

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289321

研究課題名(和文) プラズマ・触媒ハイブリッドシステムによる船用ディーゼル排ガスの浄化

研究課題名(英文) Marine Diesel Engine Emission Control by Hybrid System using Plasma and Oxidation Catalyst.

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) 11,300,000円

研究成果の概要(和文)：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)を高効率除去するシステムを開発した。排ガス中のPMは捕集した後、集じん電極より再飛散現象が発生し、集じん率の低下を招く。ホール型ESPはこの再飛散を抑制するために開発した。集じん率の経時変化によりホール開口率の影響や、最適な電極形状を検討した。

DBDリアクタでは、オゾンや酸素ラジカルなどが生成し、より低い温度でPMを連続的に酸化燃焼させる。このDBDと酸化触媒によるハイブリッド処理により、PM燃焼効率が向上することを確認した。また、海水を用いるスクラバーを開発し、海水のアルカリ化により、高効率化を図った。

研究成果の概要(英文)：This research has been developed an after treatment system for removal of diesel PM from the ship exhaust. The system is composed of electrostatic precipitator (ESP) and a dielectric barrier discharge (DBD) reactor. The low resistive PMs are detached from the collection plate caused by induction charge. This phenomenon has been known as particle re-entrainment, resulting in poor collection efficiency. Hole-type ESP was developed to minimize re-entrainment. The influence of hole aperture ratio and the optimum hole diameter was investigated by the time-dependent collection efficiency. In the DBD reactor, the air is activated by discharge and produces ozone and oxygen radical. Therefore, the diesel particulates are oxidized and incinerated under low temperature condition. It confirmed that PM combustor efficiency improved by hybrid system using the DBD and oxidation catalyst. Moreover, scrubbers using sea water was developed and high efficiency was achieved by alkalization of sea water.

研究分野：プラズマ応用工学

キーワード：電気集じん ディーゼル 排ガス プラズマ 触媒

## 1. 研究開始当初の背景

船舶用ディーゼルエンジンの排出ガスには主に粒子状物質(PM)や窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)、硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)などの大気汚染物質が含まれている。船舶からの大気汚染物質の排出規制については、国際海事機関で審議され、2005年5月MARPOL条約付属書が発効され(Tier1)、2011年からの2次規制(Tier2)を経て、2016年からは3次規制(Tier3)としてNO<sub>x</sub>ではTier1比で80%削減が求められている。船舶の始動低温時には大量のPMが発生し、NO<sub>x</sub>の発生はPMとトレードオフの関係にある。したがって、ゼロエミッションを視野に入れた高効率な排ガス処理は、環境保全および省エネルギー化の観点から国際的な緊急課題である。

自動車用ディーゼルエンジンから排出されるPMについては、ディーゼルパーティキュレートフィルター(DPF)が主流である。しかし、船用エンジンからの排ガス量は多くPM濃度が高いため、DPFによるPM捕集はその再生方法(600°C以上の燃焼法、NO<sub>2</sub>や触媒による300°C以上の燃焼法)が非常に高価となり実用的ではない。一方、電気集じん装置(ESP)は他の集じん装置と比べて、圧力損失が小さく運転費用が安価、粒径1μm以下の微粒子に対して集じん率が高いことが利点である。ディーゼルエンジンから排出されるPMは電気抵抗値( $< 10^3 \text{ cm}$ )が低く、PMは電極に捕集されると、誘導荷電により対向する電極からの剥離力や流体、イオン風によるせん断応力が粒子付着力より大きくなり、ガス流の影響により再飛散現象が発生する。したがって、再飛散現象を抑制するESPの開発が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、船用ディーゼル排ガス中の

PM・NO<sub>x</sub>浄化処理として、PMの酸化燃焼結果をベースに、燃焼効率の向上とNO酸化を目的としプラズマと酸化触媒を併用したハイブリッドシステムの開発を行う。再飛散現象を抑制するホール型ESPを開発し、誘電体バリア放電(DBD)により発生するオゾンや活性酸素原子、触媒によりPMを燃焼除去する。

これと同時にNOをNO<sub>2</sub>へ酸化させスクラバー処理する、革新的で超経済的なPM・NO<sub>x</sub>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PM・NO<sub>x</sub>処理システムとして、(1)ディーゼルエンジンから排出されるPMを再飛散抑制し効率よく捕集するホール型ESPの開発(2)捕集したPMの酸化燃焼として、プラズマと酸化触媒を用いたハイブリッドシステムの構築(3)NO<sub>x</sub>スクラバー処理システムを開発する。ホール型ESPではディーゼルエンジン排ガスを用いた試験に加え、イオン風の解析やESP内の流体シミュレーションを行い、ESPの最適化を行う。PMの酸化燃焼試験では、DBDリアクタの印加電圧周波数特性や温度特性、触媒効果などを検討した。NO<sub>x</sub>スクラバー試験では、海水のpHによる影響やアルカリ化による効率向上について検討する。

## 4. 研究成果

(1)ホール型ESPは放電電極、表面に穴を設けたホール電極、および金属製の接地ケースから構成される。粒子は負極性コロナ放電で荷電する。ホール電極開口部では、イオン風および圧力差により帯電空間からケース内へ気流が発生し、帯電した粒子はこの気流によってケース内の捕集空間へ誘導される。ケース内の流速は遅く、ケース側面全てが接地されているため、ケース内は電界がゼロとな

り、捕集した粒子の再飛散が抑制される仕組みである。

ホール型 ESP にディーゼル排ガスを直接流入させ、集じん特性の評価を行った。ホール電極の孔径 1mm の集じん率特性を図 1 に示す。ホール数を変化させ、開口率 22.6%, 35.0%, 40.2% のホール電極を用いた。また、比較のために従来型 ESP としてホールがない接地電極を用いた結果も、同図にプロットした。従来型 ESP の集じん率は 1000nm 以上の大粒径粒子で低下しており、凝集肥大した捕集粒子の再飛散現象が顕著にみられている。一方、ホール型 ESP の 1000nm 以上の大粒径粒子の集じん率は、どの開口率においても 90% を超えており、再飛散の抑制効果が表れている。

二重円筒型 ESP を改良し、平行平板ホール型 ESP とすることで、より再飛散現象を抑制することが確認できた。また、最適な針-ホールとの位置関係を抽出した。イオン風は孔径 20mm、ギャップ長 20mm の時が最も強、集じん率も高くなった。

3次元シミュレーション解析では、ホール径とキャップ長が等しい時、ホール部の電界が最も高くなった。ホール型 ESP における主流体に対するイオン風の影響につて、流体解析した結果を図 2 に示す。(a)は ESP にガスの流入がない条件、(b)は主流体速度 0.15m/s、(c)は主流体速度 0.7m/s の解析結果である。ガス流は左側より流入させており、いずれも電圧印加 1.0s 後の結果である。(a)では放電電極(D.E.)からホールに向かってイオン風が吹き接地電極上で吹き上がり、放電電極左側にカルマン渦ができる。また、ホール内に吹き込んだ風も渦を巻きながら、ホールと右端の小穴を反時計回りに流動する。(b)では放電電極右側にカルマン渦ができ、ホール内に流れるガス流が発生する。(c)ではイオン風に対して主流体速度が非常に速いため、ホールに流入する流れは少ない。

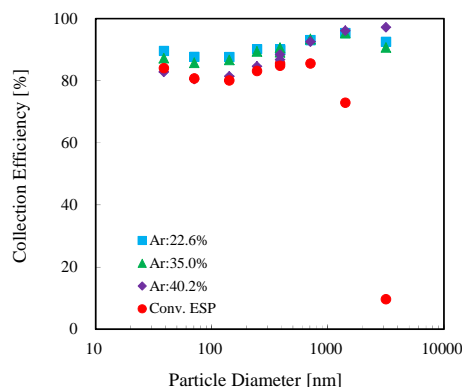
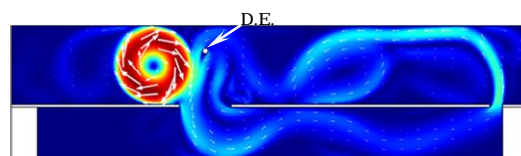
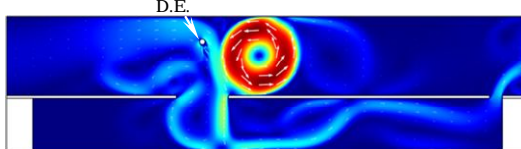


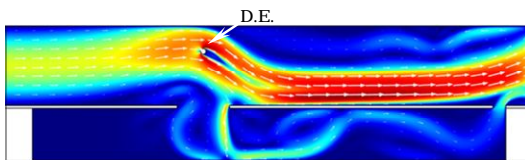
図 1 ホール型 ESP の集じん率の粒径特性



(a) 主流体速度 0m/s



(b) 主流体速度 0.15m/s



(c) 主流体速度 0.7m/s

図 2 ESP 内の流体解析 (t=1.0s)

これ以外にも主流体速度をいくつか変えて解析した結果、このサイズのモデルにおいては、0.15m/s 程度のガス流を用いるとホール内に粒子を誘導することが確認できた。

(2) PM の酸化燃焼用 DBD リアクタの基礎特性として、PM 燃焼の注入電力特性および課電周波数、処理温度の影響について検討を行った。その結果、DBD リアクタでは、印加電圧の周波数を 3kHz 以上にすると集じん率が低下した。そして、処理ガス温度が高くなるほど PM 燃焼量が多くなった。また、DBD と酸化触媒によるハイブリッド処理により、PM 燃焼効率が向上することを確認した。

(3) 海水を用いたスクラバーの試験結果によ

り、電界処理により海水のアルカリ化が可能となり、スクラバーの高効率化が図られた。また、電界処理により海水の pH が上昇し、排ガス中 SO<sub>x</sub> の低減性能向上が図られた。さらに、スクラバーの性能向上のため、電気分解による海水の pH 上昇とアルカリ度増加に関して、海水成分の影響を検討した。

以上の成果は学術雑誌に掲載し、学会発表を行った。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 15 件)

乾貴誌, 瑞慶覧章朝, 浅川大輔, 豊角浩之, 澤井淳, 當山広幸, 中田栄寿, 江原由泰「電気分解による海水のアルカリ上昇に及ぼす海水成分の影響」環境技術 44(2), 2015, pp105-112,

江原由泰「ディーゼル排ガス粒子の電気集塵技術(特集 混相流に見るフルードパワー)」油空圧技術 54(13), pp2015-12, 11-15

乾貴誌, 浅川大輔, 豊角浩之, 瑞慶覧章朝, 澤井淳, 當山広幸, 中田栄寿, 江原由泰「海水のアルカリ化に対するマグネシウム電極を用いた電解工程の省電力化」マリンエンジニアリング学会誌, Vol.50, No.1, 2015, pp113-118

佐久間義弘, 川上竜太, 瑞慶覧章朝, 江原由泰, 乾貴誌「熱交換器と電気集塵を用いたディーゼル排ガス中の SO<sub>2</sub> と粒子の除去」マリンエンジニアリング学会誌, Vol.49, No.4, 2014, pp533-538

Y. Ehara, A. Osako, A. Zukeran, K. Kawakami, T. Inui, "Diesel PM collection for marine emission using hole-type electrostatic precipitators", WIT Transactions on Ecology and the Environment, Air Pollution XXII, 183. 2014, pp145-155

A. Zukeran, Y. Sakuma, R. Yamagami, Y. Kawada, H. Kawakami, K. Yasumoto, T. Inui, Y. Ehara, "The effects of gas cooling on removal of

SOF and sulphate by electrostatic precipitator for marine diesel", WIT Transactions on Ecology and the Environment, Air Pollution XXII, 183. 2014, pp165-176

H. Kawakami, T. Inui, T. Sato, Y. Ehara, A. Zukeran, "Investigation of electrode arrangement on ionic wind velocity for hole-type electrostatic precipitator", WIT Transactions on Ecology and the Environment, Air Pollution XXII, 183. 2014, pp177-187

T. Yamamoto, S. Asada, Y. Ehara, "Integrated Diesel Engine Emission Control using Plasma-Combined Hybrid System", IEEE Transaction on Industry Applications. Vol.49, No.6, 2013, pp2414 -2420

T. Yamamoto, S. Maeda, Y. Ehara, and Hitomi Kawakami, "Development of EHD-Assisted Plasma Electrostatic Precipitator", IEEE Transaction on Industry Applications. Vol.49, No.2, 2013, pp672-678

H. Kawakami, T. Sakurai, Y. Ehara, T. Yamamoto, A. Zukeran, "Performance characteristics between horizontally and vertically oriented electrodes EHD ESP for collection of low-resistive diesel particulates", Journal of Electrostatics, Vol.71, No6, 2013, pp1117-1123

江原由泰「ディーゼル排ガス粒子の電気集塵技術」混相流, Vol.27, No3, 2013, pp242-249

江原由泰「非熱平衡プラズマを用いたディーゼル排ガス粒子の除去特性」Journal of the JIME, Vol48, No.4, 2013, pp105-110

瑞慶覧章朝, 乾貴誌, 川上一美, 江原由泰「船舶用電気集塵装置における再飛散抑制と帯電粒子の挙動の 3 次元シミュレーション」マリンエンジニアリング学会誌, Vol.48, No.4, 2013, pp99-104

川上一美, 瑞慶覧章朝, 安本浩二, 江原由泰, 山本俊昭「CO のバリア放電酸化における水分と O<sub>2</sub> の影響」電気学会論文誌 Vol.

133-A, No12, 2013, pp642-647

T Yamamoto, S Maeda, Y. Ehara, A. Zukeran and H Kawakami, “EHD-assisted plasma electrostatic precipitator for simultaneous PM collection and incineration” Journal of Physics: Conference Series Volume 418, 2013, pp1-10

〔学会発表〕(計 26 件)

Y. Ehara, M. Ohashi, A. Zukeran, K.Kawakami, T. Inui, Y. Aoki, “Development of Hole-type Electrostatic Precipitator”, International Symposium on New Plasma and Electrical Discharge Applications and on Dielectric Materials 2015. 10. 26, Reunion (France)

H. Kawakami, Y. Kobayashi, A. H. Toyozumi, A. Zukeran, H. Toyama, T. Inui, Y. Ehara, ”Alkalizing Seawater by Corona Discharge for Wet Scrubber”, International Symposium on New Plasma and Electrical Discharge Applications and on Dielectric Materials 2015. 10. 26, Reunion (France)

A. Zukeran, H. Kawakami, Y. Ehara, ”Humidification Effect on Inactivation of Staphylococcus aureus in an electrostatic precipitator”, International Symposium on New Plasma and Electrical Discharge Applications and on Dielectric Materials 2015. 10. 26, Reunion (France)

H. Miyashita, S. Tou, Y. Ehara, T. Inui, and Y. Aoki, “Analysis of particle behavior in hole-type electrostatic precipitator”, European Aerosol Conference, 2015. 10. 26, Milan (Italy)

H. Iwabuchi, Y. Ehara, Y. Oishi, T. Inui, and Y. Aoki, “Development of dielectric barrier discharge electrostatic precipitator”, European Aerosol Conference, 2015. 10. 26, Milan (Italy)

H. Toyozumi, Y. Okuyama, A. Zukeran, T. Inui, H. Toyama, and Y. Ehara, “Conversion efficiency for alkalizing seawater in Mg-air electrode”, European Aerosol Conference, 2015. 10. 26,

Milan(Italy)

S. Yoshihiro, A. Zukeran, Y. Kawada, and Y. Ehara, “Generation of nano-particles by ion-induced nucleation using plasma processing in diesel exhaust gas”, European Aerosol Conference, 2015. 10. 26, Milan (Italy)

江原由泰, 宮下皓高, 乾貴誌, 青木幸男「ホール型電気集じん装置内におけるイオン風と粒子挙動の PIV 解析」日本機械学会第 25 回環境工学総合シンポジウム 2015.7.9, 産業技術研究所 (東京)

鳥居威仁, 高橋司, 江原由泰, 大石裕次郎, 乾貴誌, 青木幸男「バリア放電型電気集じん装置によるディーゼル排ガス中の PM 除去特性」第 84 回マリンエンジニアリング学術講演会, 2014.11.19, 海峡メッセ (山口)

大橋雅弘, 横山駿, 江原由泰, 大石裕次郎, 乾貴誌, 青木幸男「ホール型電気集じん装置を用いたディーゼル排ガス中の PM の捕集」第 84 回マリンエンジニアリング学術講演会, 2014.11.19, 海峡メッセ (山口)

佐久間義弘, 渡辺陽太, 佐々木康修, 瑞慶覧 章朝, 江原由泰, 乾貴誌「電気集塵装置におけるディーゼル排ガス中の硫酸塩と SOF の除去性能の向上」第 84 回マリンエンジニアリング学術講演会, 2014.11.19, 海峡メッセ (山口)

江原由泰, 宮下皓高, 角田知弘, 乾貴誌, 川上一美「電気集じん装置内におけるイオン風と粒子挙動の PIV 解析」日本機械学会第 23 回環境工学総合シンポジウム 2014.11.18, つくば国際会議場 (茨木)

D. Hiroki, T. Satou, Y. Ehara, “Effects of ionic wind and collection efficiency on hole type electrostatic precipitator”, International Aerosol Conference 2014.8.28, Busan (Korea)

廣木大輔, 佐藤毅, 江原由泰「ホール型 ESP での集じん率に対するイオン風の影響」2014 年度 静電気学会春季講演会, 2014.3.5, 東京工業大学 (東京)

H. Murata, T. Sato, Y. Ehara, “Analysis of Ionic Wind on Hole Type Electrostatic Precipitator”, Asa-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology, 2013. 12.20, Hsinchu (台湾)

M. Ohashi, A. Kodama, Y. Ehara, T. Inui, Y. Oishi, “Collection of Diesel Particulate Matter on Hole Type Electrostatic Precipitator “, Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology, 2013. 12.20, Hsinchu (台湾)

T. Torii, M. Shikata, Y. Ehara, T. Inui, Y. Oishi, “Incineration of the diesel particulate matter using the dielectric barrier discharge on the electrostatic precipitator“, Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology, 2013. 12.20, Hsinchu (台湾)

江原由泰, 鳥居威仁, 瑞慶覧章朝, 大石裕次郎, 乾貴誌「バリア放電型電気集じん装置によるディーゼル微粒子の燃焼」第 83 回マリンエンジニアリング学術講演会, 2013.9.2, グランシップ静岡 (静岡)

佐久間義弘, 瑞慶覧章朝, 山上竜太, 江原由泰, 乾貴誌「水分凝縮による船舶排ガス中の SO<sub>2</sub> の低減」第 83 回マリンエンジニアリング学術講演会, 2013.9.2, グランシップ静岡 (静岡)

Y. Ehara, M. Kobayashi, H. Muramatsu, A. Zukeran, H. Kawakami, T. Inui, “Incineration of the diesel particulate matter using the dielectric barrier discharge on the electrostatic precipitator”, European Aerosol Conference, 2013.9.1, Prague (Czech)

⑳H.Kawakami, A.Osako, Y.Watanabe, Y.Ehara, Y.Nitta, A.Zukeran, T.Inui, “Effect of aperture rate on improving collection efficiency in hole-type electrostatic precipitator”, European Aerosol Conference, 2013.9.1, Prague (Czech)

㉑A.Zukeran, K.Ninomiya, Y.Ehara, K.Yasumoto,

H.Kawakami, T.Inui, “SO<sub>2</sub> Reduction by water condensation for marine diesel”, European Aerosol Conference, 2013.9.1, Prague (Czech)

㉒Y. Ehara, M. Kobayashi, H. Muramatsu, A. Zukeran, H. Kawakami, T. Inui, “Diesel PM Incineration for Marine Emissions Using Dielectric Barrier Discharge Type Electrostatic Precipitator”, ESA Annual Meeting on Electrostatics, 2013.7.11, Cocoa Beach (USA)

㉓A. Zukeran, K. Ninomiya, Y. Ehara, K. Yasumoto, H. Kawakami, T. Inui, “SO<sub>x</sub> and PM Removal using Electrostatic Precipitator with Heat Exchanger for Marine Diesel”, 2013.7.11, Cocoa Beach (USA)

㉔江原由泰, 佐藤毅, 瑞慶覧章朝, 乾貴誌, 川上一美「ホール型電気集じん装置におけるイオン風の影響」日本機械学会第 23 回環境工学総合シンポジウム 2013.7.10, 東京海洋大 (東京)

㉕瑞慶覧章朝, 二宮和哉, 江原由泰, 乾貴誌「船舶排ガス浄化を目的とした SO<sub>2</sub> のミスト化と電気集塵」粉体工学会 2013 年度春季研究発表会, 2013.5.21 連合会館 (東京)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者 江原由泰 (EHARA, YOSHI YASU) 東京都市大学・工学部・教授  
研究者番号: 40308028

(2)研究分担者 瑞慶覧章朝 (ZUKERAN AKINORI) 神奈川工科大学・工学部・教授  
研究者番号: 00601072