

令和元年6月19日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04606

研究課題名(和文) 船用ディーゼル排ガス中のNOx・PM革新的同時処理技術

研究課題名(英文) Novel Technology of NOx and PM Removal in Marine diesel Exhaust

研究代表者

江原 由泰 (EHARA, Yoshiyasu)

東京都市大学・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) 10,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では船用ディーゼルエンジンの排ガス処理技術として、高濃度な微粒子(PM)と窒素酸化物(NOx)を高効率に除去することを目的とした。PMを捕集する際には、再飛散を抑制するホール型電気集塵装置(ESP)を独自に開発し、さらにPMとNOxをプラズマ・触媒により同時に除去するシステムを開発した。ホール型ESPにおける粒子挙動シミュレーションやPIV解析などからESPの最適化を行い、実排ガスにより性能評価を行った。また、バリア放電と触媒を併用し、捕集したPMを低温でも燃焼効率の高いPM除去装置の開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

独自に開発したホール型ESPにより、一度捕集した粒子を飛散させてしまう再飛散現象を抑制し、高集塵率を維持することが可能となる。従来の集塵システムには洗浄工程が必要不可欠であるが、PMを捕集すると同時にプラズマと触媒によって連続的に酸化処理するため、安全かつセルフクリーンなシステムとなる。プラズマと酸化触媒の重畳効果が期待でき、オゾンや活性酸素原子により300℃以上必要であった触媒活性温度が排ガス温度以下の150℃程度となり、低温酸化処理が実現できる。以上のことより、尿素フリーな革新的で超経済的なNOx・PM同時処理システムの構築が実現する。

研究成果の概要(英文)：This research has been developed to remove highly concentrated particulates (PM) and nitrogen oxides (NOx) with high efficiency as exhaust gas treatment technology for marine diesel engines. When collecting PM, we developed a Hole-type electrostatic precipitator (ESP) to minimize re-entrainment, and developed a system that simultaneously removes PM and NOx with plasma and catalyst. The ESP was optimized from particle behavior simulation and PIV analysis etc. in the hole type ESP, and the performance was evaluated by the actual exhaust gas. In addition, we developed a PM removal device with high combustion efficiency even at low temperatures using plasma assisted catalyst.

研究分野：2プラズマ応用工学

キーワード：ディーゼルエンジン 排ガス 窒素酸化物 微小粒子 電気集塵 プラズマ バリア放電 触媒

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

船用ディーゼルエンジンの燃料は重油であり、排ガス中には大気汚染物質である NO_x や SO_x, PM などが含まれている。各有害物質の処理装置は研究開発されているが、実用プロセスに適応した運転条件、コスト等の未解決問題が多く残っている。国際海事機関 (IMO) では、船舶からの排ガスに含まれる NO_x, SO_x, PM の排出量を規制するため、MARPOL73/78 条約付属書 を採択し、2005 年 5 月に発効した。排出削減は段階的導入が規定されており、NO_x については第 66 回海洋環境保護委員会 (MEPC66) において、1 次規制に対して 80%削減する第 3 次規制に 2016 年 1 月から移行することを決定した。この規制は既に指定されている北米及び米国カリブ海の排出規制海域 (Emission Control Areas) に対し適応される。

PM の排出量は燃料中の硫黄分に大きく依存するため、SO_x と同じ燃料中の硫黄分濃度で規制されており、3 次規制では 2020 年までに硫黄分濃度を現状の 3.5% から 0.5% まで削減するか、燃料変更と同等の排ガス浄化装置を設置しなければならない。しかしながら、規制に適合する燃料油が十分に供給されない懸念もあり、また燃料油から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。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。また、北極域を航行する船舶から排出される黒煙 (ブラックカーボン) は、雪氷面に沈着し、雪氷の融解を促進し気候変動を引き起こすと指摘されている。黒煙は PM の一部であり、不完全燃焼過程で大気中に直接放出される 1 次エアロゾルと考えられている。この黒煙除去のためにも、PM 除去装置の開発が切望されている。

船用ディーゼル排ガス中の NO_x 処理技術としてアンモニアや尿素と触媒を用いる脱硝装置の SCR (Selective Catalytic Reduction) が進められている。しかしながら、触媒活性には排ガス温度が 250 以上を必要とするが、大型船舶機関の排ガス温度は低く十分な触媒活性が得られない場合がある。また、燃料分中の硫黄分による触媒被毒やアンモニアリークが懸念されること、還元剤分解時に地球温暖化の原因となる CO₂ が発生するなどの問題がある。そのため、SCR に代わる NO_x 処理技術の開発が重要となっている。

2. 研究の目的

本研究では、船用ディーゼル排ガス中の NO_x・PM 浄化処理として、PM を ESP により集塵し、捕集した PM をプラズマと酸化触媒を併用して酸化燃焼する。触媒にプラズマを照射することにより、触媒が低温活性し高い燃焼効率が得られ、さらに NO_x の触媒還元により、NO_x・PM を同時処理するシステムの開発を行う。PM の再飛散抑制には新規に開発したホール型 ESP を採用して PM 濃度の低減を図り、独自に開発したりアクタにより NO を NO₂ へ酸化させ、吸着後に触媒還元処理し、尿素フリーな革新的で超経済的な NO_x・PM 同時処理システムを構築し実用化を図る。

3. 研究の方法

本研究では、船舶排ガス中の大容量・高濃度 NO_x・PM 処理として、プラズマと酸化触媒により PM を燃焼させ、新規に集塵率が高いホール型 ESP を採用し、長時間で高効率に稼働可能な ESP システムを開発する。ホール型 ESP の集塵プロセスを検討し、PM の集塵効率の向上を目指す。集塵プロセスの 3 次元シミュレーションを行い、高風速処理に対応する放電ギャップ長やホール径、開口率などの構造パラメータを抽出する。また、PM に及ぼすガス流やイオン風、クーロン力の影響を、粒子挙動の可視化による粒子画像流速

測定法(PIV 解析)により解析し,最適な印加電圧や電極間隔,電流密度などの解析を行う。抽出した構造パラメータによりホール型 ESP を構築し,実排ガスを用いて最適化を図る。プラズマと酸化触媒においては,パッキドベッド法により触媒を誘電体バリア放電リアクタに充填し触媒にプラズマを照射して,温度などの最適パラメータを抽出する。また,プラズマと酸化触媒による,PM および NOx 除去における電力特性を検討し,システム構成の最適条件を検討する。

4. 研究成果

本研究では再飛散現象を抑制する方法として,ホール型 ESP を開発した。ホール型 ESP とは,集塵電極にホールを設けた ESP のことである。粒子はコロナ放電により生じるイオン風の影響を受け,ホール内に誘導される。このとき,電界がゼロの捕集空間に粒子を誘導することで,再飛散現象の抑制が期待できる。ホール型 ESP の性能向上を目指し,ホール型 ESP 内のシミュレーション解析,ESP 内の再飛散粒子解析,ホール型 ESP の集塵特性,集塵粒子の燃焼装置について実験および検討を行った。

粒子の誘導にはクーロン力とイオン風を用いるため,イオン風の解析に主流体の条件を加えた流体解析を行った。図 1 に各主流体速度における ESP 内の流体分布を示す。電圧印加後 2 秒後の流体分布である。この分布では主流体速度が 0.15 m/s である。主流体速度に比べてイオン風が速いため,ホール電極上に渦が形成されている。また,ホールに流れ込む風速が速いため,ホール内から逆流する流体の流れも速いことが確認できた。

流体解析結果に粒子トレーシングの式を与え,粒子挙動解析を行った。主流体速度は解析開始から設定値に到達するまでに 0.5 秒要する。そのため,電圧印加後 0.5 秒後に粒子を 150 個投入した。図 2 に主流体速度 0.15 m/s における粒子挙動分布を示す。粒子のポイントは 2.0 秒後の地点で,図中の黒線は粒子の 1.5 秒間の軌跡を表している。この条件ではイオン風の影響が支配的なため,粒子が針の前方で渦を描いていることが分かる。ESP 内の流れはイオン風によって層流から乱流へと変化している。そのため,粒子は針電極先端の上方を回る渦流に追従し,ホールに流れ込んだと考えられる。また,粒子はホールのエッジ付近に多く付着した。これは,エッジ効果によりホール付近の電界が強まったため,粒子がより多く付着したと考えられる。このような粒子挙動解析により,ホール内に粒子が流入し捕集される挙動が確認できた。

最適な放電極構成を検討するため,ホール型 ESP の放電極において,ワイヤと針の比較や放電極の増減や方向の最適な位置関係を検討した。実排ガスによる実験結果から,針電極の方がワイヤ電極に比べ集塵率が若干高くなることが判明した。放電極の数では最適値があり,放電極が多くなりすぎると集塵率が低下した。針電極の方向を集塵電極に対して,水平な向きと垂直な向きで比較を行ったところ,水平な向きの場合に集塵率が向上した。また,最適な電極構成において長時間の集塵試験を行ったところ,再飛散現象を大幅に抑制し,非常に高い集塵率を維持することができた。

プラズマと酸化触媒による,PM および NOx 除去において,触媒の活性温度に対す

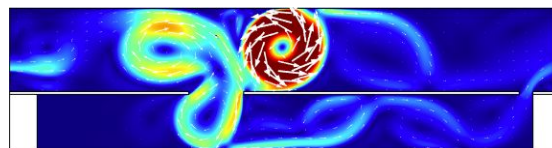


図 1 ESP 内の流体分布



図 2 ESP 内の粒子挙動

るプラズマの効果を確認した。図3にプラズマアシスト触媒によるPM燃焼の温度特性を示した。図中には触媒のPM燃焼量(Ca)とプラズマのPM燃焼量(GB+plasma), 触媒にプラズマを照射したときのPM燃焼量(Ca+plasma)の3種類を示している。触媒, プラズマの有無によらず, 200 からPMの燃焼が確認でき, 温度の上昇とともにPM燃焼量も増加した。また, プラズマアシスト触媒の効果が顕著であり, 本システムにより触媒単独に比べ, より低温でPM燃焼が可能であることが確認された。

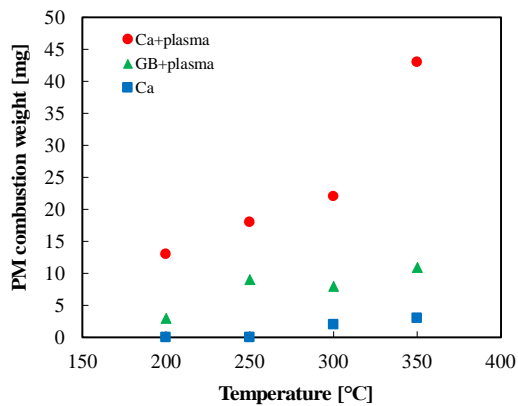


図3 プラズマアシスト触媒によるPM燃焼

PM燃焼時における, プラズマアシスト触媒リアクタからのCOおよびCO₂排出量を計測した。その結果, CO, CO₂ともPM燃焼時に増加した。PM除去量とCOおよびCO₂の排出量はおおよそ等しく, PMは酸化燃焼しCOおよびCO₂に変化していることが確認された。また, NO_xの測定を行った結果, PMの燃焼にNO₂が消費されていることが確認された。

上述のことより, 本研究で開発したシステムは, 船舶排ガス中の大容量・高濃度NO_x・PM処理として有効であり, 実用性が高いことが示唆された。また, 以上の成果は学術雑誌に9編の論文を掲載し, 38件の学会発表を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9件)

宮下皓高, 江原由泰, ホール型電気集塵装置におけるイオン風と粒子挙動の解析, 静電気学会誌, 査読有, Vol.43, No.1 pp31-36 (2019)

宮下皓高, 江原由泰, 鈴木葛平, 乾貴誌, 青木幸男, 西田英幸, 平行平板ホール型電気集塵装置によるディーゼル排ガス中の微粒子除去, マリンエンジニアリング学会誌, 査読有, Vol.53, No.5, pp119-124 (2018)

Hiroataka Miyashita, Yoshiyasu Ehara, Takashi Inui, Yukio Aoki, "Particle Behavior Analysis in a Hole-Type Electrostatic Precipitator Using PIV", IEEE Transaction on Industry Applications. 査読有, Vol.54, No.5, pp4857-4863 (2018) DOI: 10.1109/TIA.2018.2844209

江原由泰, 次世代電気集塵システムと微粒子, 静電気学会誌, 査読有, Vol.42, No.5 pp238-243 (2018)

Hiroataka Miyashita, Yoshiyasu Ehara, Tomohiro, Thunoda, Joe. Enomoto, Takashi Inui, "PIV Analysis of Particle Behavior in Electrostatic Precipitator", Electronics and Communications in Japan, 査読有, Vol. 101, No. 1, pp16-23, 2018

宮下皓高, 江原由泰, 乾貴誌, 青木幸男, ホール型電気集塵装置によるディーゼル排ガス中の微粒子除去, マリンエンジニアリング学会誌, 査読有, Vol.52, No.6, pp788-793 (2017)

宮下皓高, 江原由泰, 榎本譲, 乾貴誌, ホール電極におけるイオン風速度, 静電気学会誌, 査読有, Vol41, No2, pp99-104, (2017)

宮下皓高, 江原由泰, 角田知弘, 榎本譲, 乾貴誌, 電気集塵装置内における粒子挙動のPIV解析, 電気学会論文誌, 査読有, A 136(12), pp797-803 (2016) DOI: 10.1541/ieejfms.136.797

江原由泰, イオン風を利用した電気集じん装置の研究, 静電気学会, 査読有, Vol.40, No.4 pp156-161 (2016)

〔学会発表〕(計 38件)

袁振東, 宮下皓高, 江原由泰, ホール型電気集塵装置における電極構造の検討, 平成31年電気学会全国大会講演論文集, 2019

宮下皓高, 江原由泰, 乾貴誌, 青木幸男, 西田英幸, ホール型電気集塵装置におけるイオン風と粒子挙動の解析, 第42回静電気学会全国大会 2019

宮下皓高, 江原由泰, 乾貴誌, 青木幸男, 西田英幸, 船用電気集じん装置におけるPIV法による再飛散粒子の挙動解析, 第88回日本マリンエンジニアリング学会 学術講演会, 2018

- 鈴木菖平, 大和田葵, 江原由泰, 乾貴誌, 青木幸男, 西田英幸, 船用ディーゼル排ガス浄化のためのホール型電気集じん装置における放電極の検討, 第 88 回日本マリンエンジニアリング学会 学術講演会、2018
- 下田正也, 宮下皓高, 江原由泰, 乾貴誌, 青木幸男, 西田英幸, ホール型電気集じん装置における捕集メカニズムの解析, 第 88 回日本マリンエンジニアリング学会 学術講演会、2018
- 宮下皓高, 江原由泰, 鈴木菖平, 乾貴誌, 青木幸男, 西田英幸, ホール型電気集塵装置における集塵条件の検討, 日本機械学会第 28 回環境工学総合シンポジウム 2018
- 江原由泰, 宮下皓高, 乾貴誌, 青木幸男, 西田英幸, 電気集じん装置における再飛散現象の可視化と PIV 解析, 日本機械学会第 28 回環境工学総合シンポジウム 2018
- H. Miyashita, Y. Ehara, T. Inui, Y. Aoki, H. Nishida, "Behavior Analysis of Re-entrainment Particle in the Electrostatic Precipitator" XV International Conference on electrostatic Precipitation, 2018
- Hitomi Kawakami, Takashi Inui, Hideyuki Nishida, Hirotaka Miyasita, Yoshiyasu Ehara, "Development of Diesel PM Combustion Reactor using Plasma Assisted Catalysis", 10th International Aerosol Conference, 2018
- Yoshiyasu Ehara, Hirotaka Miyasita, Satoshi Kokubu, Hitomi Kawakami, Takashi Inui, Hideyuki Nishida, "Particle Behavior Analysis of Re-entrainment Phenomenon in Electrostatic Precipitator", 10th International Aerosol Conference, 2018
- 宮下皓高, 柳川鴻太, 江原由泰, 乾貴誌, 西田英幸, 電気集じん装置内における再飛散粒子の可視化, 平成 30 年 電気学会全国大会講演論文集, 2018
- 鈴木菖平, 内山美樹, 江原由泰, 乾貴誌, 西田英幸, ホール型電気集じん装置に及ぼす排気ガス温度の影響, 平成 30 年 電気学会全国大会講演論文集, 2018
- 下田正也, 江原由泰, 乾貴誌, 西田英幸, ホール型電気集塵装置内におけるホール流入粒子のシミュレーション, 平成 30 年 電気学会全国大会講演論文集, 2018
- 宮下 皓高, 江原 由泰, 榎本讓, 乾貴誌, 青木幸男, ホール型電気集塵装置における電極構造の研究, 第 87 回日本マリンエンジニアリング学会 学術講演会、2017
- 野崎優介, 岩淵遥司, 江原由泰, 榎本讓, 乾貴誌, 青木幸男, 誘電体バリア放電と触媒による PM 燃焼装置の検討, 第 87 回日本マリンエンジニアリング学会 学術講演会、2017
- 宮下皓高, 江原由泰, 榎本讓, 乾貴誌, 青木幸男, ホール型電気集塵装置における流体と粒子挙動の解析, 日本機械学会第 26 回環境工学総合シンポジウム, 2017
- 宮下皓高, 江原由泰, 乾貴誌, 青木幸男, 粒子挙動シミュレーションによるホール型 ESP の解析, 電気学会基礎・材料共通(A)部門大会, 2017
- Yoshiyasu Ehara, Hirotaka Miyasita, Takashi Inui, Yukio Aoki, "Plasma Assisted Catalysis System for Diesel PM Combustion", Global Conference on Catalysis and Reaction Engineering, (2017)
- H. Miyashita, Y. Ehara, T. Inui, and T. Sawada, "Particle Behavior Analysis in Hole-type Electrostatic Precipitator using PIV", Industry Applications Society Annual Meeting, 2017 IEEE, 2017
- M. Shimoda, Y. Ehara, T. Inui, and T. Sawada, "Simulation analysis of particle behavior in hole type Electrostatic precipitator", European Aerosol Conference, T111N0a9, (2017)
- ②1 H. Miyashita, S. Ibaraki, Y. Ehara, T. Inui, and T. Sawada, "Study of Collection Mechanism on Hole-type Electrostatic Precipitator by Particle Behaviour and Fluid Flow", European Aerosol Conference, (2017)
- ②2 K. Yanagawa, H. Miyashita, Y. Ehara, T. Inui, and T. Sawada, "PIV Analysis of Re-entrainment Phenomenon in the Electrostatic Precipitator", European Aerosol Conference, (2017)
- ②3 Shohei Suzuki1, Shun Yokoyama, Hirotaka Miyashita, Yoshiyasu Ehara, Takashi Inui, Tomoyuki Sawada, "Discharge current characteristic on Hole-type Electrostatic Precipitator", European Aerosol Conference, (2017)
- ②4 H. Kawakami, T. Inui, Y. Nozaki, H. Miyasita, and Y. Ehara, "Diesel PM Combustion using Non-thermal Plasma and Catalyst", European Aerosol Conference, (2017)
- ②5 岩淵遥司, 野崎優介, 宮下皓高, 江原由泰, 乾貴誌, 澤田朋之, 触媒プラズマハイブリッドリアクタによる PM 燃焼の検討, 平成 29 年 電気学会全国大会講演論文集, 2017
- ②6 柳川鴻太, 宮下皓高, 江原由泰, 乾貴誌, 澤田朋之, 電気集じん装置における再飛散現象の PIV 解析, 平成 29 年 電気学会全国大会講演論文集, 2017
- ②7 鈴木菖平, 横山 駿, 宮下皓高, 江原由泰, 乾貴誌, 澤田朋之, ホール型電気集じん装置における放電電流特性, 平成 29 年 電気学会全国大会講演論文集, 2017
- ②8 下田正也, 茨木駿兵, 下田正也, 江原由泰, ホール型電気集塵装置における粒子挙動解析, 平成 29 年 電気学会全国大会講演論文集, 2017
- ②9 柳川鴻太, 宮下皓高, 江原由泰, 榎本讓, 乾貴誌, 青木幸男, 船用ディーゼル排ガス浄化のホール型電気集じん装置における PIV 解析, 第 86 回日本マリンエンジニアリング学会 学術講演会、2016
- ③0 宮下皓高, 横山駿, 江原由泰, 榎本讓, 乾貴誌, 青木幸男, 高濃度 PM 捕集用のホール型電気

集じん装置における電極構成の検討，第 86 回日本マリンエンジニアリング学会 学術講演会、2016

- ③① 宮下皓高，江原由泰，榎本讓，乾貴誌，ホール型電気集じん装置内における集塵過程の研究，日本機械学会第 26 回環境工学総合シンポジウム，2016
- ③② Hiroataka Miyashita, Takahumi kamijou, Yoshiyasu Ehara, Joe Eomoto, Takahashi Inui, Yukio Aoki, “PIV Measurement of Particle Behavior in Hole type Electrostatic Precipitator”, European Aerosol Conference, (2016)
- ③③ Shumpei Ibaraki, Yutaro Amaya, Yoshiyasu Ehara, Joe Enomoto, Takashi Inui and Yukio Aoki, “Simulation analysis of the flow on Hole-type Electrostatic Precipitator”, European Aerosol Conference, (2016)
- ③④ Yusuke Nozaki, Yoshiyasu Ehara, Joe Enomoto, Takashi Inui, Yukio Aoki, “Development of Combustion Device using Catalyst and Dielectric Barrier Discharge”, European Aerosol Conference, (2016)
- ③⑤ Shun Yokoyama, Kouta Yanagawa, Yoshiyasu Ehara, Joe Enomoto, Takashi Inui, and Yukio Aoki, “Influence of Hole Diameter on Hole-type Electrostatic Precipitator”, European Aerosol Conference, (2016)
- ③⑥ Yoshiyasu Ehara, Akinori Zukeran, Hitomi Kawakami, Takashi Inui, Yukio Aoki, “Incineration of Diesel Particulate Matter using Non-Thermal Plasma”, DUST2016 - 2nd International Conference on Atmospheric Dust, (2016)
- ③⑦ Hitomi Kawakami, Takashi Inui Yukio Aoki, Akinori Zukeran, Yoshiyasu Ehara, “Removal of PM Emission from Ship Exhausts using Hole-Type Electrostatic Precipitators”, DUST2016 - 2 nd International Conference on Atmospheric Dust, (2016)
- ③⑧ Akinori Zukeran, Yoshihiro Sakuma, Kota Mayahara, Hitomi Kawakami, Takashi Inui, Yoshiyasu Ehara, “Particle Matter and SOx Removal in an Electrostatic Precipitator for Marine Diesel”, DUST2016 - 2 nd International Conference on Atmospheric Dust, (2016)

〔図書〕(計 1 件)

大久保雅章，江原由泰，他，プラズマ産業応用技術，シーエムシー出版，総頁 321p, 2017 年

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：瑞慶覧章朝

ローマ字氏名：ZUKERAN AKINORI

所属研究機関名：神奈川工科大学

部局名：工学部

職名：教授

研究者番号 (8 桁): 00601072