

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：32407

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18060

研究課題名(和文) プラズマ放電磁気機能性流体を用いた排ガス微粒子浄化の高機能化

研究課題名(英文) Development of exhaust gas particulate matters treatment using plasma-discharge magnetic functional fluid

研究代表者

桑原 拓也 (Kawahara, Takuya)

日本工業大学・基幹工学部・准教授

研究者番号：70602407

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロ・ナノサイズの排ガス微粒子を圧力損失なしで再飛散なく捕集するためのプラズマ放電磁気機能性流体を用いた排ガス微粒子浄化装置を提案し、開発した。磁気機能性流体として磁性流体を選定し、プラズマ磁性流体フィルタの捕集原理を確立した。
実験により、プラズマ放電条件を変化させ、プラズマ磁性流体フィルタの捕集効率を明らかにした。これらの学術的研究を行い、圧力損失が極めて低く、捕集効率が高いことを立証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の独創的な点はプラズマ技術に磁気機能性流体の利点を融合させて環境負荷低減を図ることにある。学術的には、放電工学、化学反応論、流体工学などの多岐に渡る分野を包括している基礎研究であり、流動プラズマという新しい現象を発見した意義は大きい。また、国際的に環境保全への関心と取組みが進められている今日において、深刻な問題を抱えている大気汚染問題を解決する排ガス微粒子浄化技術の開発がもたらす社会的インパクトは強く、意義は非常に大きい。

研究成果の概要(英文)： An exhaust gas particle purification device using a plasma discharge from a magnetic functional fluid is proposed and developed for collecting micro- and nano-size exhaust gas particles without re-entrainment and pressure loss. A magnetic fluid is selected as the magnetic functional fluid, and the collection principle of the nonthermal plasma (NTP)-magnetic fluid filter is established.

Through experiments, the plasma discharge conditions are varied, and the collection efficiencies of the NTP-magnetic fluid filter are clarified. By conducting these academic studies, it is concluded that the pressure loss is extremely low, and the collection efficiencies are high.

研究分野：流体工学

キーワード：非熱プラズマ 磁気機能性流体 磁性流体 ディーゼル微粒子 排ガス浄化 環境保全

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、PM_{2.5}の問題からも象徴されるように粒子状物質 (PM) が世界的に問題視されている。根本的な解決のためには発生源での捕集除去が必要不可欠である。PMには種類があるものの、深刻な問題を与えているのはボイラーやエンジンの燃焼排ガスに起因する排ガス微粒子であり、三酸化硫黄 (SO₃) やすすなどの炭素が主成分の PM である。SO₃は燃料の脱硫技術により防止でき、実際に低減されている。炭素成分の PM は石油、石炭、バイオ燃料などの炭化水素系燃料の燃焼では理論上除去することは不可能である。特にディーゼル微粒子は以前から問題視されている。欧州では EURO 6 で排気粒子数 (PN) の規制が強化されている。一方で、燃費が良く二酸化炭素 (CO₂) 排出量が比較的少ないディーゼル車は日本ではクリーンディーゼルとして普及が加速している。一般的に近年のディーゼル車にはハニカム型のディーゼル微粒子フィルタ (DPF) を装備して、排出規制をクリアするように排ガス微粒子排出を低減している。DPF はディーゼル微粒子の捕集に特化しているため最も適しているが、圧力損失が大きくなるという欠点がある。さらに捕集した排ガス微粒子を除去しなければいけないが、600°C以上の加熱による燃焼除去を行う必要があり、エネルギー消費が大きい。それに加えて、DPF そのものと排ガス微粒子捕集による圧力損失により、エンジンの燃料消費率も高くなり、環境負荷が大きくなる。近年研究が進められている静電気力による捕集は幅広いサイズ PM 捕集に効果的であるものの、電気抵抗率の低い炭素成分の PM では再飛散現象が生じ、上手く捕集できない。再飛散現象を防ぐためには液膜による捕集が確実であるが、液を流し続けるといけないという短所があり、特に移動発生源での使用に対しては実用的ではない。これらの問題を解決する圧力損失が極めて小さく、かつ再飛散なく捕集効率の良い排ガス微粒子捕集とその除去技術が強く求められている。

2. 研究の目的

排ガス微粒子を取り巻く学術的背景のもと、排ガス流路内に磁気機能性流体を磁力により固定保持すると同時にスパイク現象を起こし界面表面積を大きくしてマイクロ・ナノサイズを含む排ガス微粒子を低圧力損失で再飛散なく捕集し、プラズマ放電によりオゾン (O₃) と OH ラジカルを発生させ PM を酸化し CO あるいは CO₂にして除去する方法を提案する。本研究で提案するプラズマ放電磁気機能性流体による捕集特性と除去効率を実験的に調べる。本研究の主たる目的は以下の通りである。

(1) 排ガス微粒子浄化用プラズマ放電磁気機能性流体の選定と捕集原理の確立、フィルタ設計

排ガス微粒子浄化用プラズマ放電磁気機能性流体として用いる流体を選定する。プラズマ放電磁気機能性流体によるディーゼル微粒子の捕集原理を確立し、その原理をもとにディーゼル微粒子の捕集フィルタを設計する。

(2) 磁気機能性流体からのプラズマ放電の確立

排ガス微粒子浄化に適した磁気機能性流体からのプラズマ放電を達成する。磁気機能性流体の配置や放電電力条件を変えて放電実験を行い最適化する。

(3) 排ガス微粒子浄化システムの構築と捕集機能の解明

プラズマ放電磁気機能性流体を組み込んだ排ガス浄化システムを構築する。排気流量 380 L/min の発電用ディーゼルエンジンの排ガスを処理の対象とする。ただし、本研究は萌芽的であるため、全量処理ではなく、分流した少量の排ガスで実験を行う。排ガス微粒子質量と粒子数 (PN) を測定し捕集効率を算出し、実際の捕集機能を明らかにする。

3. 研究の方法

磁気機能性流体として磁性流体を選定した。磁性流体はマグネタイトなどの強磁性微粒子が界面活性剤により溶媒に安定分散したコロイド溶液で、磁場に感応する性質を有する。そのため、磁石により吸着固定することが可能である。また、磁束密度が強くなり、臨界磁束密度を超えると磁力線に沿って磁性流体の表面が変化し、スパイク現象が観察される。磁石で磁束密度を制御することにより、スパイクのパターン、密度、長さを制御することができる。

磁性流体磁性流体フィルタの捕集原理を図 1 に示す^①。PM を含む排ガスは磁性流体フィルタを通過する。磁性流体フィルタでは、磁性流体が磁石によって流路の壁面に保持されている。スパイクの形成と磁性流体を保持するために必要な磁場強度は、磁場の強度と勾配によって制御できる。排ガス中の PM は、磁性流体の表面で捕集され、このときに生じる圧力損失は極めて低い。磁性流体の表面にスパイクが形成されることによって表面積が大きくなり、PM を除去するための接触面が増加し、効率良く捕集できる。マイクロサイズの PM は慣性力と重力によって収集される。ただし、ナノサイズの PM はブラウン拡散によって収集される。これが磁性流体による PM 捕集であり、本研究では磁性流体フィルタによる捕集と呼ぶ。

一方、一般的に静電気力による微粒子捕集はナノサイズからマイクロサイズまでの広い範囲の微粒子に対して効果的であることが知られている。しかし、ディーゼル微粒子のような低電気抵抗の微粒子に対しては、帯電した微粒子が捕集電極に到達したときに電荷を失い、再び電極から離れるという再飛散現象の問題がある。この再飛散現象が静電気力によるディーゼル微粒子捕集の実現の妨げとなっている。本研究では、この問題を解決し、静電気力による捕集を

有効に活用する。図 1 に示すように磁性流体は電極の上に保持される。他方の電極は誘電体に貼られている。電極に交流の高電圧を印加すると、電極間で非熱プラズマ (NTP) 放電の一つである誘電体バリア放電 (DBD) が起こる。このとき、PM を含む排ガスが通過すると上述の磁性流体による捕集に加え、放電に伴う静電気力による捕集効果も加わる。帯電した PM は磁性流体で液面捕集されるので再飛散の問題が起こらない。この磁性流体そのものと非熱プラズマ放電の相乗効果により、捕集効率の高効率化を達成する。この捕集をプラズマ磁性流体フィルタによる捕集と呼ぶ。さらに NTP 放電により O_3 が発生する。捕集された PM の処理方法として、磁性流体の交換、または O_3 注入による酸化、NTP 放電によって生成される OH ラジカルと O_3 による酸化が挙げられる。

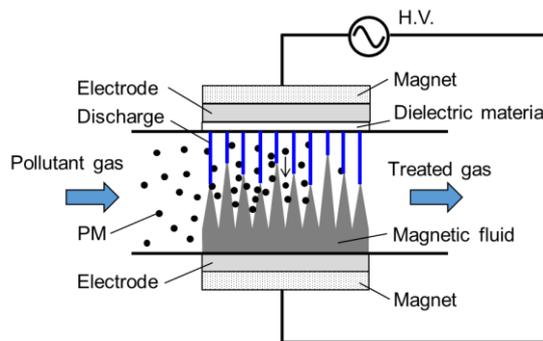


図 1 プラズマ磁性流体フィルタの捕集原理

磁性流体フィルタとプラズマ磁性流体フィルタによる捕集性能を評価する実験を行う。図 2 にプラズマ磁性流体フィルタの評価システムを示す。まず、排ガスとクリーンエアのサンプリングを行う。排ガスのサンプリングでは、エンジン負荷として電気ヒーターが接続されているディーゼルエンジン発電機 (KDE2.0E-60Hz, KIPOR 製) からのディーゼル粒子をサンプリングする。エンジン負荷は 25% (= 500 W) である。エンジン排ガス主配管 (排気流量 380 L/min) から分流した流路を介して、排ガスをガス採取バッグ (容積 20 L) に採取する。クリーンエアのサンプリングでは、膜フィルタ (孔径 $0.20 \mu\text{m}$) を取り付けた真空ポンプで大気をろ過しながら採取する。ガス採取バッグ内のガス、つまり排ガスとクリーンエアは、図 2 に示すように、提案された磁性流体フィルタの評価に使用される。サンプリングされた排ガスは、磁性流体フィルタを流れ、PM が除去される。排ガスの体積

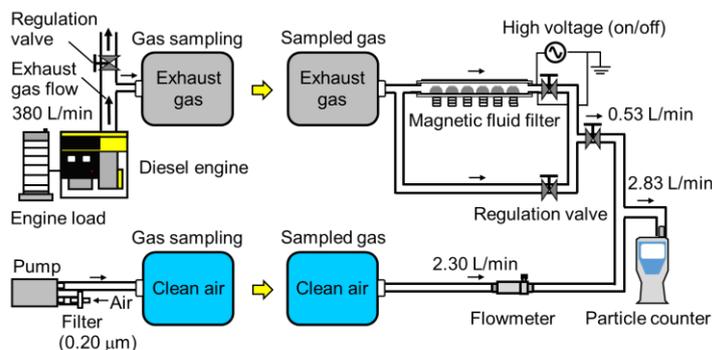


図 2 プラズマ磁性流体フィルタの評価システム

流量は、調節弁により 0.53 L/min に設定する。PM 数 (粒子数) を測定するパーティクルカウンタ (HHPC 3+, Beckman Coulter, Inc. 製) の吸気流量は 2.83 L/min と一定で、排ガスとクリーンエアの合流ガスを吸引する。調整弁による排ガス制御により排ガスをクリーンエアで希釈でき、パーティクルカウンタの測定限界以下で正確な測定が行える。希釈前の PM 数は、パーティクルカウンタで測定された PM 数に対して希釈率を用いて算出する。本研究では、水ベースの磁性流体 (W-40、イチネンケミカル製) を使用する。プラズマ磁性流体フィルタを通らないバイパスを通過した未処理の排ガス中の PM 数 N_{exh} 、磁性流体フィルタを通過した排ガス中の PM 数 N_{MF} 、磁性流体フィルタに NTP 放電を加えたプラズマ磁性流体フィルタを通過した排ガス中の PM 数 N_{MFNTP} を測定し、捕集効率を求める。磁性流体のみによる PM 捕集効率 η_{MF} と、プラズマ磁性流体フィルタによる PM 捕集効率 η_{MFNTP} を次のように定義する。

$$\eta_{\text{MF}} = \frac{N_{\text{exh}} - N_{\text{MF}}}{N_{\text{exh}}}$$

$$\eta_{\text{MFNTP}} = \frac{N_{\text{exh}} - N_{\text{MFNTP}}}{N_{\text{exh}}}$$

さらに、NTP 放電のみによる PM 捕集効率 η_{NTP} を次のように定義する。

$$\eta_{\text{NTP}} = \frac{N_{\text{MF}} - N_{\text{MFNTP}}}{N_{\text{MF}}}$$

4. 研究成果

図 3 にプラズマ磁性流体フィルタの概略図と磁性流体のスパイクから NTP 放電している写真を示す。写真から分かるように、6 個の磁性流体のブロック上のスパイクから同時に NTP 放電を起こすことに成功した。同時に NTP 放電を起こすことで、プラズマ磁性流体フィルタ全域での PM 捕集が可能となり、この成果は捕集効率の向上につながる結果である。スパイクのサイ

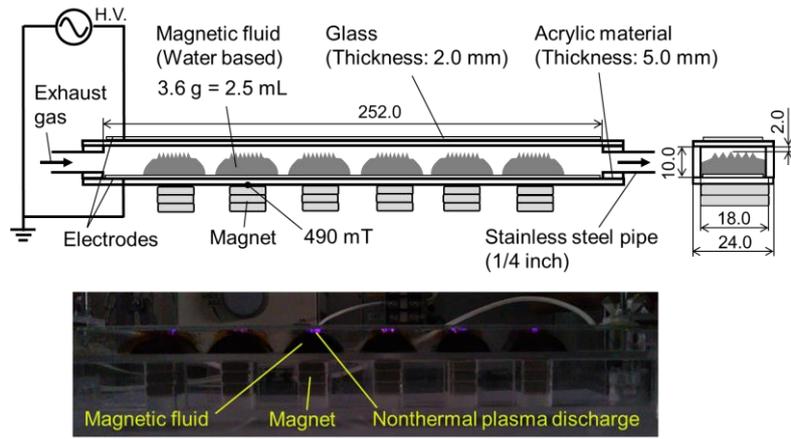


図3 プラズマ磁性流体フィルタの概略図と磁性流体のスパイクからの NTP 放電

ズと形状は、1辺が約 2.0 mm の正方形を底に持つ高さが 1.5–2.0 mm のスパイクである。磁性流体の保持とスパイクの発生には、3 個の矩形永久磁石（ネオジウム磁石）を重ねて使用する。この場合の磁石表面の磁束密度は 490 mT である。電極としてアルミテープを使用し、プラズマ磁性流体フィルタの流路上下に配置する。誘電体として、厚さ 2.0 mm のガラス板を使用する。電極には、電圧 10 kV で周波数 9 kHz の交流電圧を発生できる高圧電源（LHV-13AC、ロジー電子製）が接続されている。さらに、この高圧電源への入力電力は、入力電源の電圧を調整できるように、変圧器（MVS520、山菱電機製）から供給される。100 V は入力電圧 100% とする。高圧電源の消費電力は電力計（TAP-TST7、サンワサプライ製）で測定する。NTP 放電の発生は、通電を確認することによって判定できる。つまり、通電が確認されない状態では放電が起こっていないことを示す。実験の結果、入力電圧が 70 V（入力電圧の 70%）を超えると、磁性流体のスパイクからの NTP 放電が起こることが分かった。なお、入力電圧 70% および 100% の場合の消費電力は 31 W および 79 W であった。

図 4 (a) に磁性流体フィルタの PM 捕集効率 η_{MF} 、図 4 (b) にプラズマ磁性流体フィルタの PM 捕集効率 η_{MFNTP} を示す。測定は入力電圧 70%、測定回数は 6 回で行った。測定の結果、未処理の排ガス中の PM の平均数は、直径 $d_p > 0.3 \mu\text{m}$ の場合は 2.5×10^6 個/L、直径 $d_p > 0.5 \mu\text{m}$ の場合は 2.1×10^6 個/L、直径 $d_p > 1.0 \mu\text{m}$ の場合は 1.2×10^6 個/L、直径 $d_p > 2.0 \mu\text{m}$ の場合は 3.3×10^5 個/L、直径 $d_p > 5.0 \mu\text{m}$ の場合は 1.7×10^2 個/L、直径 $d_p > 10.0 \mu\text{m}$ の場合は 0 個/L（検出なし）であった。図 4 (a) に示すように、これらに対応する PM 捕集効率 η_{MF} は、 $d_p > 0.3 \mu\text{m}$ の場合は 35%、 $d_p > 0.5 \mu\text{m}$ の場合は 51%、 $d_p > 1.0 \mu\text{m}$ の場合は 61%、 $d_p > 2.0 \mu\text{m}$ の場合は 90%、 $d_p > 5.0 \mu\text{m}$ の場合は 100% すなわち完全捕集であった。一般的に、慣性力と重力によるエアロゾルの移動速度はその直径に比例し、ブラウン拡散による移動速度はその直径に反比例する。したがって、主に慣性力と重力が直径 $d_p > 0.3 \mu\text{m}$ の場合の PM 除去に寄与していると推測できる。さらに、図 4 (b) に示すように、プラズマ磁性流体フィルタの PM 捕集効率 η_{MFNTP} は、 $d_p > 0.3 \mu\text{m}$ で 44%、 $d_p > 5.0 \mu\text{m}$ で 85%、 $d_p > 1.0 \mu\text{m}$ で 99% であり、 $d_p > 2.0 \mu\text{m}$ の場合では 100% を達成した。このときの NTP 放電のみによる PM 捕集効率 η_{NTP} は、 $d_p > 0.3 \mu\text{m}$ の場合は 14%、 $d_p > 0.5 \mu\text{m}$ の場合は 70%、 $d_p > 1.0 \mu\text{m}$ の場合は 97%、 $d_p > 2.0 \mu\text{m}$ の場合は 100% であった。プラズマ磁性流体フィルタでは、NTP 放電により PM が帯電する。つまり、プラズマ磁性流体フィルタでの PM 捕集において、広範囲の粒子径に効果的に働く静電気力の寄与が大きいと考えられる。実験結果より、 $d_p > 0.5 \mu\text{m}$ の PM に対して静電気力の効果は十分に高いといえる。一方、 $d_p < 0.5 \mu\text{m}$ の PM の場合、PM は慣性力が弱いため、排ガスの流れに沿って移動すると考えられ、PM がスパイクまたは NTP 放電に接触する可能性は低くなる。したがって、この範囲のサイズの微粒子の効率は高くなかったのではないかと推測できるが、この点については、今後、より詳細な実験および考察が必要である。

次に、入力電圧 100% での PM 捕集実験を行った。測定回数は 70% のときと同様に 6 回で行った。図 4 (c) に示すように、プラズマ磁性流体フィルタの PM 捕集効率 η_{MFNTP} は、 $d_p > 0.3 \mu\text{m}$ で 40%、 $d_p > 5.0 \mu\text{m}$ で 72%、 $d_p > 1.0 \mu\text{m}$ で 98% であり、 $d_p > 2.0 \mu\text{m}$ の場合では 100% を達成した。入力電圧 70% と 100% では効率の差は小さいものの、入力電圧 70% での PM 捕集の方が、 $d_p < 1.0 \mu\text{m}$ において少し効率が高い結果となった。この理由として、入力電圧 70% での NTP 放電は弱いため、磁性流体のスパイクからの NTP ストリーマは不安定である。一方、入力電圧 100% の場合、磁性流体のスパイクからの NTP ストリーマは安定である。したがって、入力電圧 70% の場合、PM がストリーマと接触する可能性が高くなり、特に微細な PM に対してより効率的に作用したと考えられる。しかし、この点についても、今後、より詳細な実験および考察が必要である。

以上の結果より、プラズマ磁性流体フィルタの捕集効率を向上させる、すなわち、PM がス

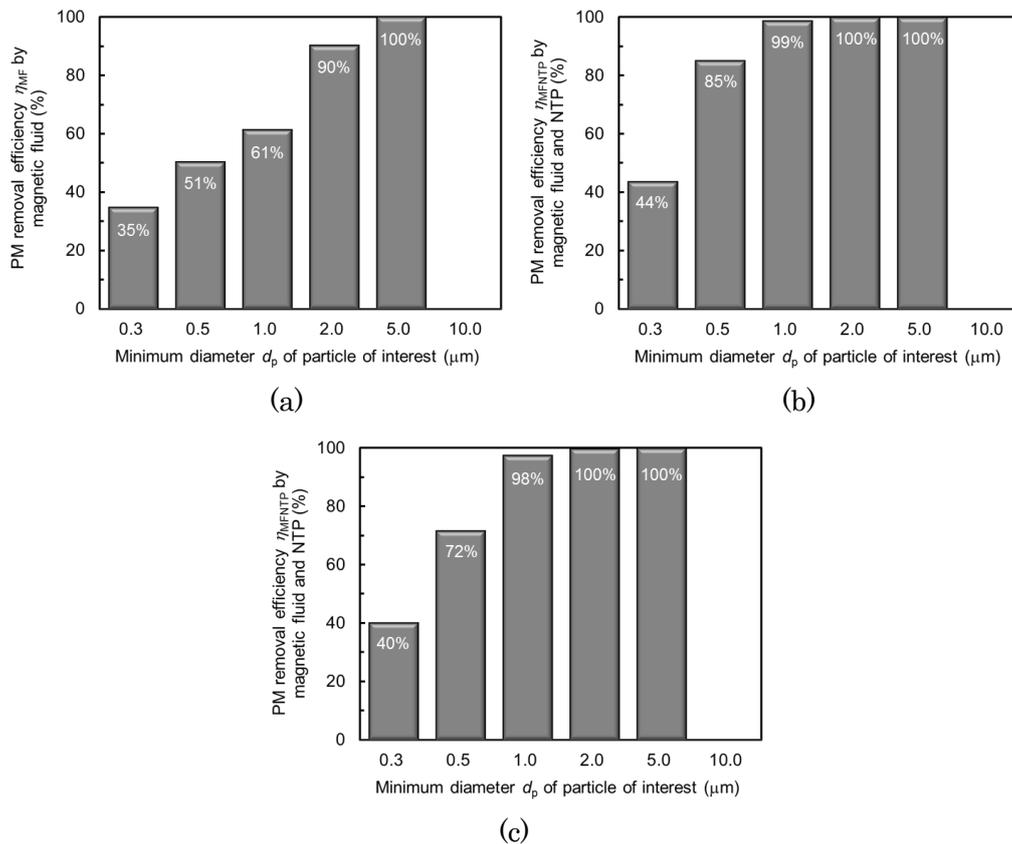


図4 PM 捕集効率の実験結果：(a) 入力電圧 70%の磁性流体フィルタの PM 捕集効率 η_{MF} 、(b) 入力電圧 70%のプラズマ磁性流体フィルタの PM 捕集効率 η_{MFNTP} 、(c) 入力電圧 100%プラズマ磁性流体フィルタの PM 捕集効率 η_{MFNTP}

スパイクと接触する確率を向上させるためには、スパイクから NTP 放電が起こることから、スパイクの数を増やすと良いという知見を得た。また、PM 捕集と消費エネルギー削減の観点からいけば、入力電圧 70%の PM 捕集の方が効率的であるといえるものの、今後、より詳細な実験および考察が必要である。また、NTP 放電で発生する O_3 による捕集 PM の酸化除去についても調査が必要である。プラズマ磁性流体フィルタの高性能化に向けて、引き続き研究を進展させる。

以上の研究成果を以下にまとめる。

- (1) プラズマを放電する磁気機能性流体として磁性流体を選定した。ディーゼル微粒子捕集除去を目的とした磁性流体フィルタおよびプラズマ磁性流体フィルタを提案した。プラズマ磁性流体フィルタの設計と PM 捕集効率を評価する実験システムを構築した。
- (2) プラズマ磁性流体フィルタにおいて、6 個の磁性流体のブロック上のスパイクから同時に NTP 放電を起こすことに成功した。同時に NTP 放電を起こすことで、プラズマ磁性流体フィルタ全域での PM 捕集が可能となり、この成果は捕集効率の向上につながる結果である。
- (3) 実験結果により、磁性流体フィルタで比較的高い捕集性能を確認できた。さらに、プラズマ磁性流体フィルタでは、より微細な PM も効果的に捕集ができ、一般的に静電気力による捕集が難しいとされてきた低電気抵抗の PM 捕集を実現した。プラズマ磁性流体フィルタの PM 捕集効率 η_{MFNTP} は、 $d_p > 0.3 \mu\text{m}$ で 44%、 $d_p > 5.0 \mu\text{m}$ で 85%、 $d_p > 1.0 \mu\text{m}$ で 99%であり、 $d_p > 2.0 \mu\text{m}$ の場合では 100%を達成した。

当初予期していなかった流動プラズマという新しい現象を発見した意義は大きい。今後、流動プラズマについて、さらなる現象解明を通して開拓し、その応用を検討する。また、国際的に環境保全への関心と取組みが進められている今日において、深刻な問題を抱えている大気汚染問題を解決する排ガス微粒子浄化技術の開発がもたらす社会的インパクトは強く、意義は非常に大きい。得られた研究成果は学会、国際会議、学術論文で発表していく。

<引用文献>

- ① Takuya KUWAHARA, “Fundamental Characteristics of Low-Resistive Particulate Matter Removal Using A Magnetic Fluid and Nonthermal Plasma”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol.498, 2020, 166161

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takuya Kuwahara	4. 巻 498
2. 論文標題 Fundamental characteristics of low-resistive particulate matter removal using a magnetic fluid and nonthermal plasma	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 166161 ~ 166161
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166161	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takuya Kuwahara
2. 発表標題 Application of Magnetic Fluid to Diesel Particulate Removal
3. 学会等名 Japan-Taiwan International Conference on Magnetic Fluids 2018（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuya KUWAHARA
2. 発表標題 Fundamental Characteristics of Diesel Particulate Removal From Exhaust Gas Using A Magnetic Fluid
3. 学会等名 The 7th International Workshop of Energy Conversion (IWEC2017)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takuya Kuwahara
2. 発表標題 Fundamental Characteristics of Diesel Particulate Removal Using A Ferrofluid and Nonthermal Plasma Discharge
3. 学会等名 15th International Conference on Magnetic Fluids (ICMF 2019)（国際学会）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

日本工業大学教員紹介ホームページ
https://www.nit.ac.jp/gakka/subject/kyoin6/me_kuwahara.html
日本工業大学基幹工学部機械工学科流体工学研究室ホームページ
<https://sites.google.com/view/fluid-engineering/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----