

平成 30 年 6 月 24 日現在

機関番号：32714

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04216

研究課題名(和文)放電プラズマによる凝縮促進を利用した船舶排ガス中の有害ガスとPMの除去

研究課題名(英文)Removal of harmful gas and PM emitted from marine diesel by condensation in plasma discharge

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、船舶排ガス中のPAHsとPMを高効率で除去することを目的としている。実験システムは、プラズマ処理部、熱交換器および電気集塵装置で構成した。

PMおよびPAHsに対する電気集塵の効果を検討した結果、排ガスを冷却することでPM中のサルフェートおよびSOFの除去性能が著しく向上した。排ガス中のPAHsに関しても、排ガス冷却と電気集塵の組合せが有効であることが示された。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to remove PAHs and PM emitted from marine diesel. The experimental system consisted of a plasma process unit, a gas heat exchanger and an electrostatic precipitator.

The amount of fine particles generated in the plasma process unit increased with increasing applied voltage and decreasing the electrode length. This is most likely due to SO₂ included in the exhaust gas.

As a result of investigation of the effect of the electrostatic precipitator, dry soot can be removed at the gas temperature of approximately 130 °C. The removal efficiency of sulfate and SOF improved due to decreasing the exhaust gas temperature. Furthermore, it was shown the effect of the gas heat exchanger and the electrostatic precipitator on the removal of PAHs in the exhaust gas.

研究分野：静電気

キーワード：船舶排ガス浄化 電気集塵 PAHs PM 静電気 イオン誘発核生成

1. 研究開始当初の背景

船舶の主機や補機エンジンとして利用されているディーゼル機関の排ガス中には、窒素酸化物 (Nitrogen Oxides : NO_x)、硫黄酸化物 (Sulphur Oxides : SO_x)、粒子状物質 (Particulate Matter : PM) などの大気汚染物質が含まれている。NO_x、SO_x は酸性雨や呼吸器系疾患の原因、PM は粒径が 20~120 nm と非常に小さく、ドライソート、サルフェート、可溶性有機成分 (Soluble Organic Fraction : SOF) や生物に対して毒性が強い多環芳香族炭化水素類 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons : PAHs) を含むなど健康上有害である。このため、国際海事機関 (IMO) で規制が強化されている。

2. 研究の目的

本研究では、船舶排ガス中の PAHs と PM を高効率に除去することを目的とする。提案するシステムはプラズマ処理部、熱交換器、電気集塵部で構成する。プラズマ処理部ではガス状成分から微粒子を生成する。熱交換器では高温排ガスを冷却することで、微粒子を核として凝縮を起こし、水粒子及び SOF 粒子を生成する。これらの凝縮粒子に有害ガス成分を吸収させたのち、電気集塵部で除去し排ガスを浄化する。

3. 研究の方法

実験装置の概要を図 1 に示す。実験装置は、ディーゼルエンジン、プラズマ処理部 (PPU)、熱交換器 (HE)、電気集塵部 (ESP) から構成した。ディーゼルエンジンは、排気量 400cc の小型ディーゼル発電機とし、燃料は A 重油または軽油とした。熱交換器の冷却水には水道水を用いた。

プラズマ処理部 (PPU) の電極構造を図 2 に示す。PPU は、針筒電極構造であり、針電極に最大 18 kV の負極性高電圧を印加し、円筒電極を接地した。針電極の材質はステンレス、直径は 1.6 mm、先端角度は 14°、曲率半径は 22 μm である。円筒電極はステンレス製で内径は 58 mm である。

電気集塵部の電極構造を図 3 に示す。電気集塵部は、高電圧印加用平板電極と接地平板電極で構成された平行平板電極構造した。高電圧印加用平板電極の上流側と下流側端は、棘形状となっておりコロナ放電を発生させた。電極間隔は 9.5 mm、印加電圧は最大 9 kV の負極性高電圧とした。

粒子濃度は、ダクトから排ガスの一部を吸引し希釈器にて 10 倍に等温希釈後、走査式モビリティパーティクルサイザー (Scanning Mobility Particle Sizer : SMPS)、ローボリュウムエアサンプラー (LVS) を用いて測定した。SMPS を用いることで排ガス中に浮遊する 6~250nm の粒子測定及び、評価が可能となる。

LVS にてフィルタ上に捕集したダストをジクロロメタンを溶媒としてソックスレー抽出し、イオンクロマトグラフ、ガスクロマトグ

ラフ質量分析計を用いて、粒子状の SOF、サルフェート及び結合水、PAHs 濃度を求めた。また、合成吸着剤にガス状 PAHs を採取し、粒子状 PAHs と同様に濃度を求めた。本研究で測定

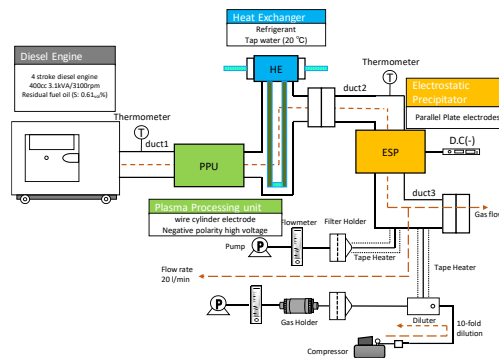


図 1. 実験装置の概略

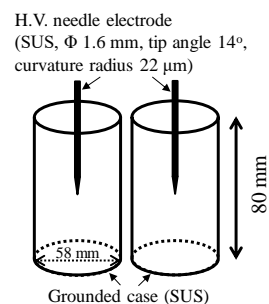


図 2 プラズマ処理部の構造

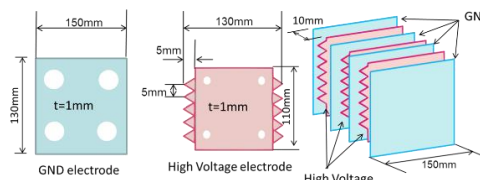


図 3 電気集塵部の構造

表 1. PAHs の一覧

No	Compound name	Target ion	Confirmaiton ion
1	Naphthalene	128	127,129
2	Acenaphthylene	152	151,150
3	Acenaphthene	153	154,152
4	Fluorene	166	165,82
5	Phenanthrene	178	176,179
6	Anthracene	178	176,179
7	Fluoranthene	202	203,101
8	Pyrene	202	203,101
9	Benzo[c]phenanthrene	228	227,226
10	Benz[a]anthracene	228	226,229
11	Chrysene	228	226,229
12	Benzo[b]fluoranthene	252	253,126
13	Benzo[k]fluoranthene	252	253,126
14	Benzo[j]fluoranthene	252	253,126
15	7,12-Dimethylbenz(a)anthracene	256	241,239
16	Benzo[e]pyrene	252	253,126
17	Benzo[a]pyrene	252	253,126
18	3-Methylcholanthrene	268	253,252
19	Indeno[1,2,3-cd]pyrene	276	277,138
20	Dibenzo[a,h]anthracene	278	279,139
21	Benzo[ghi]perylene	276	138,277
22	Dibenzo(a,l)pyrene	302	300,150
23	Dibenzo(a,h)pyrene	302	303,151
24	Dibenzo(a,i)pyrene	302	303,151

した PAHs の種類を表 1 に示す。表には、GC-MS で測定する際のターゲットイオンと確認イオンも示してある。

4. 研究成果

4. 1 PPU による粒子生成

ディーゼルエンジンの燃料に A 重油を用いた場合の粒径分布と PPU への印加電圧の関係を図 4 に示す。ただし、排ガス温度は 130°C から 150°C であり、粒子濃度は PPU 下流から排ガスの一部を吸引し測定した。印加電圧 0 kV 時の粒径分布は、粒径 57 nm にピークをもち、 6.0×10^{12} 個/m³であった。ピーク値は電圧の上昇に伴い低下し 2.1×10^{11} 個/m³まで減少している。これは電気集塵の影響が現れてしまっているためである。一方、粒径 27nm 付近の粒子濃度は、印加電圧 -16kV 時は 4.6×10^{11} 個/m³であったが、-18kV では 2.2×10^{12} 個/m³まで増加している。この結果から、電圧が高いほど微粒子の生成量が高くなることがわかる。また、電極長が短く、負極性の方が粒子生成量が多いことも、本研究で明らかになっている。

PPU における粒子生成の要因を検討するため、燃料を軽油に変更し同様の実験を行った。その結果を図 5 に示す。印加電圧 0 kV における粒径分布は、粒径 71 nm にピークをもち、約 6.6×10^{12} part/m³であった。電圧-18kV では、71 nm の粒子濃度は電気集塵効果により 1.5×10^{11} part/m³まで減少している。しかし、図 4 に示した A 重油の時に見られたような 27nm 付近における粒子濃度の著しい増加は見られない。

SO₂ が存在するガス中でコロナ放電を発生させるとイオン誘発核生成と二成分均一核生成によって微粒子が生成されることが知られている。排ガス中の成分を分析したところ、SO₂濃度は A 重油使用時が 37 ppm であったのに対し、軽油では 2 ppm であった。すなわち、図 4 の A 重油を使用した際に見られた 27nm 付近の微粒子の濃度増加は、排ガス中の SO₂成分に起因する核生成が要因であるといえる。

4. 2 PM 除去効果

本方式における PM 除去に対する電気集塵部の効果について検討した。排ガス温度 160°C における PM の各成分濃度と電気集塵部印加電圧の関係を図 6 に示す。印加電圧 0kV のとき、サルフェートは 3.0 mg/m³、結合水は 3.9mg/m³、SOF は 7.0 mg/m³、ドライストは 8.1 mg/m³であった。電圧の上昇に伴いドライスト濃度は徐々に減少し、印加電圧-5.5kV 以上ではほとんど検出されなくなった。このことから、高温化においてもドライストは、電気集塵部で容易に除去できることが明らかである。ドライストには、南極の氷雪を融解するとして国際的な問題となっているブラックカーボンを含む。電気集塵装置は、このブラックカーボンの除去に有効であることがこの結果からいえる。SOF、サルフェート

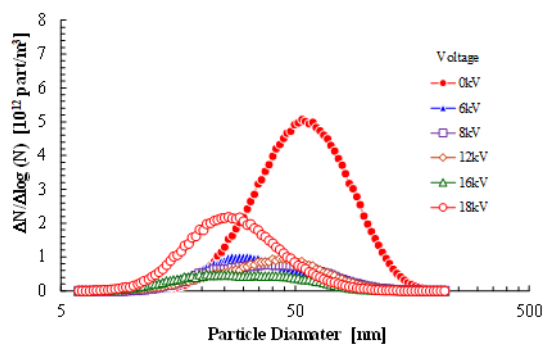


図 4. ディーゼルエンジンの燃料に A 重油を用いた場合の粒径分布と PPU への印加電圧の関係

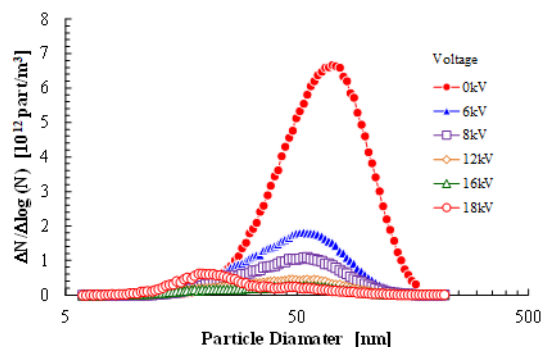


図 5. ディーゼルエンジンの燃料に軽油を用いた場合の粒径分布と PPU への印加電圧の関係

と結合水については、電圧の上昇にともない減少するものの、その量はわずかであった。

熱交換器にて排ガスを 30°C まで低下させたときの電気集塵部における PM 除去と印加電圧の関係を図 7 に示す。電圧 0kV において、サルフェートは 5.7 mg/m³、結合水は 7.4mg/m³、SOF は 8.5mg/m³そしてドライストは 5.3mg/m³であった。図 6 に示した排ガス温度 160°C 時の結果と異なり、印加電圧の上昇に対して、いずれの成分も濃度が減少している。このことから、排ガス温度を低下させることで、各 PM 成分が効果的に除去できることが明らかである。

LVS によってダストを採取したフィルタの各条件における写真を図 8 に示す。処理前 (non treated) のフィルタは PM によって黒くなっている。これに対して電気集塵部 (EP only) のみは、灰色であり処理前に比べ色が薄くなっているのがわかる。一方、熱交換器 (HE only) のみでは、処理前とあまり色の変化はない。これらに対して、熱交換器と電気集塵部を併用した場合 (HE+EP) は、明らかにフィルタの色が薄くなっている。この結果からも、排ガス冷却後に電気集塵することの有効性がわかる。

4. 3 PAHs の除去効果

粒子状とガス状の PAHs 濃度に対する排ガス冷却と電気集塵部の効果について検討した。その結果を図 9 に示す。排ガス中の粒子状 PAHs 濃度は $9.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、ガス状 PAHs が $273 \mu\text{g}/\text{m}^3$

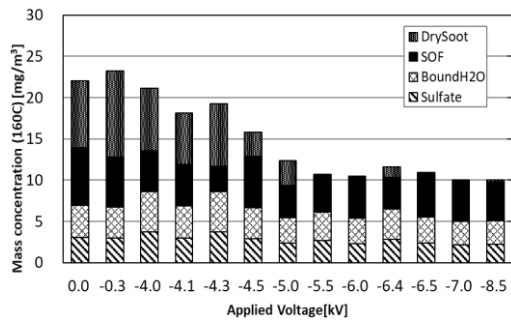


図6. 排ガス温度 160°CにおけるPMの各成分濃度と電気集塵部印加電圧の関係

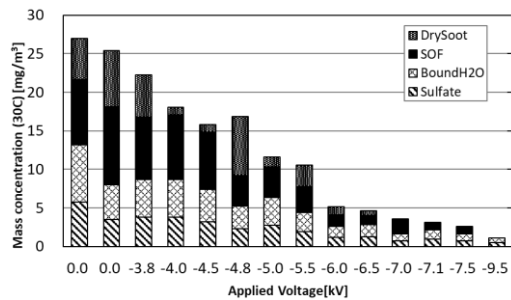


図7. 排ガス温度 30°CにおけるPMの各成分濃度と電気集塵部印加電圧の関係

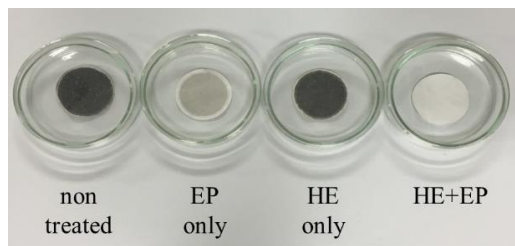


図8. LVSによってダストを採取したフィルタの各条件における写真

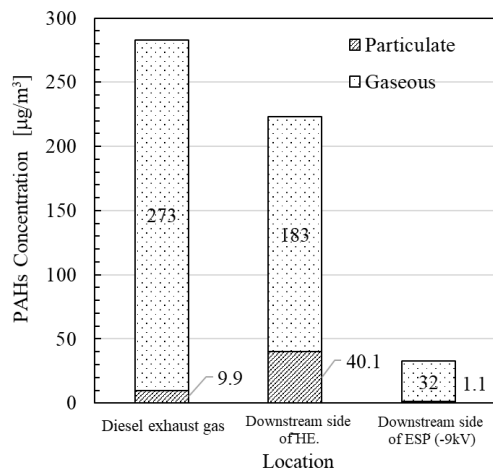


図9. 粒子状PAHsとガス状PAHs濃度に対する排ガス冷却と電気集塵部の効果

であった。排ガス冷却後の熱交換器 (HE) 下流側では、粒子状 PAHs 濃度は $40.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ まで上昇し、ガス状は $183 \mu\text{g}/\text{m}^3$ に減少した。これは、排ガスを冷却することによって、PAHs を吸収

しやすい SOF が粒子化し、それらに取込まれたためと考えられる。さらに、電気集塵部 (ESP) 下流では、粒子状 PAHs は $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、ガス状は $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ まで減少している。すなわち、排ガス冷却と電気集塵部の組み合わせは、排ガス中の有害な PAHs 成分も効果的に除去できることがわかる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Akinori Zukeran, Yuki Nanjo, Kohei Ito, Takashi Inui, "Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Diesel engine using an Electrostatic Precipitator and Heat Exchanger," Conference Record of 2017 IEEE Industrial Application Society Annual Meeting (USB), DOI: 10.1109/IAS.2017.8101687, (2017) 査読無。
- ② Akinori Zukeran, Yoshihiro Sakuma, Kota Mayahara, Takashi Inui, Yoshiyasu Ehara, "SO₂ removal in pulse energized electrostatic precipitator with heat exchanger for marine diesel," Conference record of XIV International Conference on Electrostatic Precipitation (Wroclaw, Poland), <https://isesp.org/assets/themes/isesp/papers/xiv/S9.4-Zukeran.pdf>, (2016) 査読無。

[学会発表] (計 15 件)

- ① 澤野 秀敏、瑞慶覧 章朝、安本 浩二、「電気集塵装置におけるディーゼルナノ粒子の集塵特性: 残渣油と軽油を用いた実験」、平成 30 年電気学会全国大会(九州大学伊都キャンパス) (2018 年 3 月 16 日)
- ② 三井 智也、瑞慶覧 章朝、安本 浩二、中納 隆、坪内 恒祐、小川 貴志、「非対称矩形波交流電圧を用いた 電気集塵装置における逆電離現象の抑制」、平成 30 年電気学会全国大会 (九州大学伊都キャンパス) (2018 年 3 月 16 日)
- ③ 三井智也、安本浩二、瑞慶覧章朝、坪内恒祐、小川貴志、「交流電界を用いた電気集塵装置における逆電離現象の防止効果の検討」、平成 29 年電気学会基礎・材料・共通部門大会(室蘭工業大学) (2017 年 9 月 19 日)
- ④ 伊藤航平、瑞慶覧章朝、乾貴誌、「電気集塵装置を用いたディーゼル排ガス中多環芳香族炭化水素の除去に対する排ガス温度と印加電圧の効果」、平成 29 年電気学会基礎・材料・共通部門大会(室蘭工業大学) (2017 年 9 月 19 日)
- ⑤ H.Sawano K. Yasumoto, A. Zukeran, "Effect of electrode length on collection efficiency for nano-particles emitted from diesel engine with residual fuel oil in an electrostatic precipitator," European Aerosol Conference 2017

- (Zurich, Switzerland) (2017年8月31日)
- ⑥ T. Mitsui, S. Ito, K. Yasumoto, A. Zukeran, “Relationship between back corona discharge current and elapsed time in an electrostatic precipitator,” European Aerosol Conference 2017 (Zurich, Switzerland) (2017年8月31日)
 - ⑦ K. Ito, Y. Nanjo, A. Zukeran, T. Inui, “Removal efficiency for PAHs emitted from diesel engine using an electrostatic precipitator,” European Aerosol Conference 2017 (Zurich, Switzerland) (2017年8月31日)
 - ⑧ 伊藤航平、南條優希、瑞慶覧章朝、乾貴誌、「電気集塵装置によるディーゼル排ガス中多環芳香族炭化水素の除去」、第87回(平成29年)マリンエンジニアリング学術講演会(東京海洋大学越中島会館)(2017年5月16日)
 - ⑨ 澤野秀敏、瑞慶覧章朝、「電気集塵装置におけるナノ粒子の集塵特性に対する電極長の効果：A 重油燃料を用いた実験」、平成29年電気学会全国大会(富山大学)(2017年3月15日)
 - ⑩ 南條優希、瑞慶覧章朝、乾貴誌、「ディーゼル排ガス中多環芳香族炭化水素の濃度測定及びプラズマ処理」、第86回(平成28年)マリンエンジニアリング学術講演会(姫路商工会議所)(2016年10月2日)
 - ⑪ 須藤耀介、瑞慶覧章朝、澤井淳、豊角浩之、乾貴誌、「電解処理海水を用いたスクラバによるディーゼル排ガス中のSO₂除去」、第86回(平成28年)マリンエンジニアリング学術講演会(姫路商工会議所)(2016年10月2日)
 - ⑫ Yuki Nanjo, Takashi Inui, Kota Mayahara, Yoshihiro Sakuma, Shinsuke Serizawa, Akinori Zukeran, “Removal of PAHs emitted from diesel engine using an electrostatic precipitator,” 22nd European Aerosol Conference (Tours, France) (2016年9月5日)
 - ⑬ Akinori Zukeran, Yoshihiro Sakuma, Kota Mayahara, Hitomi Kawakami, Takashi Inui, Yoshiyasu Ehara, “Particulate matter and SO_x removal in an electrostatic precipitator for marine diesel,” 2nd international conference on atmospheric dust (Castellaneta Marine, Italy) (2016年7月14日)
 - ⑭ 佐久間義弘、馬屋原康太、瑞慶覧章朝、乾貴誌、「コロナ放電によるSO₂の除去」、第85回(平成27年)マリンエンジニアリング学術講演会(富山国際会議場)(2015年10月26日)
 - ⑮ Yoshihiro Sakuma, Akinori Zukeran,

Yoshihiro Kawada, Yoshiyasu Ehara, “Generation of nano-particles by ion-induced nucleation using plasma processing in diesel exhaust gas,” European Aerosol Conference 2015 (Milano) (2015年9月8日)

6. 研究組織

(1) 研究代表

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

(2) 研究分担者

江原由泰 (EHARA, Yoshiyasu)
東京都市大学・工学部・教授
研究者番号：40308028