

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03957

研究課題名(和文)高電界下における水滴の共振振動を利用した帯電水滴生成法の研究

研究課題名(英文) Study on Generation method of Charged Droplets using resonant vibration of water droplet under high electric field

研究代表者

東山 禎夫 (Higashiyama, Yoshio)

山形大学・その他部局等・名誉教授

研究者番号：50144209

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：0.18mm径の細管先端に形成された水滴から直流電界中で負極性のコロナ放電を起こすときの、共振振動による水滴の先鋭化と分裂形態を把握するとともに、生成される帯電ナノ微小水滴の性状と生成される帯電水滴の数を増やす方法および帯電水滴による湿度調整法を検討した。水滴の分裂頻度は体積に依存し、分裂時の第1パルス電流は水の導電率とともに大きくなり、放出電荷量も増加する。生成される微小水滴の粒径は数十nmである。電流パルスの減衰時間の解析から、水滴放出に伴う第1パルスは後続のコロナ放電パルスに比べて長く、導電率に依存する。生成される帯電水滴を用いて空気中の水分を凝集させて湿度を低下できることを示した。

研究成果の概要(英文)：Corona discharge from a water droplet extruded at a tip of a capillary tube with 0.18mm diameter under a strong dc electric field causes was investigated focusing on the state of a cone formation and disruption, the size of ejected charged droplets and the method for increasing the number of droplets. Possibility of humidity control in room air was confirmed experimentally using charge droplets. The resonant frequency of droplet vibration due to the cone disruption depends on the droplet volume. The current waveform consists of the largest first pulse by disruption of the cone and successive negative corona pulse trains. The peak value of the first current pulse and charge quantity increase with conductivity of sample water. The decay time of the first current pulse was larger than that of successive corona pulses and depends on the conductivity of sample water. The nanometer-sized charged droplets was could be used to adjust the relative humidity.

研究分野：電気工学

キーワード：負コロナ放電、テーラーコーンの分裂、帯電水滴、共振振動、ナノ水滴の生成、パルス波形の減衰時間
細管電極、導電率

1. 研究開始当初の背景

(1) 高電界下に水滴が置かれると水滴は変形するだけでなく、尖った水滴先端からコロナ放電が発生する。水滴からのコロナ放電は、電界により円錐状に先鋭化した水滴先端(テーラーコーンと呼ばれる)が分裂して微小水滴を放出する過程を必然的に伴うので、水滴の挙動は複雑な様相を示し、電流波形にも影響を与える。水滴先端分裂時に生成される帯電微小水滴の性状は明らかになっていない。

(2) 上向きに配置した直径 0.2mm の細管先端に形成した水滴からの負極性コロナ放電は、電界による水滴先鋭化と先端部の分裂による帯電微小水滴の放出、水滴先端が丸くなって下方に縮む過程、見かけ上、水滴が規則的な振動を繰り返す形態として特徴づけられる。この振動に対応する間隔でコロナパルス群が出現する。この現象は水滴の振動現象に起因し、水滴の大きさと表面張力で決まる共振振動現象で説明できる。帯電微小水滴の生成機構を明らかにし、生成される帯電微小水滴の大きさを制御することができれば、応用の可能性が広がることが期待される。

2. 研究の目的

水滴のコロナ放電により生成される帯電微小水滴の生成機構を明らかにし、微小水滴の電荷量や大きさを明らかにすることは、帯電微小水滴を積極的に利用する場合には必要不可欠である。液体の分裂には表面張力や粘度、電界が加わったときの水滴内部に存在するイオンの動きやすさ、電界により尖った先端部の形などが複合的に絡み合っている。水滴の物理化学的性質と生成される帯電微小水滴の大きさとの関係を明らかにし、帯電微小水滴の大きさを制御するための方法と条件を明らかにする。

高電界下に置かれた水滴の分裂に伴う電流波形には電荷交換による電流と先鋭化したテーラーコーン先端近傍での空気中のコロナ放電に伴う放電電流が含まれており両者を分離することは必要である。帯電水滴には水滴の大きさに対応した限界電荷量、レーリー限界が存在するが、正しく測定したコロナ放電波形と生成される帯電微小水滴の大きさの関係が把握できれば、帯電量と大きさを把握できるので、帯電微小水滴を利用する際の重要な知見となる。帯電微小水滴はイオンと比べて桁違いの運動エネルギーをもつので、帯電水滴の大きさを制御した状態で、空気中の水分の凝集特性、帯電面の除電性能、

を調べ、応用の可能性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) コロナ放電時に生成される帯電微小水滴の粒径測定システムの構築

水滴の共振振動を伴う水滴からのコロナ放電時において、テーラーコーンが形成された水滴先端から放出される帯電微小水滴の大きさを評価するためのシステムを構築する。所定の大きさの帯電液滴発生槽を作製し、その中で、10~200 nm の粒径を静電粒子分級器(パーティクルサイザー)により帯電微小粒子の大きさと発生量を測定するシステムを構築する。

(2) コロナ放電時の微小液滴発生条件

細管 - リング電極系の電極の大きさ、電極間隔などの幾何学的配置、印加電圧の大きさとイオン交換水の水滴から生成する帯電微小粒子の大きさの分布や空間密度との関係を明らかにする。

水滴からのコロナ放電が起きていても水滴先端のテーラーコーンが分裂しない状況では帯電微小水滴が生成されることはない。帯電微小水滴の生成数を高める条件を探る。細管先端の水滴のコロナ放電を周期的に起こすことが可能な条件の下で、水滴の先鋭化と分裂の繰り返し振動周波数を高めて、発生数と水滴径を制御する方法を明らかにする。

(3) コロナ放電波形の解析

水滴からのコロナ放電電流波形は先鋭化したテーラーコーン先端の分裂に伴う微小水滴発生の有無、水滴の体積で決まる振動周波数で決まる。電流波形には先鋭化した水滴先端に電荷が集中し、静電反発力が表面著力に打ち勝って分裂し、帯電微粒子として放出するときの静電的な導電電流と、先鋭化した水滴近傍の空気中で起きるコロナ放電による電流が含まれる。電流波形からコロナ放電と水滴の放出を伴う放電による電流の大きさを把握し、水滴の生成メカニズムを明らかにする。水滴の導電率としてイオン交換水の 0.003mS/cm から 48mS/cm まで 4 桁変化させる。

(4) 帯電微小水滴の大きさおよび寿命

水の表面張力および粘度を変化させたときの水滴からのコロナ放電開始電圧やコロナ放電電流波形に及ぼす影響については、これまでの研究で明らかになっているので、粒子径への影響を明らかにする。イオン交換水

に硝酸を加えて導電率を変化させたときの帯電微小液滴の粒径分布を把握する。さらに、所定の大きさの密閉空間内に帯電微小液滴を放出して帯電微小液滴の寿命を明らかにする。

(5) 液滴先端の分裂時の形状変化

水滴からのコロナ放電時の微小水滴の分裂状況を、500,000 コマ/秒の高速度ビデオカメラを用いて捉える。水滴の先鋭化から分裂までの時間、さらにコロナ放電が持続している時間の水滴の変化を捉える。特に、先端部の分裂前後における水滴先端形状の変化を把握することにより、水滴先端部における電界の強さの分布を電界計算により求め、放出電荷量を推定する。

(6) 空気中水分の帯電微小水滴による凝集と湿度制御

帯電微小水滴を相対湿度の高い空气中に放出し、帯電微小水滴に水分を吸着させて粒径を大きくし、大きくした帯電液滴を取り除くことで、高湿空気の除湿の可能性を検討する。帯電微小液滴はコロナ放電で生成されるイオンと異なり、数 10nm の大きさを持つので、テーラーコーン先端の分裂時に伴って噴出したあと、自らの持つ運動エネルギーにより空間に飛び出すことができる。この帯電微粒子には周囲の水分子を吸着しながら、液滴周囲の水分子を効果的に取り込むことができることが予想される。密閉空間を一定の湿度に保ち、その中で帯電水滴を噴出させて除湿効果を検討する。

4. 研究成果

(1) 印加電圧および電極間隔を変化させた時の水滴からのコロナ放電

マイクロシリンジポンプを用いて外径 0.18 mm 細管先端に水滴を形成し、対向リング電極に正極性の電圧を印加したとき、水滴の共振振動を伴いながら負極性のコロナ放電が起きる。コロナ開始付近の電圧を印加すると、パルス性の放電が不規則に発生する。印加電圧を増加するとパルス群の中で最も波高値が高くなる第 1 電流パルスが発生し、水滴の尖鋭化と共に微小水滴を放出する。その直後に直流分を含んだトリチェルパルスが発生するが、時間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り、このような放電を断続的に繰り返す放電様式となる。加えて、印加電圧の増加に伴いパルス群全体の波高値が増加していく。電極間

隔 0.5 mm の場合、印加電圧 1.92 kV で上記のような代表的な水滴からのコロナ放電が発生する。いさらに印加電圧を増加していき 2.04 kV に達すると、水滴の尖鋭化がみられなくなり、金属電極からのコロナ放電に類似したパルス性の放電が発生する。また、電極間隔が 2 mm から 0.5 mm に変化しても水滴の挙動に影響を及ぼすことはないため、電極間隔を狭くすることによって印加電圧を下げるができる。

(2) 水滴の振動周波数に及ぼす体積の影響

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。また、電極間隔 0.5 mm および 2 mm で比較しても体積と振動周波数の関係に大きな変化がなかった。電極間隔を狭くすることでリング電極への印加電圧を低くした状態でも水滴の振動周波数を増加させることができると考えられるが、電極間隔が狭くなるにつれて放電を安定的にコントロールすることが難しくなる。また、細管先端に形成した水滴の振動周波数は、絶縁板上に形成した水滴の振動周波数よりも低くなる。

(3) 水滴の導電率がコロナ放電に及ぼす影響

導電率を 0.48, 4.8, 48 mS/cm と増加していくと電流パルス群全体の波高値が高くなる傾向があり、第 1 パルスは導電率の増加に伴って 100~150 μ A ずつ増加していく。しかし、放電持続時間がほぼ同じで導電率が異なる波形で水滴の形状を比較すると、尖鋭化時の水滴の形状および高さ、放電時の水滴の挙動に大きな変化はみられなかった。また、導電率の変化に伴って尖鋭化時の水滴先端の曲率半径に違いが生じる可能性があるが、本研究で用いた高速度カメラでは解像度が足りず、水滴先端の形状を鮮明に捉えることができなかったため、曲率半径を測定するに至らなかった。

(4) 水滴の導電率の放出電荷量と電流パルスの減衰時間に及ぼす影響

導電率が高くなると第 1 パルスの波高値が高くなっていき、これに伴い電荷量も増加していき、最大で 0.2 nC 程度の電荷が放出される。これは、導電率の増加に伴って一度の放電でより多くの帯電電荷をもった水滴が放出されることを示している。これに対し、第 1 パルスの減衰時間は導電率の増加に伴って 800 ns から 300 ns まで減少する。導電率

の増加は試料水の抵抗値の低下を示しており、これによってより多くの電荷が短時間で移動でき、結果として減衰時間が減少したと考えられる。また、第1パルスの後続パルスの減衰時間は水滴の導電率によらず200~300 ns でほぼ一定の値を示している。水滴分裂による第1パルスとコロナ放電による後続のパルス群では放電様式が異なることから、後続パルスでは帯電微小水滴がほとんど放出されていないことが推測できる。

(5) 水滴からのコロナ放電に伴う微小水滴の放出

水滴からのコロナ放電によって放出される微小水滴の粒径は11.5~20.5 nm であることが明らかになった。また、粒径11.5~20.5 nm の微小水滴が増加していき、ピークを迎えた後で粒径20.5~86.6 nm の粒子が増加するが、これは時間経過とともに電荷が抜けることで中性となった微小水滴との結合および空気中の水分との結合や放出された微小水滴同士の結合により、生成されていると考えられる。また、コロナ開始付近の印加電圧で第1パルスを伴わないコロナ放電では微小水滴がほとんど放出されていないことから、第1パルスで微小水滴が放出されていることが明らかになった。

(6) 第1パルスの波高値と微小水滴の放出量

導電率の異なる硝酸水溶液を用いた場合、導電率が高くなるにつれて微小水滴の放出量が増加していき、11.5~20.5 nm の粒径の微小水滴が最大で80,000 /cm³ に達する。また、水滴の尖鋭化を伴わない水滴からのコロナ放電でも微小水滴が若干量放出されているが、水滴の尖鋭化と分裂を伴っていないことから第1パルスと後続パルスの微小水滴の放出過程は異なることが予想される。微小水滴の放出量を増加させるためには導電率および印加電圧を増加することで第1コロナパルスの波高値を高くする必要があることが明らかになった。

(7) 帯電微小水滴の寿命

微小水滴の測定槽内にアルミ板電極を設置し、水滴からのコロナ放電によって微小水滴を生成した後に、アルミ板電極間に電界を形成すると、微小水滴の検出量が一気に減少する。これは、空気中に残留している帯電微小水滴が極板間の直流電界によって引き寄せられたことを示しており、帯電微小水滴の帯電が確認できた。また、コロナ放電をとめ

た後、8分が経過してから電極板に直流電圧を印加すると、粒子の検出量が急激に減少したことから、放電によって放出された微小水滴は少なくとも8分間は帯電した状態で空気中に残留することが明らかになった。

(8) 水滴からのコロナ放電による湿度変化および水分捕集量

外径0.4 mm の4本の細管電極先端に水滴を形成した状態で、対向した金属平板電極に正極性の電圧を印加し、所定の湿度に保った空気を導入しての水分捕集量すなわち湿度変化を調査した。第1パルスの波高値および水滴の振動周波数を高くし、供給する空気の流量が1 L/minのときに湿度90%の空気を約5%低下させ、空気中の水分は約220 mg捕集することができた。放電槽内へ供給する空気の湿度が80%および70%の時、湿度を約4%および3%低下させることができた。さらに、供給水の導電率を高くすることにより、第1パルスの波高値を大きくすることで捕集量を増やすこともできた。

対湿度を40~90%まで変化させたときの水滴からのコロナ放電では、相対湿度が高くなると、第1コロナパルスの波高値が低下した。相対湿度が高い空気中の水分によりコロナ放電が抑制されたと考えられる。

水滴からのコロナ放電と金属針電極からのコロナ放電による湿度変化および水分捕集量の比較を行った。金属針電極からのコロナ放電によって金属板への水分捕集量は細管電極先端の水滴からのコロナ放電による捕集量に比べかなり少なく、湿度はほとんど変化しなかった。この結果から空気中の水分を捕集し、湿度変化を発生させるためには負に帯電した微小水滴による効果が大きい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Y. Higashiyama, T. Nakajima, T. Sugimoto, Influence of conductivity on corona discharge current from a water droplet and on ejection of nano-sized droplets, *J. Electrostatics*, vol.88, pp. 65-70, 2017 査読あり

[学会発表](計7件)

大河原圭将, 鎌田修史, 東山禎夫: 水滴からの負極性コロナ放電により生成される微小水滴の粒径分布, 平成29年電気学会全国大会, 2017

鎌田修史, 東山禎夫: 水電極からの負コロナ放電で生成される帯電微小水滴による除湿効果, 平成 28 年度 電気学会全国大会, 2016

中島拓弥, 東山禎夫: 0.18mm 径細管先端の微小水滴からの負極性コロナ放電時の振動特性平成 28 年度 第 40 回静電気学会全国大会, 29pC-1, pp. 35-36, 2016

鎌田修史, 東山禎夫: 水滴からのコロナ放電による水分除去法の検討, 平成 28 年度 第 40 回静電気学会全国大会, 29pC-1, pp. 35-36, 2016

鎌田修史, 東山禎夫: 水電極からのコロナ放電を用いた湿度調整法の検討, 平成 27 年度 電気学会全国大会, 1-141, pp. 168, 2015

中島拓弥, 東山禎夫: 水滴からの直流負コロナ放電に及ぼす導電率の影響, 平成 27 年度 第 39 回静電気学会全国大会, 24pA-2, pp.29-30, 2015

中島拓弥, 東山禎夫: 水滴からの負コロナ放電に伴う振動に及ぼす体積の影響, 平成 27 年度 電気関係学会東北支部連合大会, 2F09, 2015

〔国際会議〕(計 2 件)

Y. Higashiyama, T. Nakajima, T. Sugimoto, Influence of conductivity on corona discharge current from a water droplet and on ejection of nano-sized droplets, Proc. on Electrostatics 2017, Frankfurt (2017)

Y. Higashiyama, M. Kamada: Dehumidification using negative corona discharge from a water droplet, Proc. 2017 Annual Meeting of the Electrostatics of America, Ottawa (2017)

〔その他〕

<http://higashi.yz.yamagata-u.ac.jp/top.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東山 禎夫 (HIGASHIYAMA, Yoshio)
山形大学・大学院理工学研究科・名誉教授
研究者番号: 5 0 1 4 4 2 0 9

(2) 研究分担者

杉本 俊之 (SUGIMOTO, Toshiyuki)
山形大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 1 0 2 8 2 2 3 7

(3) 研究協力者

中島 拓哉 (NAKAJIMA, Takuya)
鎌田 修史 (KAMATA, Masafumi)