

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 22 日現在

機関番号：32714

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360361

研究課題名(和文)船舶排ガス用SOx・PM同時除去装置の研究

研究課題名(英文)Development of SOx and PM removal system for marine diesel.

研究代表者

瑞慶覧 章朝 (Zukeran, Akinori)

神奈川工科大学・工学部・准教授

研究者番号：00601072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,900,000円

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とSO₂を除去することを目的とした熱交換器付き電気集塵装置を開発した。400 cc のディーゼルエンジンを用いて粒子濃度とSO₂濃度に対する排ガス冷却の影響を検討した。その結果、排ガスを冷却することによって、SOFと硫酸の粒子が生成されるため、粒子濃度が増加することがわかった。また、凝結水中に吸収されるため、SO₂濃度が低下することも示された。粒子濃度は増加するが、電気集塵装置にて高効率で除去できた。

研究成果の概要(英文)：The electrostatic precipitator (ESP) with heat exchanger was developed to reduce particles and SO₂ emitted from marine diesel engines. The influence of gas cooling on the particle and SO₂ concentrations was investigated using a 400-cc diesel engine. The results show that the number and the volume concentration of particles increased due to generated SOF and sulfuric acid particles by gas cooling. It was also indicated that SO₂ concentration in the gas was reduced due to absorption into condensed water. Although the particle concentration increased, ESP showed a high particle collection efficiency.

研究分野：静電気工学

キーワード：船舶排ガス 電気集塵 SOx除去 PM除去

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、硫黄酸化物 (Sulphur Oxides: SOx), 窒素酸化物 (Nitrogen Oxides: NOx) 及びディーゼル排気粒子状物質 (Diesel Particulate Matter: DPM) を主とした大気汚染物質が含まれている。

国際海事機関 (International Maritime Organization: IMO) では、船舶からの排ガスに含まれる NOx, SOx, 粒子状物質 (Particulate Matter: PM) の排出量を規制するため、MARPOL73/78 条約付属書 VI を 1997 年に採択、度重なる見直しの結果、2010 年 7 月に発効した。付属書 VI の PM 規制は、燃料中硫黄分の削減により SOx と同時に PM 発生を間接的に抑制するものであり、燃料中の硫黄分を現状の 4.5% から海域別および段階的に 0.5% または 0.1% まで削減するよう定めている。これは化石燃料の残渣油である C 重油からより質の良い A 重油または軽油に燃料を変換することになり、枯渇の危機にある化石燃料の有効活用の面から望ましくない。また、燃料費が 1.2~1.4 倍となり輸送コストも大幅に増加する問題がある。

一方、MARPOL 条約付属書 VI では、燃料を変更する代わりに排ガス浄化装置を用いて同等水準の排出軽減を行ってもよいとなっている。このため従来は、海水を散布し排ガス中の SOx を吸収するスクラバの研究が多く行われている。この方式は、例えば出力 1200kW、排ガス量 6000Nm³/h の補機エンジンの排ガスを処理する場合、数 10t/h という膨大な海水を必要とし、これを処理するための給水タンク、汚水タンクや各種ポンプおよび配管設備が必要となる。DPM に対してはディーゼルパーティキュレートフィルター (DPF) の研究がおこなわれている。DPF はその構造上、処理風速が数 10cm/s~1m/s と遅い。さらに、圧力損失が数 1000Pa であり、エンジン背圧だけでは排ガスを送り出すのは困難であるため、DPF 下流側に排ガスファンが必要となる。

DPM を除去する他の方式として、電気集塵装置 (Electrostatic Precipitator: ESP) がある。ESP には、コンパクト、低圧力損失、排風ファンなどの付帯設備が簡略化できるなど従来の DPF にはないメリットがある。

現在、非常に大きなスペースを必要としている排ガス浄化装置のコンパクト化が切望されている。今後、MARPOL 条約付属書 VI における燃料の変更に代わる排ガス浄化装置を実現するためには、海水スクラバに代わるコンパクトで給排水量の少ない SOx 除去装置を確立しなければならない。また、ESP の性能向上も必要である。

2. 研究の目的

本研究では、排ガス中の SO₂ と DPM の除去を目的として、排ガス冷却と ESP の効果につ

いて検討した。453 K 以上の高温排ガスを 373 K 以下まで冷却することで、凝縮作用によって水分や可溶性有機成分 (Soluble Organic Fraction: SOF) が粒子化する。この水滴によって、排ガス中の SO₂ を吸収できると考えられる。SO₂ や SOF が粒子化することで、ESP でも捕集が容易となる。実験には、排気量 400cc の小型ディーゼル機関を A 重油を燃料として運転し、その排ガスを使用した。排ガスを約 293 K まで冷却したときの DPM 中の SO₄²⁻, SOF, Dry Soot 濃度を測定した。また、ESP における DPM の集塵性能についても検討したので報告する。

3. 研究の方法

(1) 実験システム

実験システムの概要を図 1 に示す。実験装置は水冷 4 サイクルディーゼル機関 (DA-3100SS-IV, デンヨー株式会社製、総排気量 400cc, 出力 5.5kW), 熱交換器および ESP によって構成されている。この実験では、供試燃料として A 重油 (ENEOS LSA 重油, 硫黄分 0.09%) を用いた。

熱交換器は温度約 293 K の冷媒 (水道水) の流量を調節 (0.5×10⁻³~6×10⁻³ m³/min) することで、約 453 K の排ガス温度を 373~293 K に冷却することが出来る。冷却された排ガスは ESP を通過し、DPM が除去される。熱交換器における排ガスの滞在時間は約 0.35s, ESP 内における風速は約 1m/s である。

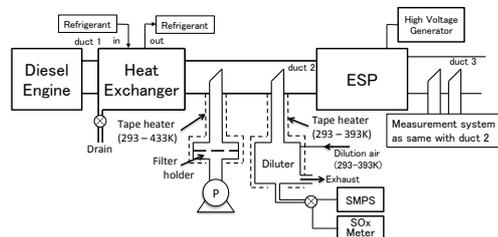


図 1. 実験システムの概略

(2) 電気集塵部の構成

ESP は帯電部と集塵部から構成した 2 段式とした。帯電部と集塵部の構造を図 2 に示す。帯電部は上流側と下流側の端部を鋸歯状に加工した高圧印加用電極 (110×130 mm) と、加工を施していない接地平板電極 (130×150 mm) が 9.5 mm の間隔で交互に並んだ平行平板電極構造になっている。集塵部は高圧印加用平板電極 (110×130 mm) と、接地用平板電極 (130×150 mm) が 9.5 mm の間隔で交互に並んだ平行平板電極構造である。電極はいずれも SUS 製で、厚さは 0.8 mm である。帯電部には DC-4~8 kV を印加し負コロナ放電を発生させ、集塵部には DC+10kV を印加し静電界を形成した。

(3) 排ガス中の粒子状成分の濃度測定

本方式の効果を検討するために、排ガス中の SO₂, DPM (SOF, SO₄²⁻, DrySoot) 濃度及び

粒径分布を計測した。

排ガス中の DPM 濃度は、排ガスの一部を吸引し、テフロン加工を施したガラス繊維フィルターに採取し測定した。採取前後のフィルター質量の差から、(1)式を用いて質量濃度 C_{DPM} [mg/m³] を算出した。なお、サンプリング配管の自然冷却により、配管中で凝縮が起こり粒径分布や成分比率が変化することのないように、配管、フィルターホルダーおよび希釈器は、テープヒータによって吸引ガスと等温に制御した。

$$C_{DPM} = (M_{DPM} - M_f) / (Q_L \cdot t) \quad (1)$$

ただし、 M_f と M_{DPM} は DPM 採取前と採取後フィルター質量 [mg]、 Q_L は吸引流量 [16.7 × 10⁻³ m³/min]、 t は吸引時間 [5 min] である。フィルター質量は、DPM 採取前後に恒温炉にて 323 K で 2 時間乾燥させた後、秤量した。

更に採取したフィルターから、排ガス中の SOF 濃度、硫酸イオン濃度、結合水濃度、DrySoot 濃度を分析した。各成分の分析手順は次の通りである。

SOF 濃度 C_{SOF} [mg/m³] は DPM 濃度 (C_{DPM}) 測定後のフィルターを、ジクロロメタンを溶媒としてソックスレー抽出し、抽出前後のフィルター質量差から (2) 式で算出した。更に、超音波洗浄によりフィルターから硫酸イオンを超純水に抽出し、抽出液からイオンクロマトグラフを用いて硫酸イオン濃度 C_{SO4} [mg/m³] を測定した。硫酸の結合水濃度 C_{BW} [mg/m³] は硫酸イオン濃度の 1.3 倍とした。最後に (3) 式を用いて DrySoot 濃度 C_{DS} [mg/m³] を求めた。

$$C_{SOF} = (M_{DPM} - M_{ext}) / (Q_L \cdot t) \quad (2)$$

$$C_{DS} = C_{PM} - C_{SOF} - C_{SO4} - C_{BW} \quad (3)$$

ただし、 M_{ext} は油分抽出後フィルター質量 [mg] である。

SO₂ 濃度と粒径分布は、ダクトから排ガスの一部を吸引し、希釈器により排ガスと等温で希釈後測定した。SO₂ 濃度は紫外線発光法による SO₂ 計 (APSA-370, HORIBA 製) を使い、粒径分布は走査式モビリティパーティクルサ

イザー (3936NL76, TSI, Scanning Mobility Particle Sizer: SMPS) を用いて測定した。測定値から (4)、(5) 式で SO₂ 低減率 η_{SO_2} と集塵率 η_p を算出した。

$$\eta_{SO_2} = \{1 - (C_{SO_2D} / C_{SO_2U})\} \times 100 \quad (4)$$

$$\eta_p = \{1 - (N_{pD} / N_{pU})\} \times 100 \quad (5)$$

ただし、 C_{SO_2U} と C_{SO_2D} は装置の上流と下流の SO₂ 濃度 [mg/m³]、 N_{pU} と N_{pD} は装置の上流と下流の DPM の個数濃度 [part/m³] である。

4. 研究成果

(1) SO₂ 濃度と DPM 成分への影響

排ガスを冷却することによって水分凝縮が起こり、水滴に SO₂ が吸収されると考えられる。そこで SO₂ 濃度と排ガス温度の関係を測定したので、その結果を図 3 に示す。SO₂ 濃度は排ガス温度 453 K で 29.5 mg/m³ であり、排ガス温度が低くなるに従い低下し、313~293 K では 21.3 mg/m³ 一定となっている。また、SO₂ 低減率でみると、排ガス温度 313~293 K で約 28% となった。

一方、DPM の各成分の濃度と排ガス温度の関係を図 4 に示す。濃度は排ガス 1 m³ (温度 297 K 換算) あたりに含まれる質量で示した。SO₄²⁻ 濃度は、排ガス温度 433 K で 5.5 mg/m³ であり、温度が低下しても殆ど変化はない。以上のことから、排ガスを冷却することによって、水分凝縮が起こり、ガス中の SO₂ が吸収され、凝結水として排出されていると考えることができる。

SOF 濃度は 433 K において 3.3 mg/m³ であるが、排ガス温度が低下するに従い増加し、303 K では 14.4 mg/m³ まで増加している。この結果から、SOF は高温排ガス中ではガス状に存在しており、排ガスが冷却されることによって粒子化しているといえる。ガス状では後段の ESP で捕集することが出来ないが、粒子化することで捕集が容易になる。

DrySoot 濃度は 433 K で 10.8 mg/m³ であり、排ガス温度を下げても濃度に殆ど変化はなかった。

(2) ESP による集塵の効果

排ガスを冷却する事によって、ガス状の物質を粒子化することができた。しかし、最終的にはこの DPM を除去しなければならない。そこで ESP における DPM の集塵性能について確認した。ESP における集塵率の粒径特性に対する帯電部印加電圧の影響を図 5 に示す。ただし、集塵部印加電圧は DC+10 kV 一定、熱交換器下流における排ガス温度は 293 K とした。集塵率は ESP の上流及び下流の粒子濃度から算出し、粒子濃度の測定は SMPS を用いた。いずれの帯電部印加電圧においても粒径約 200 nm 以下ではほぼ一定の集塵率が得られている。しかし、粒径 200 nm 以上では集塵率はわずかに低下している。この原因としては再飛散が考えられる。また、電圧 -4.0 kV における集塵率は最大 92% であるが、-7.0 ~ -8.0 kV では最大 99% まで向上している。この結果から排ガス中の粒子状物質は ESP で

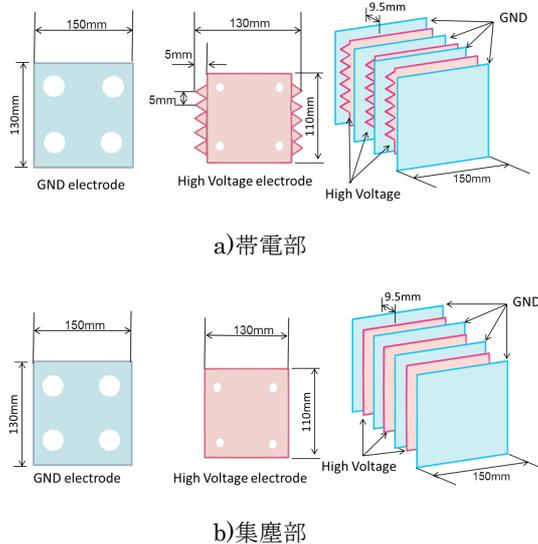


図 2. ESP の電極構造

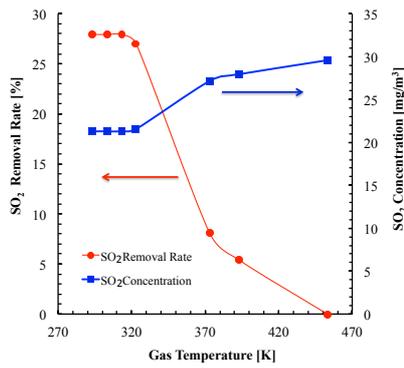


図3. SO₂濃度と排ガス温度の関係

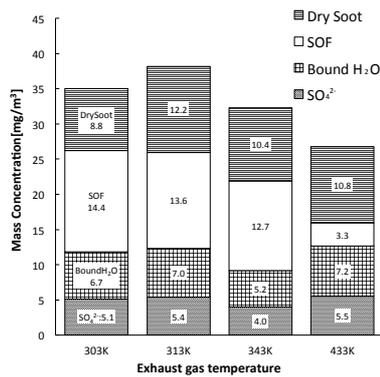


図4. DPMの各成分の濃度と排ガス温度の関係

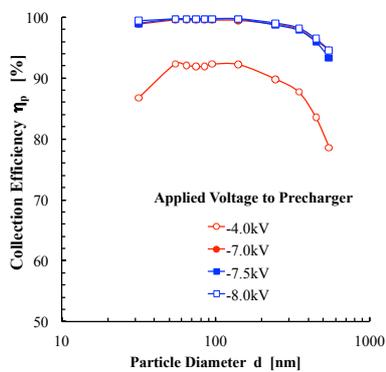


図5. ESPにおける集塵率の粒径特性に対する帯電部印加電圧の影響

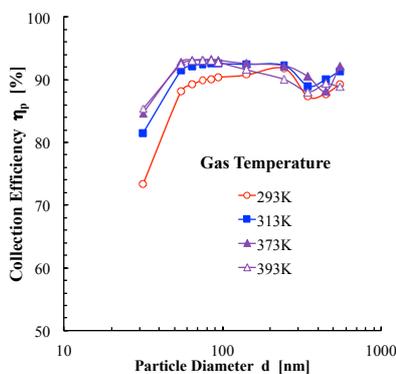


図6. 装置全体における集塵率の粒径特性に対する排ガス温度の影響

集塵可能であることが分かる。

熱交換器とESPを含めた装置全体における集塵率に対する排ガス温度の影響を図6に示す。ただし、帯電部印加電圧はDC-8 kV、集塵部印加電圧はDC+10 kVとし、熱交換器上流及びESP下流の粒子濃度から集塵率を算出した。また、粒子濃度の測定はSMPSを用いた。排ガス温度293 Kの集塵率は粒径30 nmでわずかに低下しているが、その他の粒径では概ね90%が得られている。排ガス温度393~313 Kにおける集塵効率は81~93%であるのに対し、293 Kでは70~90%に低下している。これは排ガスを冷却することにより水分凝縮によって粒子濃度が増加したためである。しかし、集塵率は概ね80%以上であり高い集塵性能が得られている。

(3) 各成分の除去率

微粒子の除去性能が高いことは示されたが、各成分の除去性能も環境改善及びESPの今後の開発においては重要であるため、その確認を行った。ただし、ESPは帯電部のみとし、各成分濃度はESPの下流で測定した。電圧印加時の除去率は、印加電圧0 kV時の濃度を基準として求めた。SO₄²⁻除去率の電圧特性に対する温度の影響を図7に示す。マイナスの除去率はデータのばらつきによって発生したものと考えている。以下の他の結果についても同様である。排ガス温度433 Kの場合、電圧-4.0 kV付近から除去率が上昇し最大で27%であった。これは、-4.0 kV付近からコロナ放電が開始するためである。一方、排ガス温度303 Kでは、最大で85%の除去率が得られ、排ガス冷却の効果が示された。ここで、高温時に除去率が27%以上向上しないのは、排ガスと同じ433 KとなっているESPの集塵電極に、SO₄²⁻を含んだ液体の粒子が捕集されると水分が蒸発し、このときSO₄²⁻も飛散するためと思われる。

SOF除去率の電圧特性に対する温度の影響を図8に示す。排ガス温度433 Kでは、電圧-4.0~8.5 kVで40%前後の除去率が得られているが、電圧特性は明確ではない。しかし、排ガス温度303 Kでは、電圧-4.0 kVから除去率が急激に向上し、最大で約90%に達した。前述したが、ESPの集塵電極は、排ガスと同じ433 Kとなっているため、液体のSOF粒子が捕集されると集塵電極から熱を与えられ、一部は再び気化すると思われる。一方、温度303 Kではその影響が弱くなるため高い除去率が得られたといえる。

Dry soot除去率の電圧特性に対する温度の影響を図9に示す。Dry sootの除去率は排ガス温度に依存せず、電圧-4.0 kV付近から除去率が向上し、ほぼ100%となっている。これはDry sootが排ガスの温度に関係なく、常に粒子状物質として存在する為である。

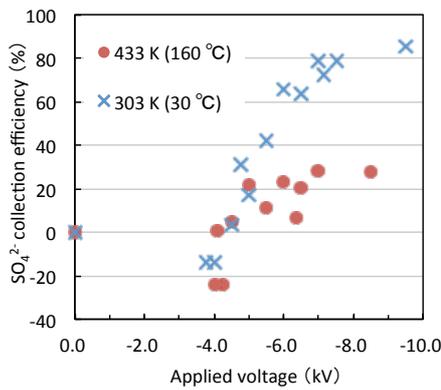


図 7. SO_4^{2-} 除去率の電圧特性に対する温度の影響

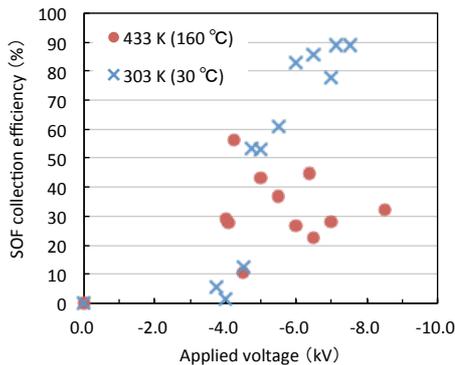


図 8. SOF 除去率の電圧特性に対する温度の影響

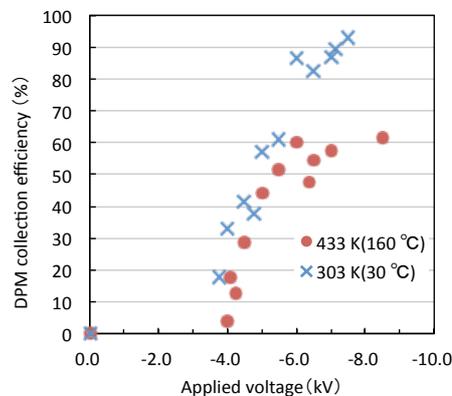


図 9. Dry Soot 除去率の電圧特性に対する温度の影響

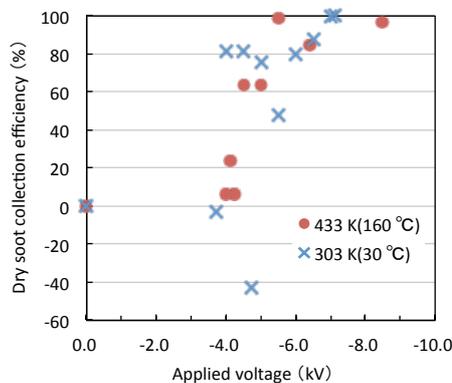


図 10. DPM 除去率の電圧特性に対する温度の影響

最後に全 DPM 除去率の電圧特性に対する温度の影響を図 10 に示す. 温度 433 K における全 DPM の除去率は, 電圧-4.0~-6.0 kV 付近で向上し始め, -6.0~-9.5 kV で 60 %付近に飽和する傾向が得られた. これは図 7, 8 に示した SO_4^{2-} と SOF の除去率が影響を与えているためである. 一方, 温度 303 K では電圧 -4~-8 kV 付近まで除去率が向上し続け, 最大 93%の除去率が得られた. 排ガスを冷却することによって, SO_4^{2-} と SOF の除去率が向上するため, 全 DPM に対しても高い除去率が得られた.

以上の結果から, 排ガスが高温のままでは, SO_4^{2-} 及び SOF の除去には限界があるが, 冷却することによって, いずれの成分に対しても除去性能が向上すること明らかである.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① 瑞慶覧章朝, 乾貴誌, 「船舶排ガス用電気集塵装置の研究開発」, エアロゾル研究, 査読有, Vol. 30, NO. 2, 2015 (掲載予定).
- ② 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 Transaction on Ecology and The Environment, 査読有, Vol. 183, pp. 165-176, 2014.
- ③ 佐久間義弘, 山上竜太, 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_2 と粒子の除去」, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 査読有, Vol. 49, No. 4, pp. 108-113, 2014
- ④ 瑞慶覧章朝, 乾貴誌, 川上一美, 「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」, 日本マリンエンジニアリング学会, 査読有, Vol. 48, pp. 99-104, 2013.
- ⑤ 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, pp. 260-265, 2012.
- ⑥ 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. 3, pp. 104-110, 2012.

[学会発表] (計 14 件)

- ① Yoshihiro Sakuma, Akinori Zukeran, Yoshihiro Kawada, Yoshiyasu Ehara, “Generation of nano-particles by ion-induced nucleation using plasma processing in diesel exhaust gas”, 2015 European Aerosol Conference, 2015 年 9 月発表予定, Milan (Italy).
- ② 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. 20, 海峡メッセ下関 (山口県・下関).
- ③ 瑞慶覧章朝, 「環境対策用電気集塵装置に関する最近の技術」, 第 19 回神奈川フォーラム「地球環境に貢献する最新技術と機械工学」, 2014. 7. 25, 神奈川県産業技術センター (神奈川県・海老名市).
- ④ Yoshihiro Sakuma, Ryuta Yamagami, Akinori Zukeran, Yoshihiro Kawada, Yoshiyasu Ehara, Hitomi Kawakami, Koji Yasumoto, Takashi Inui, “Improvement of SOF and Sulphate removal efficiency in electrostatic precipitator for marine diesel”, 2014 International Aerosol Conference, 2014. 8. 29, Busan (Korea).
- ⑤ Akinori Zukeran, Yoshiki Miyauchi, Jin Takahagi, Yoshihiro Kawada, “Influence of Wire Electrode Pitch on Efficiency in Electrostatic Precipitator”, 2014 International Aerosol Conference, 2014. 8. 29, Busan (Korea).
- ⑥ 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”, 22nd International Conference on Modeling, Monitoring and Management of Air Pollution, 2014. 7. 9, Opatija (Croatia).
- ⑦ 佐久間義弘, 山上竜太, 瑞慶覧章朝, 江原由泰, 乾貴誌, 「一段式電気集塵における船舶排ガス中の PM 除去に対する冷却の効果」, 平成 26 年電気学会全国大会, 2014. 3. 18, 愛媛大学 (愛媛県・松山市).
- ⑧ A. Zukeran, K. Ninomiya, Y. Ehara, K. Yasumoto, H. Kawakami, T. Inui, “SO₂ reduction by water condensation for marine diesel”, European Aerosol Conference 2013, 2013. 9. 5, Prague (Czech).
- ⑨ 佐久間義弘, 山上竜太, 瑞慶覧章朝, 江原由泰, 乾貴誌, 「水分凝縮による船舶排ガス中の SO₂ 除の低減」, 第 83 回 (平成 25 年) 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 (静岡県・静岡市).
- ⑩ Akinori Zukeran, Kazuya Ninomiya, Yoshiyasu Ehara, Koji Yasumoto, Hitomi Kawakami, Takashi Inui, “SO_x and PM removal using electrostatic precipitator with heat exchanger for marine diesel”, 2013 Annual meeting of the electrostatic society of America, 2013. 6. 13, Florida (USA).
- ⑪ 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 SO₂ 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. 22, 連合会館 (東京・千代田区).
- ⑫ 川上一美, 乾貴誌, 榎並義晶, 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, 2012. 9. 20, サポートホール高松 (香川県・高松市).
- ⑬ 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 Symposium on Non-Thermal/Thermal Plasma Pollution Control Technology & Sustainable Energy, 2012. 6. 27, Camaret (France).
- ⑭ 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 Symposium on Non-Thermal/Thermal Plasma Pollution Control Technology & Sustainable Energy, 2012. 6. 27, Camaret (France).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瑞慶覧 章朝 (ZUKERAN, Akinori)
神奈川工科大学・工学部・准教授
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