

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 18 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360371

研究課題名（和文） 船舶用ディーゼルエンジンから排出される高濃度微粒子の  
電気集じん装置の研究

研究課題名（英文） Study of Diesel PM Collection for Marine Emissions  
using Electrostatic Precipitator

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

研究成果の概要（和文）：船舶用ディーゼルエンジンから排出される粒子状物質(PM)は、規制されつつあるが有効な除去技術の確立は未だない。そこで、本研究は船舶用ディーゼルエンジンから排出されるPMを効率良く処理する電気集じんシステム(ESP)を構築し、実用化を計ることを目的とした。構築するシステムは二重シリンダ型ESPとバリア放電型ESPである。これらによりPMを高効率で捕集する同時に燃焼除去を行い、濃度の高いPMを長時間にわたり、高効率で集じんすることが可能となる。

研究成果の概要（英文）：The particulate matter (PM) exhausted from a diesel engine is harmful to a human body. Therefore, the stringent regulation is prepared in the automobile. Although PM emission from the ship is being regulated, effective removal technology is not established. Then, this research has been developed an after treatment system for removal of PM emissions from a marine diesel engine. The system is conducted by two-stage type electrostatic precipitator composed a high-frequency dielectric barrier discharge section and collection section. PMs are oxidized and incinerated by the discharge.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2011年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2012年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	9,700,000	2,910,000	12,610,000

研究分野：プラズマ応用工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：電気集じん，粒子状物質，船舶，ディーゼル，再飛散

## 1. 研究開始当初の背景

船舶からの排出ガスによる大気環境汚染

が懸念されている。航海用や荷揚げ用のエンジンのほとんどはディーゼルエンジンであ

り、そ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>) が含まれている。船舶用ディーゼルエンジンの排ガス規制としては、1997 年 9 月に IMO において MARPOL73/78 条約付属書VIが採択され、2005 年 5 月 19 日に要件を満たして発効している。さらに 2012 年には 2 次規制、2016 年には 3 次規制が予定されている。これらの規制には PM の処理技術が未確立なためか PM の規制値は盛り込まれてはいない。しかしながら、船舶の始動低温時には大量の PM が発生するため、高効率な PM 処理は国際的な緊急課題である。

自動車用ディーゼルエンジンについては、排出ガス規制は厳しく、PM の低減技術も進んでいる。自動車用ディーゼルエンジンの燃料である軽油のグレードは高い。そして、燃料噴射システムであるコモンレールの導入により燃焼効率も改善され、ディーゼルパーティキュレートフィルター (DPF) の実用化により、PM の低減が図られつつある。DPF の再生処理法としては、燃焼法 (600°C 以上)、NO<sub>2</sub> や触媒により 300°C 以上での燃焼法、NO<sub>2</sub> やオゾンによる低温燃焼方式が挙げられる。しかし、船舶燃料には硫黄成分が多く含まれ、燃焼効率は悪く PM の排出量も多い。船舶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が非常に高価となり実用的ではない。さらに、PM の存在は NO<sub>x</sub> や SO<sub>x</sub> 除去装置の触媒を被毒などさせ悪影響を及ぼす。

## 2. 研究の目的

ディーゼルエンジンから排出される粒子状物質 (PM) は、人体に有害であることから自動車には厳しい規制が設けられている。一方、船舶用ディーゼルエンジンから排出される PM に対しては、規制されつつあるが有効

な除去技術の確立はなされていない。そこで、本研究では船舶用ディーゼルエンジンから排出される PM を効率良く処理する電気集じんシステム (ESP) を構築し、実用化を計ることを目的とする。まず、再飛散現象を粒子捕集に利用した新しい構造である二重シリンダ型 ESP を考案し、その集じん特性を検討した。さらに ESP 内の粒子挙動を解析し、高効率化を図った。また、バリア放電型 ESP を構築し、放電により PM を酸化燃焼させる。さらに集じん部では未燃焼 PM を捕集し、ディーゼルエンジンより排出される濃度の高い PM を長時間にわたり高効率で集じんすることを可能とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 二重シリンダ型 ESP のシミュレーション解析

二重シリンダ型 ESP 内の流れ解析は 3 次元非定常流れに対して行った。ESP 内の流れの解析アルゴリズムは SIMPLE 法を用いた。流体流れは非圧縮性のニュートン流体と仮定し、流体解析ソフトウェア STAR-CD により計算した。

### (2) 二重シリンダ型 ESP の集じん特性

二重シリンダ型 ESP は接地された金属製のケーシング、ホール電極および高電圧印加用の中心電極から構成されている。中心電極は金属棒に針電極を配置した構造となっており、放電電極として直流高電圧を印加した。ホール電極は直径 58.5mm 円筒で孔直径 1, 2.5, 5mm, 開口率 23, 35, 46%のものをそれぞれ用いた。中心電極とホール電極間は流入側、流出側とも開口されており、ホール電極とケーシング間は封鎖されている。ディーゼルエンジンの排出ガスは全て ESP 内に流入させ、集じん性能を走査型移動度粒子分析器や

パーティクルカウンタによって測定した。

### (3) ESP の PIV 解析

PM の流れを Particle Image Velocimetry (PIV)法により解析した。この PIV 法は流れ場中の粒子をレーザ光により可視化し、PM 捕集に対するイオン風の影響を解析することにより、高効率な電極構成を検討するものである。ESP 内を模擬した、ワイヤ対平板電極モデル装置を作成した。ESP 上部のレーザからのライトシートを、流れ場中に混入したトレーサ粒子に照射する。ライトシートで切り出された断面内の流れ場の粒子位置をハイスピードカメラで撮影し、ESP 内の粒子の挙動を可視化した。

### (4) バリア放電型 ESP による PM 燃焼

バリア放電型 ESP の放電ギャップ 4mm の平行平板電極により PM 燃焼の検討を行った。接地電極上に PM を置き、バリア放電にさらして燃焼特性を検討した。

次に 435cc ディーゼルエンジンを 60%負荷で使用し、その排ガスをバリア放電型 ESP に流入し、集じん特性および燃焼特性を検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 二重シリンダ型 ESP のシミュレーション解析

二重シリンダ型 ESP 内における再飛散粒子の軌道に関してシミュレーション解析を行い、再飛散粒子の再捕集の可能性と再捕集プロセスについて検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ①圧力差によりホール電極開口部において、帯電空間から捕集空間へ気流が発生する。
- ②帯電空間に比べ捕集空間の風速は約 1/3 以下となる。このことから、二重シリンダ ESP

内では、高風速域の帯電空間と低風速域の捕集空間を併せ持つ。

③帯電した浮遊粒子は、ホール電極表面に捕集される。

④再飛散粒子はホール電極開口部近傍の気流の影響によって、捕集空間へ誘導される。

以上の結果から、二重シリンダ構造とすることで、再飛散粒子を低風速域の捕集空間へ誘導できる可能性が明らかとなった。

### (2) 二重シリンダ型 ESP の集じん特性

二重シリンダ構造とした ESP を作製し、実排ガスにより二重シリンダ型 ESP の性能評価を行った。その結果以下の知見を得た。

①二重シリンダ型 ESP ではホール電極を使用することで、再飛散現象を抑制し 100nm 以下の粒径の集じん率が向上した。

②パンチング電極の開口率が大きいほど集じん率は高くなる傾向があり、孔径の大きさにはあまり影響されない。

### (3) ESP の PIV 解析

ESP 内の PM の流れを PIV 法により解析した。電流値によるイオン風の特性と主流体の速度変化による粒子挙動を観測し、以下の知見を得ることができた。

①放電電流が  $1\mu\text{A}$  ~  $2\mu\text{A}$  では流速が速いほどイオン風は増加し、 $2.5\mu\text{A}$  では流速が変化してもイオン風の影響はほぼ一定であった。

②放電電流値の増加に伴い、放電電極付近で粒子速度が増加し、放電電極直下の粒子挙動は集じん電極方向に移動することが明らかとなった。

### (4) バリア放電型 ESP による PM 燃焼

PM の捕集と同時除去が可能なバリア放電型 ESP の構築を目的とし、捕集された粒子がバリア放電で生成するオゾンや活性酸素原

子により燃焼除去させることを試みた。その結果、以下の知見を得ることができた。

①図1にPM除去量の経時変化を示す。PMの初期重量は20mgで、放電により燃焼した量を表している。燃焼量はほぼ放電電力に比例して増加し、20mgのPMを67W、30分で80%以上燃焼することができた。

図2には20分間、バリア放電に曝されたPMの写真を示す。(a)は放電前、(b)から(f)は18Wから60Wの放電電力条件の結果である。

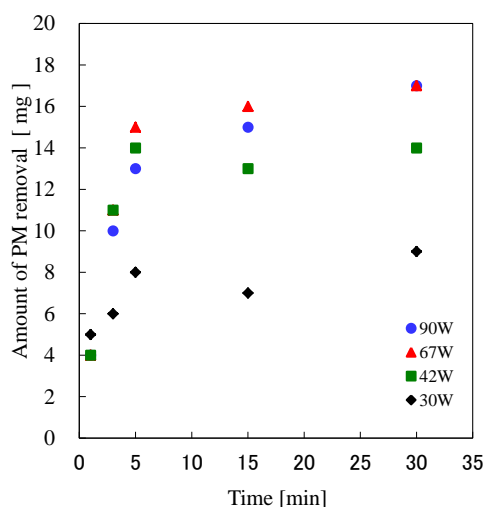


図1. PM 除去量の経時変化

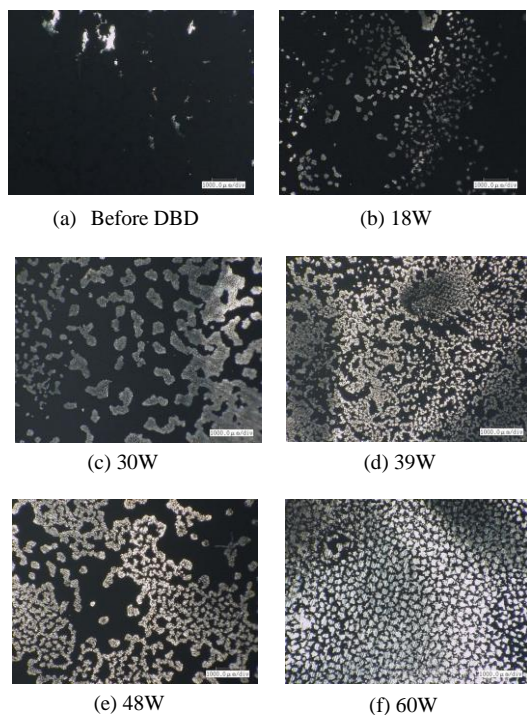


図2. 放電20分後のPMの状態写真

黒く見える部分がPMで、白い部分が電極表面である。放電電力が高い方が、明らかにPMが減少していることが分かる。

②バリア放電型ESPでは435ccディーゼルエンジンを60%負荷で使用し、排ガスを処理した。バリア放電型ESPでは高濃度粒子の排ガスにおいても、高い集じん効率が認められ、さらに1W当たり約2mgのPMが燃焼することが示された。

以上のことより、船舶用ディーゼルエンジンから排出されるPMに対する、実用サイズのESPシステムの設計が可能となり、実用モデル評価が可能となった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計11件)

- ① H. Kawakami, A. Zukeran, K. Yasumoto, T. Inui, Y. Enami, Y. Ehara, T. Yamamoto, “Numerical Simulation of Three-Dimensional Particle Migration and Electrohydrodynamics of Double Cylinder Electrostatic Precipitator”, International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, 査読有, vol. 6, no. 2, (2012) 104-110.
- ② A. Zukeran, H. Kawakami, K. Yasumoto, Y. Ehara, T. Yamamoto, “Influence of Duty Ratio on Collection Efficiency in a Rectangular AC Energized Electrostatic Precipitator”, International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, 査読有, vol. 6, no. 3, (2012) 260-265.
- ③ 川上一美, 瑞慶覧章朝, 安本浩二, 乾貴誌, 榎並義晶, 江原由泰, 山本俊昭「二重シリンダ型電気集塵装置における再飛散粒子の軌道シミュレーション」日本マリンエンジニアリング学会誌, 査読有, 第46巻第5号(2011)111-118.
- ④ Y. Ehara, R. Nakano, T. Yamamoto, A. Zukeran, T. Inui, and H. Kawakami, ”Performance of High Velocity Electrostatic Precipitator for Road Tunnel”, International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, 査読有, vol. 5, no. 2, (2011)157-160.
- ⑤ T. Yamamoto, T. Mimura, T. Sakurai, Y.

- Ehara, A. Zukeran, and H. Kawakami, Novel EHD-Assisted ESP for Collection of Low Resistive Diesel Particulates”, International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, 査読有, vol. 5, no. 2, (2011) 151-156
- ⑥ H. Kawakami, A. Zukeran, K. Yasumoto, T. Inui, Y. Ehara, and T. Yamamoto, “Diesel PM Collection for Marine Emissions Using Double Cylinder Type Electrostatic Precipitator”, International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, 査読有, vol. 5, no. 2, (2011) 174-178.
- ⑦ H. Kawakami, A. Zukeran, K. Yasumoto, M. Kuboshima, Y. Ehara, and T. Yamamoto, “Diesel Exhaust Particle Reduction using Electrostatic Precipitator”, International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, 査読有, vol. 5, no. 2, (2011) 179-184.
- ⑧ T. Yamamoto, T. Mimura, S. Asada, and Y. Ehara, “Diesel Emission Control using EHD-Assisted Electrostatic Precipitator Combined with Plasma Processes”, International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, 査読有, vol. 5, No1 (2011)31-36.
- ⑨ 川上一美, 瑞慶覧章朝, 安本浩二, 久保島正樹, 江原由泰, 山本俊昭「ディーゼル排ガス微粒子除去に対する交流電気集塵の効果」電気学会論文誌, 査読有, Vol.131-A, No3, (2011) 192-198.
- ⑩ 江原由泰, 片谷篤史, 瑞慶覧章朝「道路トンネル用電気集塵装置の開発」静電気学会誌, 査読有, Vo.34, No2, (2010) 72-74.
- ⑪ Toshiaki Yamamoto, Takuya Mimura, N. Otsukaji, Yoshikazu Ito, Yoshiyasu Ehara, Akinori Zukeran, “Diesel PM Collection for Marine and Automobile Emissions using EHD Electrostatic Precipitators” IEEE E Transaction on Industry Applications, 査読有, Vol.46, No.7-8, (2010) 1606-1612.
- [学会発表] (計 28 件)
- ① 角田知弘, 鳥居威仁, 江原由泰「電気集じん装置内における粒子挙動の PIV 解析」電気学会全国大会講演論文集, 1-051, 2013 年 3 月 21 日, 名古屋大学
- ② 鳥居威仁, 角田知弘, 江原由泰「電気集塵装置内におけるイオン風の PIV 解析」電気学会全国大会講演論文集, 1-050, 2013 年 3 月 21 日, 名古屋大学
- ③ T. Yamamoto, S. Asada, Y. Ehara, “Integrated Diesel Engine Emission Control using Plasma Combined Hybrid System”, IEEE Industry Applications Society Annual meeting IAS, 2012 年 10 月 10 日, Las Vegas, NV, USA
- ④ 江原由泰, 小林正浩, 山本俊昭, 瑞慶覧章朝, 川上一美「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」第 82 回マリンエンジニアリング学術講演会, 220, 2013 年 9 月 20 日, 東北大学
- ⑤ 川上一美, 乾貴誌, 安本浩二, 瑞慶覧章朝, 江原由泰, 山本俊昭「二重シリンダ型電気集塵装置における帯電粒子の挙動に関する 3 次元シミュレーション」第 82 回マリンエンジニアリング学術講演会, 214, 2012 年 9 月 20 日, サンポート高松
- ⑥ 江原由泰, 小林正浩, 山本俊昭, 瑞慶覧章朝, 川上一美「バリア放電によるディーゼル排ガス中の微小粒子の除去」機械学会第 22 回環境工学総合シンポジウム 304, 2012 年 7 月 5 日, 東北大学
- ⑦ Y. Ehara, M. Kobayashi, T. Yamamoto, A. Zukeran and H. Kawakami, “Development of dielectric barrier discharge system for continuous removal of diesel particulate matter”, The eighth International Symposium on Non-Thermal/Thermal Plasma Pollution Control Technology & Sustainable Energy, SP-11, 2012 年 6 月 21 日, Camaret, France
- ⑧ A. Zukeran, H. Kawakami, K. Yasumoto, Y. Ehara, T. Yamamoto” Influence of duty ratio on collection efficiency in a rectangular AC energized electrostatic precipitator”, The eighth International Symposium on Non-Thermal /Thermal Plasma Pollution Control Technology & Sustainable Energy, SP-12, 2012 年 6 月 21 日, Camaret, France
- ⑨ H. Kawakami, A. Zukeran, K. Yasumoto, T. Inui, Y. Enami, Y. Ehara, T. Yamamoto, “Numerical Simulation of Three-Dimensional Particle Migration and Electrohydrodynamics of Double Cylinder Electrostatic Precipitator”, The eighth International Symposium on Non-Thermal /Thermal Plasma Pollution Control Technology & Sustainable Energy, SP-13, 2012 年 6 月 21 日, Camaret, France
- ⑩ T. Yamamoto, T. Sakurai, Y. Ehara, A. Zukeran and H. Kawakami, “Performance Characteristics between Horizontally and Vertically Oriented Electrodes EHD-ESP for Collection of Low-Resistive Diesel Particulates”, The 2012 Electrostatics Joint Conference C-4, 2012 年 6 月 12 日, Cambridge, Ontario, Canada
- ⑪ 小林正浩, 高瀬裕太, 江原由泰,

- 興水勇希, 瑞慶覧章朝, 川上一美「電気集塵装置における非熱平衡プラズマを用いた粒子状物質の燃焼」電気学会全国大会 1-098, 2012年3月23日, 広島大学
- ⑫ 大碓淳弘, 江原由泰, 瑞慶覧章朝, 川上一美「ホール型 ESP における集じん装置の開発」電気学会全国大会 1-060, 2012年3月21日, 広島大学
- ⑬ 櫻井貴久, 江原由泰, 山本俊昭「EHD 電気集じん装置の電極オリエンテーションによる微粒子捕集」2012年度静電気学会春季講演会 2012年3月6日, 東京大学
- ⑭ T. Yamamoto, S. Asada, T. Iida, Y. Ehara, “Development of EHD-Assisted Plasma Electrostatic Precipitator”, IEEE Industry Applications Society Annual meeting IAS, 2011年10月10日, Orlando, FL (USA)
- ⑮ 前田理, 石井孝明, 石綿溪, 江原由泰, 山本俊昭「EHD 補助によるプラズマ ESP の開発」第35回静電気学会, 2011年9月12日, 東京理科大学
- ⑯ 江原由泰, 久保島正樹, 山本俊昭, 瑞慶覧章朝, 乾貴誌, 川上一美「電気集じん装置によるディーゼル PM 捕集と再飛散抑制」第81回マリンエンジニアリング学術講演会 216, 2011年5月25日, 東京海洋大学
- ⑰ 川上一美, 瑞慶覧章朝, 乾貴誌, 吉田将隆, 江原由泰, 山本俊昭「船舶ディーゼル用二重シリンダ型電気集塵装置における集塵性能に対する電極構造の効果」第81回マリンエンジニアリング学術講演会 313, 2011年5月25日, 東京海洋大学
- ⑱ 大碓淳弘, 江原由泰, 瑞慶覧章朝, 川上一美「液膜式電気集じん装置の研究」電気学会全国大会 1-041, 2011年3月16日, 大阪大学
- ⑲ 小林正浩, 中野良亮, 江原由泰, 山本俊昭, 瑞慶覧章朝, 川上一美「道路トンネル用の高風速電気集じん装置の研究」電気学会全国大会 1-042, 2011年3月16日, 大阪大学
- ⑳ 櫻井貴久, 三村卓也, 岩佐直樹, 江原由泰, 山本俊昭「大型エンジンを用いた EHD 電気集じん装置のディーゼル微粒子捕集」静電気学会春季講演会, 2011年3月3日, 東京大学
- ㉑ T. Yamamoto, S. Asada, T. Iida, Y. Ehara, “Novel NOx and VOC Treatment using Concentration and Plasma Decomposition” IEEE Industry Applications Society Annual meeting IAS, 2010年10月3日, Houston, USA
- ㉒ M. Kuboshima, Y. Kawamoto, Y. Ehara, T. Yamamoto, A. Zukeran, H. Kawakami, “Study of Diesel Exhaust Particle Collection using Electrostatic Precipitator”, HAKONE XII 12th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, 2010年9月14日, Trenčianske Teplice, Slovakia
- ㉓ T. Mimura, Y. Ehara, T. Yamamoto “Comparison between EHD ESP and Conventional ESP for collection of Diesel Particles” HAKONE XII 12th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, 2010年9月14日, Trenčianske Teplice, Slovakia
- ㉔ 川上一美, 瑞慶覧章朝, 安本浩二, 久保島正樹, 江原由泰, 山本俊昭「ディーゼル排ガス微粒子除去に対する交流電気集塵の効果」電気学会基礎・材料・共通部門大会, 2010年9月13日, 琉球大学
- ㉕ 江原由泰, 久保島正樹, 山本俊昭, 瑞慶覧章朝, 乾貴誌, 川上一美「2 段式電気集じん装置によるディーゼルエンジンから排出される PM の削減」第80回マリンエンジニアリング学術講演会 113, 2010年8月31日, 朱鷺メッセ, 新潟
- ㉖ 川上一美, 瑞慶覧章朝, 乾貴誌, 江原由泰, 山本俊昭「二重シリンダ型電気集塵装置における再飛散粒子の軌道シミュレーション」第80回マリンエンジニアリング学術講演会 112, 2010年8月31日, 朱鷺メッセ, 新潟
- ㉗ 江原由泰, 中野良亮, 山本俊昭, 瑞慶覧章朝, 川上一美「高風速条件における電気集じん装置の研究」機械学会第20回環境工学総合シンポジウム 302, 2010年6月28日, パシヒコ横浜
- ㉘ T. Yamamoto, T. Mimura, S. Asada, and Y. Ehara, “Diesel Emission Control using EHD-Assisted Electrostatic Precipitator Combined with Plasma Processes”, International Symposium on Non-Thermal/Thermal Plasma Pollution Control Technology & Sustainable Energy, I-3, 2010年6月21日, St. John’s Newfoundland, Canada

## 6. 研究組織

### (1) 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

### (2) 研究分担者

山本 俊昭 (YAMAMOTO TOSHIAKI)  
 東京都市大学・工学部・客員教授  
 研究者番号：50305653