

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 13 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02367

研究課題名（和文）船舶起源NOx・PMに対するパルスパワー浄化システムの開発

研究課題名（英文）Development of Pulse Power Purification System of NOx and PM Emission from Ships

研究代表者

江原 由泰（Ehara, Yoshiyasu）

東京都市大学・理工学部・教授

研究者番号：40308028

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、船用ディーゼル排出ガス中のNOx・PM同時処理技術として、常温から400℃まで適応するパルスパワーを用いた処理システムを構築することを目的としている。パルスパワーは、高温ガス中においてもスパークせずに安定したプラズマ放電の発生が可能である。研究では、パルスストリーマに対する粒子挙動をシミュレーション解析し、最適なパルス電圧波形や繰り返し周波数などの検討を行った。また、放電開始電圧やスパーク電圧に対する処理ガス温度の影響について検討した。これらの成果をもとに、パルスパワーを用いたESPシステムを構築し、ガス温度に対するPM集塵特性試験を行い、ESP性能向上を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船舶から排出されるNOx・PMを同時除去する技術の確立は切望されている。放電プラズマを適用する技術では、エンジンの運転状態により排出ガス温度は変化し、それに伴い放電電流および放電形態が変化する。そのため、安定な除去効率を得るためには、排出ガス温度に影響されない、システムの開発が必要となる。パルスパワーは高温ガス中においても、スパークせずに安定したプラズマ放電の発生が可能となる。さらに、パルスパワーによりオゾンや酸素原子を効率良く発生させ、これら活性種により捕集したPM燃焼およびNOxの還元を行う。ディーゼル排ガス処理に、パルスパワーを適用した例は未だなく、学術的な独自性は極めて高い。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to develop a simultaneous NOx and PM treatment technology for marine diesel exhaust gas. The treatment system uses pulsed power and is applied from room temperature to 400°C. The pulse power can generate a stable plasma discharge without sparking even in a high temperature gas. In this research, the particle behavior for pulsed streamers was simulated and analyzed, and the optimum pulse voltage waveform and repetition frequency were examined. The effects of the processing gas temperature on the discharge inception voltage and spark voltage was investigated. Based on these results, ESP system using pulse power was constructed, PM collection characteristics were tested for gas temperature, and confirmed that ESP performance was improved.

研究分野：プラズマ応用工学

キーワード：船舶 排ガス 電気集塵 パルスパワー 微小粒子 窒素酸化物

## 1. 研究開始当初の背景

自動車からの排出ガス中の大気汚染物質は、各国における規制の強化や処理技術の向上により、現在ではゼロエミッションを目指すほどになっている。一方、船舶からの排出ガスに対する国際的な規制は、国際海事機関(IMO)において、海洋汚染防止条約(MARPOL 条約) 付属書VIにより、2005年から世界的に実施されている。その後この規制は段階的に厳しくなり、NO<sub>x</sub> については2次規制を経て、北米及び米国カリブ海の排出規制海域(ECA) に対しては、1次規制の80%に削減する第3次規制に2016年から移行した。

SO<sub>x</sub> の排出規制については、燃料油中の硫黄分濃度を規制することを基本としており、この規制は粒子状物質(PM)の規制も兼ねている。SO<sub>x</sub>・PMの排出規制は、2012年から燃料油中の硫黄分濃度を3.5%以下としている。さらに、この規制値は2020年1月以降は0.5%以下、ECAにおいては今までの1.0%から0.1%以下にしなければならない。

NO<sub>x</sub> 除去においては、EGR(Exhaust Gas Recirculation) や SCR(Selective Catalytic Reduction)など、SO<sub>x</sub> 除去においてはスクラバの開発がなされ、実船化に至っている。一方、PMの排出規制は燃料油中の硫黄分濃度規制に委ねているが、これは排出ガス中のPMにおいてサルフェート(硫酸塩)の含有率が比較的高く、燃料油中の硫黄含有量が低減すると、PM濃度も減少するためである。しかし、PM除去技術において実船化の目途が立っていないことも、その理由に挙げられる。さらに欧米の一部の海域では、既に燃料中の硫黄分の削減でなく、PMそのものの規制が始まっている。燃料油中の脱硫には多大な設備投資が必要で、燃料費が増加となり経済的にも問題がある。従来燃料を使用する場合、規制値をクリアする排出ガス浄化装置を設置しなければならない。また、低硫黄燃料を用いても、エンジンの条件により、ブラックカーボン(BC)はほとんど減少しないことが報告されている。今後は、北極海域におけるBC低減が課題となることも予想され、PM除去装置の開発は切望されている。船舶の環境保全技術に関して、我が国が先進的かつ主導的な役割を果たすことは、今後の造船業界の発展に大きく貢献する。そのためにNO<sub>x</sub> およびBCを含めたPM除去装置の開発を戦略的に実施することは大変有意義と考えられる。

船用エンジンから排出されるPMは、煤(Soot)、可溶性有機成分(SOF)、サルフェートが主な成分で、排出ガス量は多くPM濃度は高い。そのためディーゼルパーティキュレートフィルター(DPF)では、燃焼法などの再生頻度が多くなりそのコストも高い。また、DPFでは処理温度が高いと、SOFやサルフェートがエレメントを通過し、除去効率が低下するなどの課題がある。一方、電気集塵装置(ESP)は他の除去装置と比べて、圧力損失が小さく運転費用が安価、粒径1 $\mu$ m以下の微粒子に対して集塵率が高くSOFなども除去可能なことが利点である。ESPをエンジン直後に設置する場合、排出ガス温度の影響に対して対策する必要がある。ESPはコロナ放電によりPMを帯電させ、クーロン力により捕集する。ディーゼルエンジンの排出ガスは200 $^{\circ}$ Cをはるかに超える高温であり、コロナ放電は温度の影響を大きく受ける。ガス温度が上昇すると、相対密度が低下しイオン移動度が増大するため、コロナ放電電流は増加する。放電電流の増加により放電形態は変化し、150 $^{\circ}$ C以上では安定なグローまたはブラシコロナからストリーマコロナに移行し、さらに放電電流が増加するとスパーク状態になる。電極間が短絡し大電流が流れるスパーク状態では、ごく一部の放電路のみに電流が集中するため、PMはほとんど帯電せず、集塵効率は著しく低下する。さらに、大電流が流れることにより電極は大きく損傷する。

## 2. 研究の目的

本研究では、船用ディーゼル排出ガス中のNO<sub>x</sub>・PM同時処理技術として、常温から400℃まで適応するパルスパワーを用いた処理システムを構築することを目的としている。極端に短い時間にエネルギーを圧縮・重畳させることで得られるパルスパワーは、均一で強力な非熱平衡プラズマを発生する。このため、プラズマ内のガス分子をより効果的に活性化することができ、荷電粒子やイオン、活性原子を高密度で生成できる。また、パルスストリーマは直流コロナではスパークに至るような高電圧に対しても、ストリーマが接地電極に届くまでに電界が低下するため放電が停止し、部分放電の形態を保つことができる。このパルスパワーをESPに使用し、その有効性を検証してNO<sub>x</sub>・PM同時処理システムの構築を図る。NO<sub>x</sub>・PM浄化処理システムは、ESPユニットとプラズマ・触媒ユニットから構成される。ESPユニットでは、パルスストリーマ放電によりPMを捕集する。プラズマ・触媒ユニットは、BCを含むPMを酸化燃焼する。さらに、排出ガス中のNOもプラズマ・触媒ユニットにおいて除去される。

## 3. 研究の方法

船用排出ガス処理として高効率なNO<sub>x</sub>・PM浄化処理を目指し、システムの有効性の検証と構成要素の最適化などを図った。ESPモデルにおいては、パルスパワーにより発生するパルスストリーマに対する粒子挙動をシミュレーション解析し、空間電荷密度分布などから集塵プロセスを明らかにし、集塵に適する印加電圧パラメータを抽出した。そして、PMの可視化による粒子画像流速測定法(PIV)解析により、最適なパルス電圧波形や繰り返し周波数などの検討を行った。また、パルスストリーマ放電の基礎特性として、ESPユニット内の放電開始電圧やスパーク電圧に対する処理ガス温度の影響について検討した。これらの結果をもとに、パルスパワーを用いたESPシステムを構築し、ガス温度に対するPM集塵特性試験を行い、ESP性能の評価を行った。

なお、プラズマ・触媒ユニットにおいて、触媒に対するプラズマアシスト効果の確認と有効性を検証し、処理システム全体におけるNO<sub>x</sub>の除去特性を検討する予定であった。しかしながら、COVID-19の影響により触媒の調達などが困難となり、プラズマ・触媒ユニットの研究は遅延した。そのため、本研究はESPユニットの構築に注力することとした。

## 4. 研究成果

船用ディーゼルエンジン排ガスに関して、高温湿度雰囲気下において高性能な浄化処理システム構築のため、パルスパワーを用いたESPシステムの研究開発を行った。主な内容は、パルスストリーマ放電の基礎特性として、ESPモデルにおいてパルスパワーによる集塵プロセスのシミュレーション解析、そしてESPモデル内の粒子可視化として、PIV解析を行った。また、実用ESPユニットにおいて、放電開始電圧やスパーク電圧に対する処理ガス温度の影響について検討した。さらに、実用ESPユニットの最適稼働条件を決定し、ディーゼルエンジン排ガスにおける高温集塵性能の向上を確認した。

集塵プロセスのシミュレーション解析においては、パルス放電時の電界分布や、空間電荷密度分布、イオン風を計算し、ESP内の粒子挙動解析を行った。図1に立上り時間1 $\mu$ s、ピーク電圧20kV印加時の針電極近傍の空間電荷密度分布を示す。1パルスでは針先に高密度の空間電荷が形成されるが、針先から離れると空間電荷の形成は見られない。しかしなが

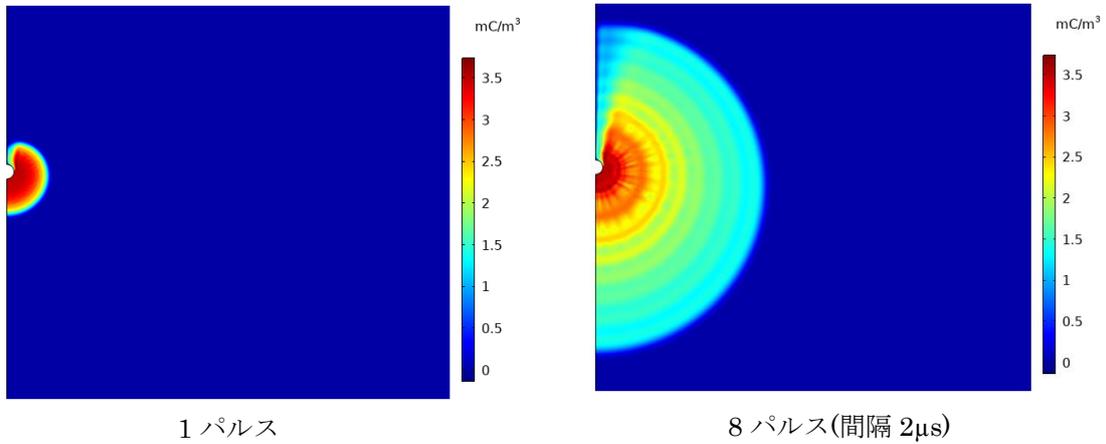


図1 空間電荷密度分布 (立上り時間 1 $\mu$ s, 20kV)

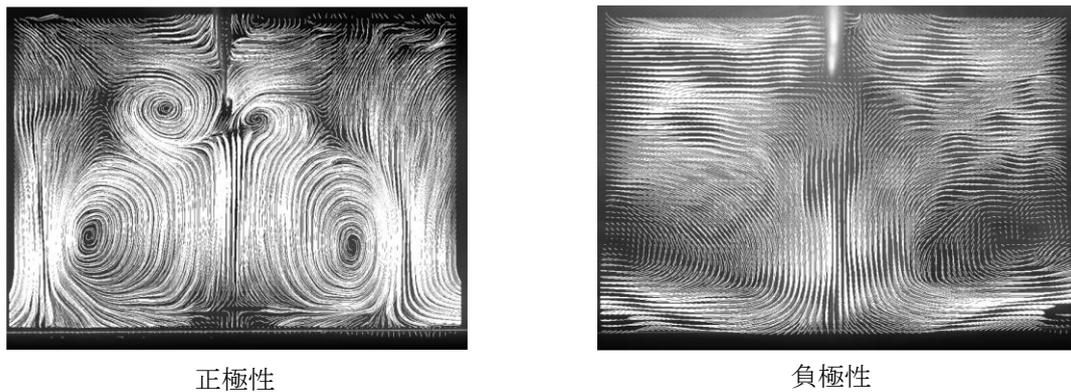


図2 流線による粒子挙動

ら、間隔 2 $\mu$ s で 8 パルスほど繰り返し印加すると、空間電荷が拡散することが認められる。このように、繰り返しパルス電圧を印加することで、空間の平均空間電荷密度は段階的に上昇し、針近傍での空間電荷密度は立ち上がり時間に依存することが示された。そして、パルス放電を用いることにより、瞬間的に高い電界を得ることができ、イオンが拡散され粒子を効率よく帯電させられることが期待できた。

ESP モデル内の粒子可視化として PIV 解析を行い、ピーク電圧 28kV 印加時の流線画像を図 2 に示す。粒子が動き始めてから 100ms の画像である。正極性放電では負極性に比べストリーマの伸展が顕著にみられ、針先付近や下部に渦ができ、時間経過とともに接地平板付近の渦が針方向に上昇する。また、印加電圧が増加すると渦の移動速度も増加している。パルス放電では、ストリーマの伸びと粒子挙動には大きな関係があり、針先端でのみストリーマが伸びている時は針から平板方向に向かう挙動、平板付近までストリーマが伸びている時は平板から針方向に向かう挙動になる。また、正極性、負極性ともにパルス周波数の増加により、粒子移動速度や粒子移動角度に及ぼすイオン風の影響が大きくなった。粒子をパルス放電により発生したイオンなどで荷電させることを考えると、粒子挙動に影響が大きい正極性の方が、荷電効率が高いことが考えられた。

実用 ESP ユニットにおける、放電開始電圧やスパーク電圧に対する処理ガス温度の影響について図 3 に示す。直流放電では負極性電圧を印加し、各温度においてコロナ放電開始からスパークオーバ直前までの値をプロットしている。温度が上昇するにつれて、V-I 特性は左にシフトし、スパークオーバ電圧は低下し放電開始電圧も小さくなる傾向が示された。一方、立上り時間 30ns の負極性パルス放電のピーク電流は、どの温度においても数 A のピーク電流が流れ、スパークオーバはしていない。ピーク電流はスパークオーバに影響する値

であるが、温度上昇によりそれほど影響を受けず、直流コロナ放電と比べると、パルスコロナ放電開始電圧にも、大きな変化は見られなかった。また、パルス電圧の立上がり時間が長い場合、放電時間が長く放電エネルギーが高い。そのため、放電により生成したイオンを拡散する時間も長く、処理粒子のイオンによる帯電効率の向上が期待できる。したがって、パルス電圧の立上がり時間が長い方が、ディーゼルエンジン排ガス中の PM 粒子を、電気集塵するのに適すると考えられる。

実用 ESP ユニットにおいて、処理ガス温度 300°Cにおける集塵性能を図 4 に示す。この結果では、重油を燃料としたディーゼルエンジン排ガスにおいて、正極性パルス放電を用いている。パルス繰り返し周波数特性では、繰り返し周波数を大きくするほど、単位時間に通過する粒子の帯電効率が上昇し、集塵効率は向上した。立上がり時間が 30 ns より 80 ns のパルス放電の方が課電時間は長く、高い集塵率が得られた。また、ガス流量特性では、処理流量が遅くなると荷電効率が高くなり集塵率は向上した。さらに、処理ガス温度を低下させると集塵率は向上し、パルス印加電圧の上昇とともに集塵効率も向上する知見が得られている。

このように、実用 ESP ユニットの稼働条件を適正にすることで、80%以上の集塵効率を得ることができた。以上のことから、本研究によりパルスパワーを用いた ESP ユニットの高温集塵性能の有効性が確認され、船用ディーゼルエンジン排ガスを対象とした、高性能な浄化処理システムを構築する成果が得られた。

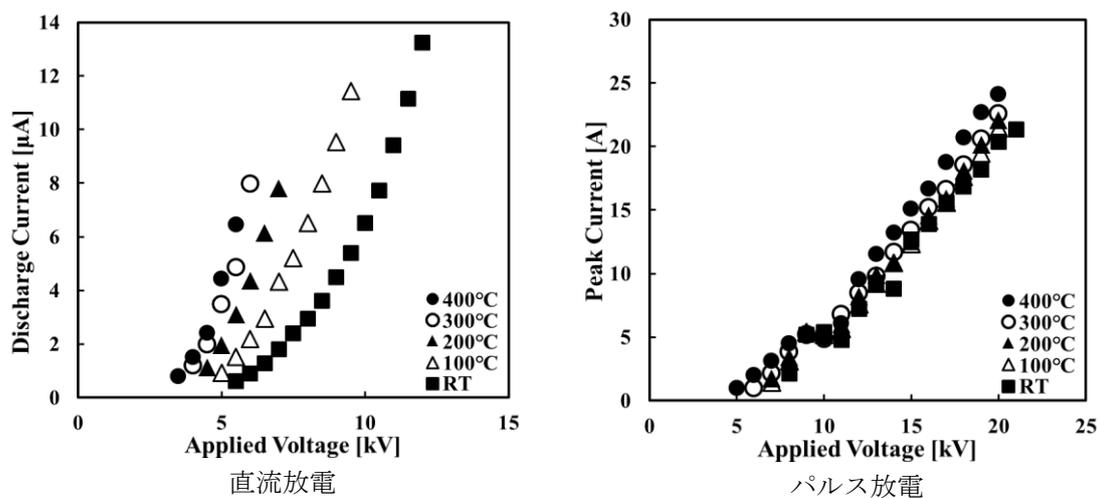


図 3 放電電流に対する温度の影響

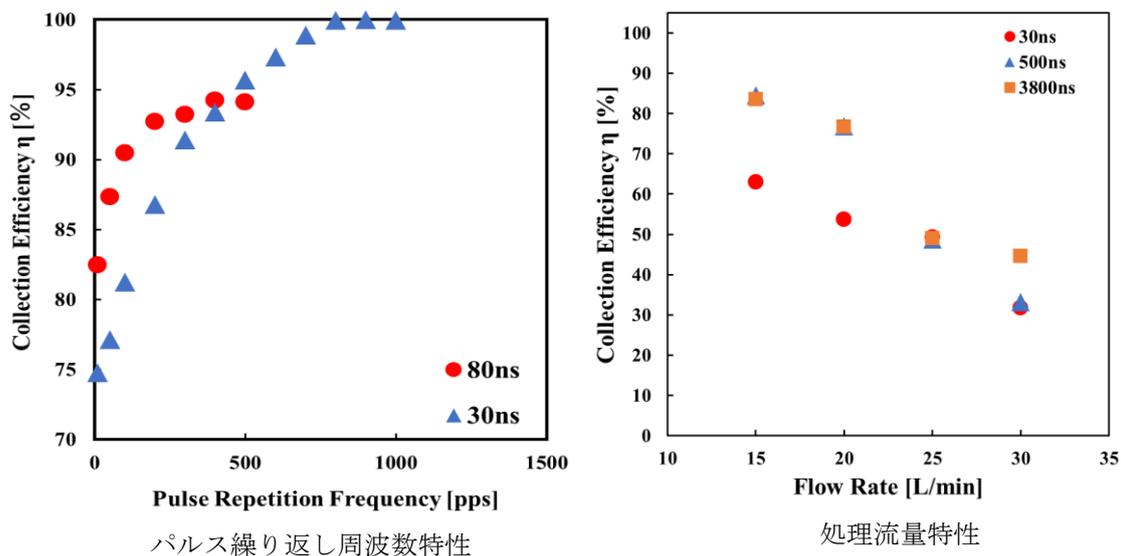


図 4 パルス ESP の集塵特性

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 Juandon Yuan, Kouta Suzuki, Yoshiyasu Ehara, Jun Ikeda, Keisuke Yamashiro, Tetsumi Takano	4. 巻 58
2. 論文標題 Corona Discharge Characteristics in Electrostatic Precipitator under High Temperature	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transaction on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 2436-2443
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIA.2021.3134596	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26件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 ZhenDong Yuan, Atsuki Fujii, Yoshiyasu Ehara, Takashi Inui
2. 発表標題 Velocity Analysis of Re-entrainment Particle in Electrostatic Precipitator
3. 学会等名 International Workshop on Environmental Engineering 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiyasu Ehara, Masaya Shimoda, Hitomi Kawakami, Takashi Inui
2. 発表標題 Simulation of Gas Flow and Particle Behavior on Hole-Type Electrostatic Precipitator
3. 学会等名 European Aerosol Conference（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitomi Kawakami, Takashi Inui, Risa Osuda, Yoshiyasu Ehara
2. 発表標題 Removal Diesel Exhaust Particulate using Plasma Assisted Catalysis
3. 学会等名 European Aerosol Conference（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ZhenDong Yuan, Atsuki Fujii, Kota Yanagawa, Yoshiyasu Ehara, Takayuki Kaneko
2. 発表標題 Visualization and Behavior Analysis of Re-entrainment Particle in Electrostatic Precipitator
3. 学会等名 2019 Annual Meeting - IEEE Industry Applications Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日比野晃久, 江原由泰
2. 発表標題 高温下におけるパルス放電の放電電流特性
3. 学会等名 令和2年 電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 袁振東, 江原由泰
2. 発表標題 単一パルス放電を用いた電気集塵装置内の粒子挙動解析
3. 学会等名 令和2年 電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉山諒, 江原由泰
2. 発表標題 パルス放電を用いた電気集塵装置内のシミュレーション解析
3. 学会等名 令和2年 電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉野明梨・江原由泰
2. 発表標題 コロナ放電状態における針電極構成の影響
3. 学会等名 令和2年 電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大久保旬, 袁振東, 江原由泰
2. 発表標題 パルス放電型の電気集塵装置内の粒子速度解析
3. 学会等名 令和2年 電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 ZhenDong Yuan, Yoshiyasu Ehara
2. 発表標題 Analysis of Particles Behavior in Electrostatic Precipitator with One Pulse Discharge
3. 学会等名 European Aerosol Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shun Okubo, ZhenDong Yuan, Yoshiyasu Ehara
2. 発表標題 Analysis of Particle Velocity in Electrostatic Precipitator using Pulse Discharge
3. 学会等名 European Aerosol Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryo Sugiyama, ZhenDong Yuan, Yoshiyasu Ehara
2. 発表標題 Simulation Analysis in Electrostatic Precipitator using Pulse Discharge
3. 学会等名 European Aerosol Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akihisa Hibino, ZhenDong Yuan, Yoshiyasu Ehara
2. 発表標題 Discharge Current Characteristics of Pulse Discharge in High Temperature
3. 学会等名 European Aerosol Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 ZhenDong Yuan, Kouta Suzuki, Yoshiyasu Ehara, Jun Ikeda, Keisuke Yamashiro, Tetsumi Takano
2. 発表標題 Corona Discharge Characteristics in Electrostatic Precipitator under High Temperature
3. 学会等名 Annual Meeting - IEEE Industry Applications Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 袁振東, 鈴木洸太, 江原由泰, 池田洵, 山城啓輔, 高野哲美
2. 発表標題 高温排ガス処理における電気集塵装置のコロナ放電特性の研究
3. 学会等名 第90回日本マリンエンジニアリング学会 学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大久保旬, 袁振東, 江原由泰
2. 発表標題 パルスパワー電気集塵装置内の粒子速度解析
3. 学会等名 第90回日本マリンエンジニアリング学会 学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉山諒, 江原由泰
2. 発表標題 パルス放電を用いた電気集塵装置における粒子の挙動解析
3. 学会等名 2021年 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大久保旬, 江原由泰, 山城啓輔, 佐久間義弘, 金子貴之
2. 発表標題 正パルス放電における電気集塵装置内の粒子挙動解析
3. 学会等名 2021年 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 日比野晃久, 江原由泰
2. 発表標題 高温条件におけるパルス放電の電流特性
3. 学会等名 2021年 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 袁振東, 南雲 幹太, 江原由泰, 山城啓輔, 佐久間義弘, 金子貴之
2. 発表標題 パルス放電を用いた電気集塵装置の高温集塵特性
3. 学会等名 2021年 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ZhenDong Yuan, Kanta Nagumo, Yoshiyasu Ehara, Keisuke Yamashiro, Sakuma Yoshihiro, Takayuki Kaneko
2. 発表標題 Development of Pulse Discharge type Electrostatic Precipitator under High Temperature
3. 学会等名 European Aerosol Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 袁振東, 南雲幹太, 江原由泰
2. 発表標題 パルス型電気集じん装置の集じん特性に及ぼす電圧波形の影響
3. 学会等名 電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 袁振東, 南雲幹太, 日比野晃久, 江原由泰
2. 発表標題 パルス放電における温度の影響に関する研究
3. 学会等名 静電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 袁振東, 南雲幹太, 江原由泰, 山城啓輔, 佐久間義弘, 金子貴之
2. 発表標題 ディーゼルエンジン排ガス処理におけるパルス放電型電気集塵装置の研究
3. 学会等名 第91回 マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 袁振東, 南雲幹太, 江原由泰
2. 発表標題 ディーゼル排ガス浄化におけるパルス放電荷電の高温集じん特性
3. 学会等名 電気学会 誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧 合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 袁振東, 南雲幹太, 岩尾徹, 江原由泰
2. 発表標題 高温ディーゼル排ガス処理におけるパルス放電型電気集じん装置の開発
3. 学会等名 2022年 電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担者	瑞慶覧 章朝  (Zukeran Akinori)  (00601072)	神奈川工科大学・工学部・教授    (32714)	

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
---------	---------