

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11702

研究課題名(和文) 誘電体表面荷電と非熱プラズマを用いた新しい有害微粒子(PM)処理技術の実用化研究

研究課題名(英文) Development of novel treatment technology for harmful particulate matters (PM) using Charged dielectric surface and non-thermal plasma

研究代表者

吉田 恵一郎 (Yoshida, Keiichiro)

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：80549048

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、燃焼機器から生じる炭素を主成分とする「すす」の捕集から分解までを一連の過程で実現する新手法について実施された。炭素粒子のような導電性微粒子を静電集塵により除去・分解することは従来困難であったが、集塵極を積極的に帯電させた誘電体とすることでこの問題を解決しようとするのが、研究の意図である。

研究の結果、提案する技術における新規の微粒子除去メカニズムを発見し、それが実際の排ガス微粒子の除去に対して十分に有効であることを見出した。また、プラズマにより発生する活性酸素種が微粒子を酸化分解することも実証できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

すすは入り組んだミクロ構造を有するため、表面に有害な炭化水素を吸着している。大気中のPM2.5の濃度は新興工業国をはじめとした世界の多くの地域で環境基準値を大幅に上回っているが、炭素粒子(すす)はその構成要素としても無視できないだけ存在し、健康への被害が懸念されている。すすの発生源は火力発電、船舶、航空機、自動車、鉄道など多岐に渡っているため、すすの問題は今後数十年は取り組み続けなければならない。本研究はそのための有効な手段となりうる。また、研究した技術は空中浮遊菌やウイルスの除去・無害化への応用も期待される。

研究成果の概要(英文)： This study has been conducted to realize a novel electrostatic technique that performs from the collection to the decomposition of soot in a series of processes with a single device. I aimed to solve the problem that conventional electrostatic precipitation devices could not collect conductor particulates such as soot.

As results of the study, a novel particle collection mechanism was found and it was elucidated that the mechanism was effective for the purification of real exhaust gas. Moreover, it was demonstrated that active oxidative species generated by nonthermal plasma decomposed the collected soot.

研究分野：静電気工学，プラズマ応用

キーワード：静電集塵 誘電体 微粒子 すす ディーゼル 非熱プラズマ 活性酸素種 帯電

### 1. 研究開始当初の背景

本研究の目的に直接関係する背景は次のように静電集塵技術に関するものであり、現在でも大きく変化していない。大気中に浮遊する微粒子である PM2.5 の濃度は新興工業国をはじめとした世界の多くの地域で環境基準値を大幅に上回っているが、炭素粒子(すす)はその構成要素としても無視できないだけ存在し、健康への被害が懸念されている。そのため、内燃・外燃機関、鉄鋼生産施設、焼却施設などの燃焼機器から排出される炭素を主成分とする PM を取り除く必要性が高まっている。排出ガス規制の観点から言えば、自動車排ガスに対する PM 排出規制値は段階的に厳しくなっており、シリンダ内の燃焼改善だけでは対応できないレベルになっている。船舶については現時点では直接的な規制値が存在しないものの、船舶用エンジンメーカーは将来予想される規制に向けて後処理術を開発中である。排ガス中のすすは、多孔質セラミック製のフィルタにより濾過することが一般的であるが、圧力損失が常に存在する上、定期的に排ガス温度を上昇させて蓄積されたすすを燃焼させなければならない。これらの理由により、すすの後処理には数%の燃費悪化を伴う。

静電集塵では、ほとんど圧力損失が発生しないため、排ガス浄化に適用することができれば、フィルタ除去の持つ問題は部分的に大きく解決するが、ここでまず問題になるのは、炭素粒子は導電性が高いため、静電集塵によって捕集することが難しいという点である。静電誘導のため PM が集塵極上で数珠状の塊を形成し再飛散することが原因である。また、従来の静電集塵装置では、集塵極上に PM が蓄積されると、定期的に清掃をしなければならないという問題もある。

PM 処理とは異なる分野における本研究の関連技術としては、プラズマアクチュエータと呼ばれるものがある。つまり、誘電体バリア放電(を利用して空気中に気流を発生させる「プラズマアクチュエータ」が近年注目されている。代表的な応用先としては、翼面からの剥離気流抑制による航空機、風車、ガスタービンの効率改善がある。気流発生特性への導電性付着微粒子の影響は、実用化に際して必ず検討すべき項目であるが、十分に検討されていない。

### 2. 研究の目的

本研究はエンジン等をはじめとする燃焼機器から排出される炭素を主成分とする微粒子(particulate matter: PM)を、静電気力と非熱プラズマによって低消費エネルギーで効果的に処理する新しいシステムに関するものである。図1に本研究が提案するシステムの概念を示す。表面に放電極が設置された誘電体板と PM を荷電する荷電部が、主な構成要素である。動作モードとして、PM の捕集と分解の二つを持つ。捕集モードでは、正バイアスを付与された交流高電圧が放電極に印加され、放電極付近生じた極微弱な放電により誘電体表面に正イオンが広がる。ここに、負荷電された PM が誘引されて捕獲される。従来の静電集塵法のように集塵極が導電体でないため、再飛散の原因となる静電誘導が生じない。分解モードでは、放電極に十分に高い電圧を印加して誘電体バリア放電(DBD)を生じさせ、誘電体表面に非熱プラズマを発生させる。このプラズマ中で生じる酸素ラジカル(O)やヒドロキシラジカル(OH)の作用により、蓄積された PM を酸化分解する。これらの機構により、従来の静電集塵技術の問題点である、導電性微粒子の再飛散と定期的な清掃の必要性が大きく改善される。

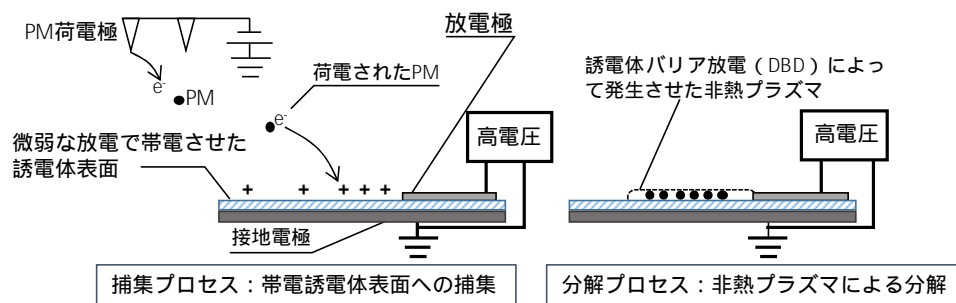


図1 提案システムの概念図

申請研究開始以前にこの方式で排ガス PM を一定程度除去できることは分かっていたが、不明な点、懸念される点が残されていた分解モードにおいて、付着微粒子の付着領域と酸化分解される程度の間関係を調べる必要があり、また、静電誘導ではない原因で再飛散が生じるとすれば、どのようなメカニズムが存在するのか、という点である。これらについて知見を得、マイナス点に対しては対策法を見出すのが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

当初想定していた円筒型の PM 処理装置(図2:「円筒型」と称する)だけでなく、研究の進展に伴ってより実用的な形態である平板電極積層型(図3:「平板型」)による研究も行った。円筒

型を用いた研究では、PM 再飛散、PM 分解および長時間排ガス浄化試験を実施し、平板型を用いた研究では、より具体的な PM 捕集メカニズムの検討を行った。

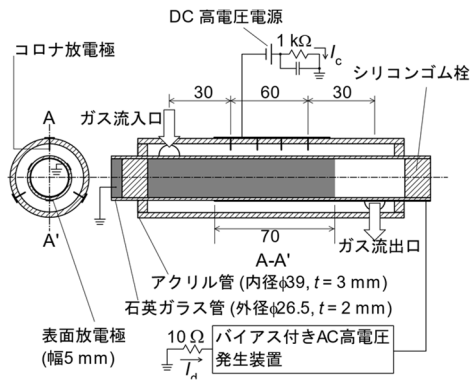


図2 円筒型 PM 処理装置

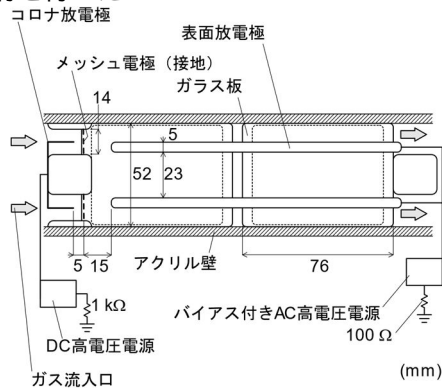


図3 平板型 PM 処理装置（内部の上面図：実際には同様の電極板を対向させる）

#### 4. 研究成果

図4に円筒型処理装置を用いて800分間に渡って10NL/minの実排ガスを浄化した試験の結果を示す。「A」、「B」と示した期間はそれぞれ捕集モード、分解モードである。左軸の除去率は、排ガス中のPMが100%除去されたときに1.0となる指標である。分解モードにおいて、負の除去率が得られるのは再飛散が生じた結果であるが、除去されPM量に対し、およそ10%程度の再飛散量と見積られる。この試験とは別途おこなったPIVによる気流分布の観測では、排ガス浄化実験の電圧条件では、放電により誘起される気流（イオン風）がほとんど見られなかったことから、再飛散の原因は、イオン風の流体抵抗力ではなく、放電極から供給されるイオンにより帯電したPMが、荷電極に向かうクーロン力を受けたことであると考えられる。ただし、800分間の除去試験において、捕集モードにおけるPM除去効率が低下していないことから、分解モードの実施頻度をもっと下げることが可能であり、作動パターンの最適化により再飛散は実用上、問題ないレベルに抑えられると結論付けることができた。

円筒型処理装置の放電極を模した電極板にカーボンブラックを塗布し、加湿空气中で放電を生じさせたところ、図4の捕集モード相当の電圧条件においてもCO、CO<sub>2</sub>へのPMの酸化分解が生じることが判明した。特に、カーボンブラックの塗布域と放電極端との距離が0.5mmである時に最も活発な酸化分解が得られた。すなわち、捕集モードにおいてもある程度、分解しながらPM除去が行われ、分解モードの実施頻度をより小さくできることが期待できる。

PM処理試験とは別途行った電極板上の表面電位計測では、放電極への印加電圧が間欠的であっても誘電体表面の電位が少なくとも数秒間は保たれることが判明した。つまり、放電極への電圧印加を間欠的としてもPM捕集能力が生じることが予想された。この新たな知見を踏まえ、平板型PM処理装置を用いて実排ガス試験を実施するとともに、荷電された微粒子の誘電体上への誘因を数値シミュレートした。その結果を図5に示す。3.6kVppのバイアス付き交流電圧（約13kHz）を、1周期200msの中で8msのみ印加し、38L/minの実排ガスを処理した。シミュレーションは実機のPM付着領域をよく再現している。電圧印加が間欠的であるため、放電極が0V、誘電体表面が高電位という電位の不均一が生じ、この不均一が生む電界がPMを誘電体上へと誘引するという新たなメカニズムが示された。このメカニズムは静電集塵技術としては従来考えられなかったものである。研究開始当初予想していた方式とは異なるが、電圧の間欠印加は、消費エネルギー低減、再飛散抑制につながるため、今後の技術開発の基礎とする。

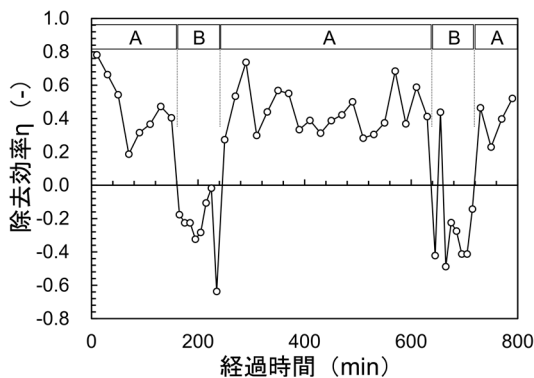


図4 実機 PM 処理試験結果（円筒型）

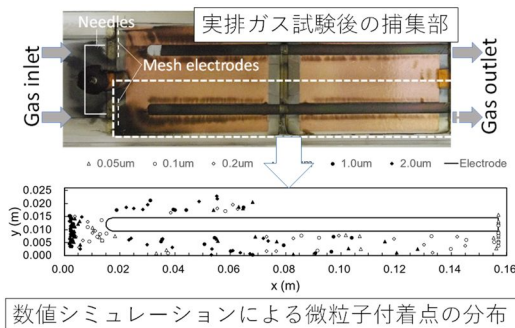


図5 PM 捕集メカニズムの検討（平板型）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2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 Keiichiro Yoshida	4. 巻 55
2. 論文標題 Aftertreatment of Carbon Particles Emitted by Diesel Engine using a Combination of Corona Discharge and Dielectric Barrier Discharge	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 5261-5268
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIA.2019.2924879	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 -

1. 著者名 Keiichiro Yoshida	4. 巻 巻の設定なし
2. 論文標題 Collection of Carbon Particles Using the Attractive Force Created by Surface Charging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting	6. 最初と最後の頁 total 5 pages
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IAS44978.2020.9334834	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Takuya Kuwahara, Keiichiro Yoshida, et al.	4. 巻 56
2. 論文標題 Pilot-Scale Combined Reduction of Accumulated Particulate Matter and NOx Using Nonthermal Plasma for Marine Diesel Engine	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 1804-1814
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIA.2019.2958276	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6件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Keiichiro Yoshida
2. 発表標題 Collection of Conductive Particles Using Attractive Interaction over Dielectric Layer
3. 学会等名 The 7th East Asia Joint Symposium on Plasma and Electrostatics technologies for Environmental Applications（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiichiro Yoshida
2. 発表標題 Aftertreatment of Carbon Particle Emitted by Diesel Engine Using Combination of Corona and Dielectric Barrier Discharge
3. 学会等名 2018 Electrostatics Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keiichiro Yoshida
2. 発表標題 Diesel Particle Control by Particle Accumulation on a Dielectric Surface
3. 学会等名 The 6th East Asia Joint Symposium on Plasma and Electrostatics Technologies for Environmental Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田 患一郎
2. 発表標題 帯電誘電体表面へのディーゼル微粒子の集積と酸化分解
3. 学会等名 第42回静電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keiichiro Yoshida
2. 発表標題 Collection of Carbon Particles Using the Attractive Force Created by Surface Charging
3. 学会等名 55th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田 恵一郎
2. 発表標題 誘電体への微粒子附着を利用した炭素粒子の静電式捕集・分解技術
3. 学会等名 静電気学会東北・関西・九州支部合同研究会 / 第435 回生存圏シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

the 2019 James Melcher Prize Paper AwardをIEEE Industry Applications Societyから授与された(受賞論文: Keiichiro Yoshida, "Aftertreatment of Carbon Particles Emitted by Diesel Engine using a Combination of Corona and Dielectric Barrier Discharge", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 55, no. 5, pp. 5261-5268 (2019))

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関