまとめた。コロナパルスが現れている 0.913 ms から 1.432 ms までの時間帯では定数  $K$  が 10 を超えており、放電開始条件を満たしている。これに対し、1.456 ms の時の  $K$  は 10 以下であり、この時点の波形からも放電が起きていないことが確認できた。

表1 体積 3.2 nL の水滴からのコロナ放電開始条件  
Table 1 Criterion for corona discharge inception from a water droplet with a volume of 3.2nL.

Volume [nL]	time [ms]	Ionization distance [mm]	K
3.2	0.913	0.16	14.59 Fig.9 (a) A
	1.061	0.17	11.75 Fig.9 (a) B
	1.382	0.17	11.04 Fig.9 (a) C
	1.407	0.18	10.58
	1.432	0.20	10.37
	1.456	0.25	9.29 Fig.9 (a) D

#### 4. まとめ

外径 0.18 mm の細管電極先端に形成した水滴から直流負コロナ放電を発生し、電極間隔および印加電圧を変化させたときのコロナ放電特性および水滴の挙動について調査を行った。本研究によって得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 水滴からのコロナ放電では、水滴の共振振動を伴いながら負極性のコロナ放電が発生し、印加電圧によって放電形態が変化する。印加電圧の増加に伴い、第1コロナパルスおよび後続パルスを含めたパルス群全体の波高値が増加する。
- (2) 水滴の振動周波数は体積に依存し、体積が 6.9 nL から 1.7 nL まで小さくなることで水滴の共振周波数が 0.7 kHz から 2.2 kHz まで高くなる。
- (3) 時間的に変化する水滴先端近傍の電界分布を数値計

算で求め、電界分布から求めたコロナ放電波開始条件とコロナパルスの発生が一致することを明らかにした。

コロナ放電を起こしている水滴は先鋭化と分裂に伴う振動を示し、その状態での振動周波数の水滴の体積依存性は絶縁版に置かれて弱い電界を受けているだけの水滴の振動とは大きく異なる。水滴の形状は電界の強さや水滴分裂時における水滴内の液流の影響を受けるので、水滴振動すなわち水滴の放出現象を理解するためには、今後、コロナ放電時の水滴振動に及ぼす水滴分裂の効果を明らかにする必要がある。

終わりに、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(B)15H03957)の補助を受けて行われたものであることを付す。

#### 参考文献

- 1) T. Sugimoto, K. Asano and Y. Higashiyama: Negative corona discharge at a tip of water cone deformed under dc field. *J. Electrostatics*, **53** (2001) 25-38
- 2) 大西悠也, 東山禎夫: 棒電極先端に形成した水滴からの直流コロナ放電特性に及ぼす表面張力の影響. 静電気学会講演文集 18aA-6, pp. 17-20 (2008)
- 3) Y. Higashiyama, T. Shiori: Negative corona discharge from a water droplet with or without resonant vibration. *Int. Symp. on Electrohydrodynamics, Gdańsk, Poland* (2012)
- 4) Y. Higashiyama and T. Shiori: Negative corona discharge from a viscous water droplet. *Joint Meeting of ESA and JES, Cambridge, Canada* (2012)
- 5) 須田 洋, 岩本成正, 松井康訓, 山内俊幸, 奥山喜久夫: 静電霧化を用いた応用研究. 静電気学会講演文集 12pB-5, pp. 237-238 (2003)
- 6) 山内俊幸: 静電霧化による室内空気の浄化手法の開発とその事業化. 広島大学博士学位論文 (2008) 109-126
- 7) N. Shirai, S. Uchida, F. Tochikubo: Atmospheric negative corona discharge using Taylor cone as a liquid cathode. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **53** (2014) 026001
- 8) S. B. Sample, B. Raghupathy and C. D. Hendrics: Quiescent distortion and resonant oscillation of a liquid drop in an electric field. *Int. J. Eng. Sci.*, **8** (1970) 97-109
- 9) M. Strani and Sabata: Free vibration of a drop in partial contact with a solid support. *J. Fluid Mech.*, **141** (1984) 233-247
- 10) T. Yamada, T. Sugimoto, Y. Higashiyama, M. Takeishi and T. Aoki: Resonance phenomena of a single water droplet located on a hydrophobic sheet under ac electric field., *IEEE Trans. Industry appl.*, **39** (2003) 59-65
- 11) 電気学会放電ハンドブック出版委員会: 放電ハンドブック 上巻, pp. 268 オーム社 (1998)