

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630045

研究課題名(和文) 磁性流体界面を活用した革新的ストリーマ放電空気浄化システムの開発

研究課題名(英文) Development of Innovative Air Purification Systems by Using Streamer Generated on the Magnetic Fluid Interface

研究代表者

西山 秀哉 (NISHIYAMA, Hideya)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：20156128

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、革新的空気浄化システムの開発に関する挑戦的萌芽研究として、交流電場を用いたケロシンベース磁性流体微粒化技術と水ベース磁性流体によるオゾン発生およびパルス放電による固体表面上の液滴除去技術の確立を目指す。交流電場下で低周波数域での磁性流体スパイクの振動現象および磁性流体スパイク先端からの液系・液滴射出現象、また、高周波数域でストリーマ放電に伴うオゾン発生効率を明らかにした。さらに、パルス放電下で親疎水面上の液滴蒸発除去挙動および汚染液滴浄化のために強酸化力を有するOHラジカルの存在も明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to develop the innovative air conditioner based on the technology establishment of droplets automatization and ozone generation using kerosene based magnetic fluid and water based magnetic fluid respectively in the AC electric field, furthermore, droplets removal on a hydrophilic insulator with pulsed discharge. In low AC frequency the oscillation of magnetic fluid spike, ejections of small droplets and liquid thread from magnetic fluid spike are clarified. In high frequency ozone generation efficiency is clarified as a function of frequency for air purification. Furthermore, droplets removal characteristics utilizing Joule heating evaporation on a hydrophilic insulator with pulsed discharge is also clarified by discharge visualization. Finally, the presence of OH radical generation was confirmed for decomposition of waste water droplets.

研究分野：工学

キーワード：流体工学 機能性流体 磁性流体 放電 流体界面 浄化技術 放電技術

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 21世紀では、中国からの有害物質や汚染黄砂の飛来、春先の花粉の飛散、ディーゼルエンジン排気ガスの粒子状物質、また、室内汚染物質、インフルエンザウイルス等の浮遊や高濃縮化に伴う人間の生活環境を取り巻くマイクロ・ナノダスト粒子やミストによる汚染とアレルギー、インフルエンザや肺ガン等の健康被害が社会的に深刻な問題となってきた。近年、空気清浄技術としてプラズマクラスターやストリーマ放電による汚染粒子やミストの回収、汚染物質の酸化分解等の開発が空調メーカーを中心に活発である。しかしながら、応用研究や技術が先行しているため、学術的な裏付けや普遍性の検証さらには、実験と計算の両面からの統合解析により最適化されていないのが現状である。

(2) 本代表者は、最近、管内誘電体バリア放電によるプラズマアクチュエータ効果でナノ粒子を輸送し、オゾンで粒子表面の酸化分解の可能性を示し、特許公開(2012-91925)と2012年度日本混相流学会賞技術賞を受賞している。また、反応性プラズマ中に汚染水を噴霧し、高効率の脱色実験にも成功した。本研究では、本代表者らのストリーマ放電による空気の活性化、反応性促進の成果を進展させ、プラズマと磁性流体界面を放電領域とした静電場やイオン風によるミスト・ダスト輸送およびオゾン、ラジカルによる表面浄化、磁性流体界面による吸着回収への研究展開に成果が期待され、「ミスト・ダスト汚染環境の浄化・回収」に多大なる貢献をすることを確信している。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究は、室内微小空間、呼吸器系での汚染ナノ粒子、ハウスダスト、ミストやウイルスの輸送、これらの表面汚染物質分解・吸着回収への先進的応用展開を目的とする。人間環境や生体に適合した放電によりプラズマ中のミスト・ダストに関して、特に静電気力やイオン風によるミスト・ダストの輸送およびプラズマのラジカル、オゾンおよび高速電子の強力な酸化力を活用した空気中の汚染ミスト・ダストを酸化分解し、磁性流体膜や磁性流体ミストで吸回収する「プラズマ-磁性流体界面反応流動システム」を試作的に開発する。

(2) 「ミスト・ダスト静電輸送モデル」と「磁性流体界面反応モデル」を統合した新規な「ミスト・ダスト反応混相流動モデル」を世界に先駆けて提案し、磁性流体界面放電を活用したミスト・ダストの輸送、浄化、回収特性を明らかにし、実験との統合解析により「プラズマ-磁性流体界面反応流動システム」の最適形態や作動条件を示し、「革新的空気清浄器」の基礎的設計資料を提供する。

### 3. 研究の方法

(1) 磁性流体スパイクを電極とするストリーマ放電とコロナ放電のデュアルモードでイオン風より、ミスト・ダストを輸送し、分解、そして磁性流体界面に吸着回収するためのマイクロリアクターを有する「プラズマ-磁性流体界面放電反応浄化システム」を試作する。

(2) 様々な放電条件、磁場強度、流動場、ミスト・ダスト径やミスト・ダスト濃度、イオン風速度、反応炉形状や反応炉スケールとミスト射出速度・ダストの吸着効率、発生オゾンによるミスト・ダスト表面汚染物質の分解効率との相関および比エネルギー効率を実験的に明らかにする。

(3) 代表者らの世界トップレベルの機能性プラズマ流と磁性流体の成果を基盤として、「ミスト・ダスト静電輸送モデル」と「磁性流体界面反応モデル」を統合した新規な「反応性ミスト・ダスト混相流動モデル」を提案し、ミスト射出・ダスト吸着、分解・洗浄最大効率のための作動条件や形状の最適化を行い、新規な「プラズマ-磁性流体界面空気浄化システム」を提案する。

### 4. 研究成果

(1) 磁性流体スパイク放電デバイスを製作した(図1)。ステンレス平板下に磁束密度が531 mTであるネオジム磁石を設置し、ステンレス平板上に磁性流体を滴下することでスパイクを形成した。スパイクに高周波高電圧を印加し、スパイク上部のアルミニウム円盤を接地電極とした。放電がアーク放電に遷移するのを防止するために、接地電極表面に絶縁シールを接着した。ファンクションジェネレータ(WF1973, NF, Inc.)から高電圧アンプ(Model 20/20c, Trec, Inc.)を用いて、高周波高電圧を印加した。また、電流電圧波形状は、電流プローブ(TCP312, Tektronix, Inc.)および電圧プローブ(P6015A, Tektronix, Inc.)を用いて計測し、オシロスコープ(DSO-X3034A, Agilent Technologies, Inc.)により取得した。電極に液体を用いた場合、放電特性と界面挙動を同時に解析することは難しいために、放電特性と界面挙動の解析にそれぞれ適した異なる磁性流体を用いた。本研究において、水ベース磁性流体(W-40, タイホーコザイ)を用いて放電特性を解析した。水ベース磁性流体の溶液は、誘電率が高く、磁性流体表面において強く分極する。また、磁場下において、磁性流体中の強磁性体微粒子が一部凝集するために粘度が増加する。そのため、水ベース磁性流体を用いた電極は、電極自体の流動性は小さいが、放電が起きやすい。一方、界面挙動の解析には、ケロシンベース磁性流体(HC-50, タイホーコザイ)を用いた。ケロシンベース磁性流体は、その溶媒の誘電率が小さく、磁場

下で水ベース磁性流体ほど粘度は増加しない。発生したオゾン濃度をオゾンガス濃度計（OZM-5000GW2, オキノテック）を用いて測定し、オゾン発生効率を評価した。界面挙動を解析する際には、高速カメラ（FASTCAM SA-X, フォトロン）を用いて可視化した。

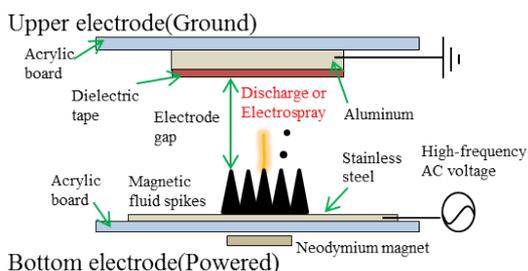


図1 磁性流体スパイク放電デバイス

(2) 0.0、4.6 および 5.8 kV<sub>pp</sub> の電圧を印加した時の水ベース磁性流体スパイクを可視化した。印加電圧の周波数は、2000 Hz である。電圧の増加に伴い、スパイクが接地電極方向に伸長し、臨界電圧以上で放電が開始する（図2 (a)(b)(c)）。

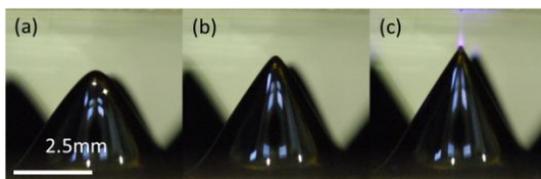


図2 水ベース磁性流体スパイク

(3) 本デバイスの典型的な放電波形を計測した。印加電圧が 5.8 kV<sub>pp</sub> であり、周波数は 2000 Hz である。スパイクに正電圧が印加される際に、パルス状のマイクロ放電が発生している（図3）。

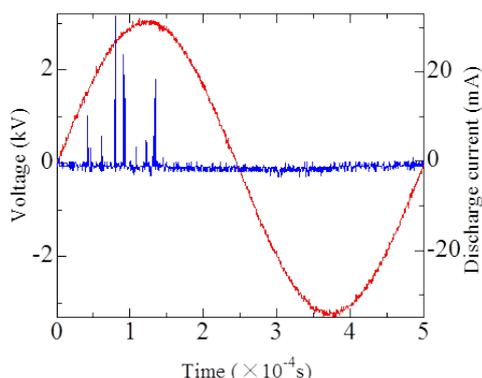


図3 電圧波形（赤）および電流波形（青）

(4) 印加電圧増加に伴うスパイク先端 - 接地電極間の距離を明らかにした。電圧が印加されていない時の電極間距離を基準にして、正規化した。電圧が増加するにつれ、電極間距離が減少し、約 5.0 kV<sub>pp</sub> で放電が開始する。また、印加電圧の周波数が小さいほど、スパイクの伸長が大きく、電極間距離が小さくな

る。これは、低周波数において、スパイクの電場に対する応答性が高いためである（図4）。

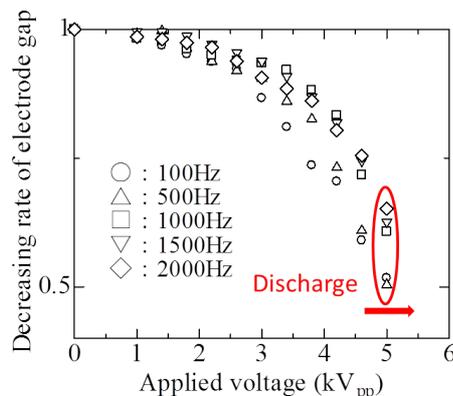


図4 磁性流体スパイク電極間距離

(5) 印加電圧が 5.8 kV<sub>pp</sub>、その周波数が 100 - 3000 Hz である場合のオゾン濃度とオゾン発生効率を明らかにした。オゾン濃度は周波数の増加に従い増加する。これは、周波数の増加に伴い、投入電力が大きくなるためである。一方、オゾン発生率は、2000 Hz において最大である。2000 Hz 以下の低周波数では、スパイクが振動するために電極間距離が安定しない。一方、2000 Hz 以上の高周波では、電極間距離が大きくなるので、2000 Hz で放電が最も安定した（図5）。

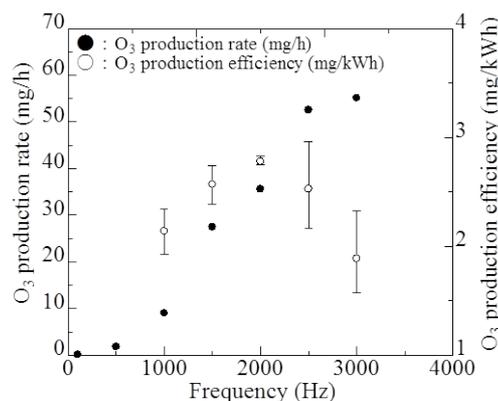


図5 オゾン濃度と発生効率

(6) ケロシンベース磁性流体スパイクの観察を行った。実験条件は、上部電極と下部電極間が 5 mm、印加電圧は 1000 Hz、8 kV<sub>pp</sub> の正弦波交流電圧である。図6 (a)のように電圧を印加すると、磁性流体スパイクが上部電極方向に伸長する。後に述べるように、この時、スパイク先端は、印加電圧に伴い振動しており、図6 (b)は、スパイク高さが最大の瞬間の写真である。電圧無印加時は緩やかだったスパイク先端が鋭く尖っていることが分かる。磁性流体スパイクを放電用電極として用いる場合、電極先端が鋭いほど不均一な電界が発生するため、放電に必要な印加電圧

は低くなる。このような観点からすると、電圧印加により先鋭化する磁性流体は、放電装置として有用であると考えられる。伸長した磁性流体先端からは、さらに、液系状の磁性流体が伸長している。電圧無印加時には、スパイク先端と上部電極との距離は約 1.7 mm であるが、電圧を印加した際は、液系部分を除くスパイク先端と上部電極との距離は、約 0.8 mm 程度である。下部電極からスパイク先端までの高さをスパイク高さとして定義すると、電圧印加によりスパイク高さは、3.3 mm から 4.2 mm に伸長している (図 6)。

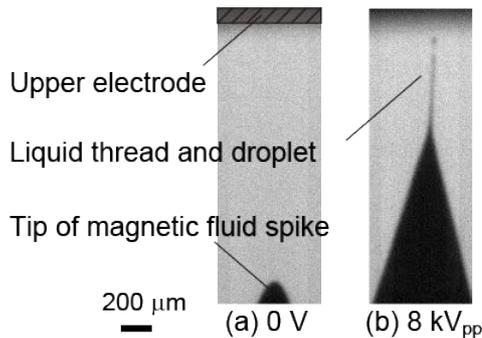


図 6 磁性流体スパイクと液系の伸長

(7) 交流電圧(1000 Hz、8 kV<sub>pp</sub>)印加時のスパイク先端挙動を明らかにした。画像間の取得時間は 80 μs である。図のように、磁性流体は、スパイク先端の微小部分のみを振動させ、その振動と同期して液系を伸長させる。液系が伸長する周波数は 2000 Hz であり、これは、印加電圧周波数の二倍に相当する。液系は電場の極性に関わらず、電圧の正負で同様に伸長し、印加された電圧がおおよそ最大の時点で最高点に到達し、その直後に、表面張力により液系は液滴に分裂する。また、液系の挙動は、周波数に対応しているが、磁性流体スパイクそのものは、電圧印加中は、一方向に伸長したままである。今回の計測の結果、分裂した液滴径はおおよそ 40 μm 程度である (図 7)。

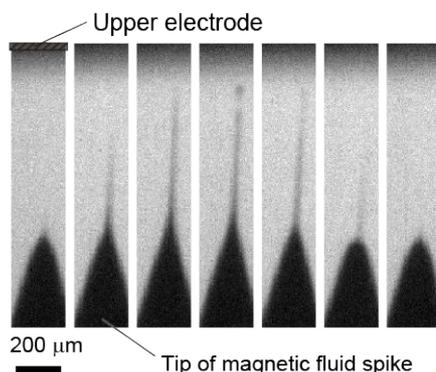


図 7 磁性流体液滴射出の連続写真 (時間間隔 80 μs)

(8) 生成液滴径の印加電圧による変化を明

らかにした。液滴径は、以下のように定義した。液系から分裂する液滴形状が、液系方向に回転軸を持つ回転楕円体に近似できるとして、その等価直径  $D$  を  $D = (D_1 D_2^2)^{1/3}$  で求めた。ここで  $D_1$ 、 $D_2$  はそれぞれ、回転軸方向の直径および回転軸と垂直方向の直径である。求めた液滴の直径からザウター平均粒径とし、粒径を算出した。磁場強度を  $d_m = 17.0$ 、 $21.0$ 、 $25.0$  の三種類に変更し、それぞれの条件で電圧に対する液滴径を求めている。各プロットのエラーバーは、標準誤差を表す。各条件で磁性流体が射出する限界電圧 ( $V_{lim}$ ) が存在し、その電圧以上では、液滴径は電圧の増加に伴い増大する。この限界電圧が磁場強度に伴い異なる理由は、強い磁場下において磁性流体の磁気力は増大するが、磁場の変化に伴い磁性流体界面形状も変化するため、射出限界電圧が複合的な要因で変化しているため考えられる。何れにせよ、射出限界電圧以上の電圧では、電圧増加に伴い生成された液滴径も増大する定性的な傾向が明らかになった (図 8)。

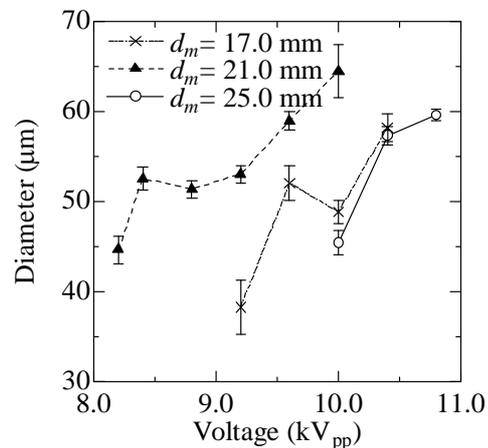


図 8 印加電圧に対する液滴径

(9) 液系幅の電圧変化に対する変化を明らかにした。取得画像上では、円柱状の液系が二次元に射影されていると仮定できるので、二値化画像の液系の幅を液系径と定義した。全ての磁場強度の条件において、液系径は電圧の増加に対して、図 8 の液滴径と同様に、概ね正の相関があると言える。電圧を印加すると、発生した電場により磁性流体界面から液系が伸長する。ここで、ノズルを用いて一定量の流体を送液する静電噴霧法と異なり、本方法は、自由界面を用いている。そのため、スパイクの伸長に伴い、流出した液体は周囲から補われる。ノズルを用いた静電噴霧法の場合、印加電圧を増加させるにつれ、液滴生成速度が増加し、生成液滴径も減少する傾向があることが報告されているが、本手法は、上記のように自由界面を用いた微粒化法であるため、図 8 に示すような傾向が現れると考えられる。印加電圧の増加は、射出される液系幅を増大し、その結果、生成される液滴

径も増大することが明らかになった(図9)。以上をまとめると、各条件において、液滴射出に至る限界電圧が存在するが、限界電圧以上を印加する際は、電圧の増加に伴い生成液滴径も増大する。微粒化技術としての応用の観点から、より微小な液滴を生成するには、磁場強度ごとの限界電圧を印加することが有効であるという知見が得られた。

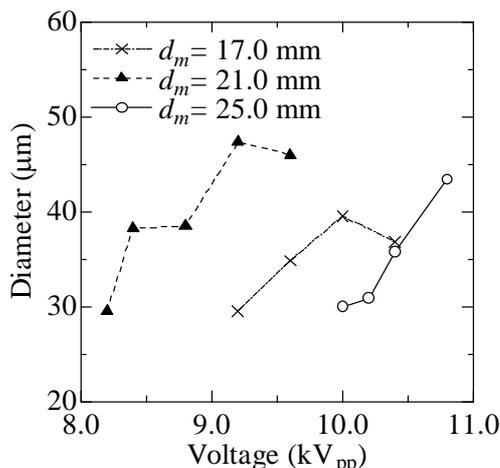


図9 印加電圧に対する液系幅

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

上原聡司, 西山秀哉, 交流電場下における磁性流体液系・液滴挙動の解析, 混相流, 査読有, 第30巻, 2016年, 印刷中.

Satoshi Uehara, Tomonori Itoga and Hideya Nishiyama, Discharge and Flow Characteristics using Magnetic Fluid Spikes for Air Pollution Control, Journal of Physics D: Applied Physics, 査読有, Vol.48, No.28, 2015年, 282001 (5pp).

doi:10.1088/0022-3727/48/28/282001

〔学会発表〕(計5件)

糸賀友則, 上原聡司, 西山秀哉, 磁性流体スパイクを用いた界面放電と流動特性解析, 日本機械学会第93期流体工学部門講演会, 2015年11月8日, 東京理科大学(東京都葛飾区).

Tomonori Itoga, Satoshi Uehara, Hidemasa Takana and Hideya Nishiyama, Discharge and Electrospray Phenomena Using Magnetic Fluid Surface, 12th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2015), 2015年10月28日, 仙台国際センター(宮城県仙台市).

上原聡司, 糸賀友則, 西山秀哉, 磁性流体スパイクを用いた反応性プラズマ流の環境浄化デバイスへの応用, 混相流シンポジウム2015, 2015年8月4日, 高知工科大学(高知県香美市).

上原聡司, 糸賀友則, 西山秀哉, 磁性流体

スパイクを用いた放電を伴う界面流動現象の可視化解析, 第43回可視化情報シンポジウム, 2015年7月21日, 工学院大学(東京都新宿区).

Satoshi Uehara and Hideya Nishiyama, Atmospheric Discharge Using an Interface of Magnetic Fluid, 22nd International Symposium on Plasma Chemistry, 2015年7月6日, アントワープ(ベルギー).

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/nishiyama-lab/japanese.html>

<http://iopscience.iop.org/journal/0022-3727/page/Highlights-of-2015>

<https://jphysplus.iop.org/2015/06/18/magnetic-fluid-spikes-for-air-pollution-control/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

西山 秀哉 (NISHIYAMA, Hideya)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号: 20156128

(2)研究分担者

高奈 秀匡 (TAKANA, Hidemasa)

東北大学・流体科学研究所・准教授

研究者番号: 40375118

上原 聡司 (UEHARA, Satoshi)

東北大学・流体科学研究所・助教

研究者番号: 70742394

(3)連携研究者

田中 康規 (TANAKA, Yasunori)

金沢大学・電子情報学系・教授

研究者番号: 90303263

須藤 誠一 (SUDO, Seiichi)

秋田県立大学・システム科学技術学部・教授

研究者番号: 90006198