

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 12 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：22310052
 研究課題名（和文）プラズマ複合プロセスによる超経済的小型船舶排ガス処理システムの開発
 研究課題名（英文）Development of Super Economical and Compact Marine Diesel Emission Control using Integrated Plasma Combined Processes
 研究代表者
 山本 俊昭（YAMAMOTO TOSHIAKI）
 東京都市大学・工学部 教授
 研究者番号：50305653

研究成果の概要（和文）：船舶用ディーゼル高濃度排ガス処理トータルシステムとして、電気抵抗値の低く微粒子再飛散現象を抑制できる静電流体電気集じん装置の開発、NO_x 処理には吸着・脱離・高濃度低容量排ガスを窒素プラズマによる還元処理、循環による NO_x 処理、捕集と燃焼同時に行うプラズマ集じん装置の開発、プラズマ活性種を集じん部や吸着塔に注入微粒子燃焼の研究を行い、これらの要素技術を統合させ、微粒子および NO_x を 90%以上除去できる超小型・経済的排ガス処理技術を確立した。

研究成果の概要（英文）：

The collection of low resistive particulates generated from marine diesel engine had been known to be difficult using the conventional electrostatic precipitators. The electrohydrodynamically-assisted electrostatic precipitator (EHD ESP) was developed to suppress the particle reentrainment. A novel NO_x reduction system, which consists of adsorption, desorption, followed by nonthermal nitrogen plasma was developed. In addition, the plasma ESP, which is able to collect and incinerate particles within the same unit. Furthermore, reactive species injection for PM reduction and NO_x recirculation EGR system were developed. Those technologies were integrated to achieve more than 90% PM and NO_x reduction, leading to extremely economical and compact marine engine emission control.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2011 年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2012 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	12,900,000	3,870,000	16,770,000

研究分野： プラズマ応用工学， 静電流体力学
科研費の分科・細目： 環境工学， 環境技術・環境材料

キーワード： 電気集じん装置， 静電流体， NO_x， プラズマ，
船舶排ガス処理， ディーゼルエンジン， 微粒子， 排ガス処理

1. 研究開始当初の背景

船舶用ディーゼル高濃度排ガス微粒子処理技術として，従来型電気集じん装置（ESP）が使われていたが，電気抵抗値が低いため，再飛散現象により微粒子捕集は困難であった．再飛散現象を抑制する有効で経済的な技術はほとんど存在しなかった．また，NO_x処理においては選択還元法（SR）があるが，運転温度，触媒，アンモニア使用や経済性の問題があった．

2. 研究の目的

船舶用ディーゼル高濃度排ガス処理技術として，捕集困難な電気抵抗値の低いディーゼル微粒子（PM）捕集は，（１）再飛散現象を抑制できる静電流体電気集じん装置（EHD ESP）の開発，（２）NO_x処理においては特殊吸着材を用い，吸着・脱離・濃縮後，高濃度低容量化した排ガスに窒素プラズマを用いる完全還元処理システム，（３）捕集と燃焼同時に行うプラズマ集じん装置の開発，（４）プラズマ活性種を集じん部や吸着塔に注入し，微粒子燃焼させる技術，（５）高濃度NO_xをエンジン入口に循環させる技術（EGR），以上を統合させた超経済的PM・NO_x高効率同時処理技術を確立することを目的とする．

3. 研究の方法

EHD ESPを開発するにあたり，電界強度をゼロとするポケット部にディーゼル微粒子を導入するためにシュリーレン法による静電流体場の可視化，およびイオン風分布把握のため電流密度分布計測を行い，ポケットと電極の最適相対位置を評価した．また，微粒子捕集と燃焼を可能とするプラズマESPを開発した．NO_xに関しては吸着・脱離・高濃度NO_xの窒素プラズマにより，200cc，400ccエンジンをを用いた実ガスで評価した．また，高濃度に濃縮されたNO_xをエンジン入口に循環させ，エンジン出口では入口NO_x濃度に影響を受けずNO_xを減少出来る事を検証した．また，プラズマリアクタが使用されていない時に，活性種をEHD ESPや吸着塔に注入させ，残留微粒子を燃焼させ再生を行うことも検証し，これらの要素技術を統合させた最適デ

ィーゼル排ガス処理を評価した．

4. 研究成果

平成22年度はEHD ESPを設計・制作．電流密度測定，シュリーレンシステムによるEHD ESPの静電流体場の可視化により流体流速と電極，ポケットの相対電極位置の最適化を評価した．同時に，200cc，400cc，3.2Lディーゼルエンジンを用いた風洞実験装置を準備し，SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer)とParticle Counter(PC)を用いてディーゼル微粒子20-5,000nmの粒子径による個数や重量集じん効率の経時変化を測定した．EHD ESPにおいて最大7.5m/sにおいても再飛散制御を抑制でき，粒子径(20-5000nm)の経時変化より90%以上の捕集効率を得られ，従来型ESPと比較して再飛散現象を大幅に抑制出来，高効率集じんを達成できることを実証した．一方，NO_x処理技術ではモレキュラーシーブ13X(孔径10オングストロム)にMn,Cu触媒を担持した吸着材にNO・NO₂吸着させ，模擬ガスをを用いたNO_x処理システムでは窒素プラズマを用いて2,500ppmと高濃度化したNOをほぼ完全に還元できることを実証した．

平成23年度は，更なる改良型EHD ESPを設計・制作し，電流密度測定，シュリーレンシステムによるEHD ESPの静電流体場の可視化により流体流速と電極，ポケットの相対電極位置や電極オリエンテーションの影響を評価した．垂直型電極のEHD ESPと比較して水平型電極EHD ESPは広範囲な粒子径において再飛散現象抑制と大幅な高効率集じんを得られることを実証した．また，EHD ESPに沿面放電を結合させた捕集と燃焼を同時に可能とする新しいプラズマESPを試作制作し，200ccエンジンをを用いて2m/s程度の実験で一段にてPM捕集とオゾンやNO₂によるPM燃焼できるプラズマESPを開発した．

平成24年度においては，200cc，400ccディーゼルエンジンを用い，プラズマESPを用いてディーゼル微粒子20-5,000nmの粒子径による個数や重量集じん効率の経時変化を評価した．従来型ESPと比較してEHDプラズマESPは広範囲な粒子径において再飛散現象を抑

制でき、90%以上の高効率集じんを達成できた。同時に、プラズマによるオゾンとNO₂によりディーゼル微粒子を低温(100~150°C)において燃焼できることを検証した。一方、NO_x処理技術ではモレキュラーシーブ13XにMn, Cu触媒を担持した吸着材を用いた改良吸着塔を試作、NO・NO₂吸着させ、200ccの実ガスを用いて湿度を制御、熱脱離を行うことにより窒素プラズマを用いて1,500ppmNO, NO₂を90%以上還元できることを確認した。また、他の要素技術として高濃度NO_xをエンジン入口に循環させるEGR方式を採用し、エンジン出口NO_x濃度は入口NO_x濃度に影響を受けず、通常空気を用いた場合と同じレベルのNO_x濃度となることを検証した。他の要素技術として、プラズマリアクタが使用されていない時に、プラズマ活性種(オゾン, 活性酸素, NO₂)をEHD ESPや吸着塔入口に注入することにより、残留微粒子を燃焼・再生させる方式を検証した。これらの要素技術を総合的に統合させ、実用化に向けた船舶用ディーゼルエンジン超小型・経済的排ガス処理技術のトータルシステムとすることを実証した。

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 19 件)

1. H. Kawakami., A. Zukeran, K. Yasumoto, T. Nukui, Y. Enami, Y. Ehara, and T. Yamamoto, “Numerical Simulation of Particle Migration and Electrohydrodynamics of Double Cylinder Electrostatic Precipitator,” *International J. of Plasma Environmental Science and Technology*, Vol. 6, No. 2, 2012, pp. 104-110. 査読有
2. A. Zukeran, H. Kawakami, K. Yasumoto, Y. Ehara, and T. Yamamoto, “Influence of Duty Ratio on Collection Efficiency in an Rectangular AC Energized Electrostatic Precipitator,” *International J. of Plasma Environmental Science and Technology*, Vol. 6, No. 2, 2012, pp. 260-265. 査読有
3. Kuwahara, T., K. Yoshida, K. Hanamoto, K. Sato, T. Kuroki, T. Yamamoto, and M. Okubo, “Pilot-Scale Experiments of Continuous Regeneration of Ceramic Diesel Particulate Filter in Marine Diesel Engine using Nonthermal Plasma-Induced Radicals,” *IEEE Transactions of Industry Appl*
- ications, Vol. 48, No. 5, Sept./Oct. 2012, pp. 1649-1656. <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2012.2209389> 査読有
4. 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 J. of Plasma Environmental Science and Technology*, Vol. 5, 2011, pp. 151-155. 査読有
5. Y. Ehara, R. Nakano, T. Yamamoto, A. Zukeran, T. Inui, and H. Kawakami. “Performance of High Velocity Electrostatic Precipitator for Road Tunnel,” *International J. of Plasma Environmental Science and Technology*, Vol. 5, 2011, pp. 157-160. 査読有
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 J. of Plasma Environmental Science and Technology*, Vol. 5, 2011, pp. 174-178. 査読有
7. H. Kawakami, A. Zukeran, K. Yasumoto, M. Kuboshima, Y. Ehara, and T. Yamamoto, “Diesel Exhaust Particle Reduction using Electrostatic Precipitator,” *International J. of Plasma Environmental Science and Technology*, Vol. 5, 2011, pp. 179-184. 査読有
8. T. Yamamoto, S. Asada, T. Iida, and Y. Ehara, “Novel NO_x and VOC Treatment Using Concentration and Plasma Decomposition,” *IEEE Transactions of Industry Applications*, Vol. 47, 2011, pp. 2235-2240. 査読有
9. T. Kuwahara, M. Okubo, T. Kuroki, H. Kametaka, and T. Yamamoto, “Odor Removal Characteristics of a Laminated Film-Electrode Packed-bed Nonthermal Plasma Reactor,” *Sensors*, Vol. 11, 2011, pp. 5529-5542. <http://dx.doi.org/10.3390/s110605529> 査読有
10. 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 and Technology*, Vol. 5, 2011, pp. 31-36. 査読有
11. H. Fujishima, T. Kuroki, T. Ito, K. Otsuka, T. Yamamoto, K. Yoshida, and M. Okubo, “Characteristics of Pilot-Scale Indirect Plasma and Chemical System Used for

- the Removal of NOx from Boiler Emission,” *Transactions of Industry Applications*, Vol. 46, 2010, pp. 1722-1729. 査読有
12. A. Fujishima, Tatsumi, T. Kuroki, A. Tanaka, K. Otsuka, T. Yamamoto, K. Yoshida, and M. Okubo, “Performance Characteristics of Pilot-Scale Indirect Plasma and Chemical System Used for the Removal of NOx from Boiler Emission,” *Transactions of Industry Applications*, Vol. 46, 2010, pp. 1707-1714. 査読有
 13. M. Okubo, T. Kuroki, K. Yoshida, and T. Yamamoto, and M. Okubo, “Single-Stage Simultaneous Reduction of Diesel Particulate and NOx using Oxygen-Lean Nonthermal Plasma Application,” *Transactions of Industry Applications*, Vol. 46, 2010, pp. 2143-2160. 査読有
 14. A. Mihalciou, K. Yoshida, M. Okubo, T. Kuroki, and T. Yamamoto, “Design Factors for NOx Reduction in Nitrogen Plasma,” *IEEE Transactions of Industry Applications*, Vol. 46, 2010, pp. 2151-2156. <http://dx.doi.org/10.1109/IAS.2007.286> 査読有
- [学会発表] (計 25 件)
1. T. Yamamoto, S. Asada, and Y. Ehara, “Integrated Diesel Engine Emission Control using Plasma Combined Hybrid System,” Proc. of the 2012 IEEE-IAS Annual Meeting, Las Vegas, NV, USA, Oct. 7-11, 2012.
 2. 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, Camaret, France, 25th-29th June 2012.
 3. 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,” Proc. Of 2012 Electrostatic Joint Conference, Cambridge Canada, June 12-14, 2012.
 4. T. Yamamoto, T. Sakurai, Y. Ehara, A. Zukeran, and H. Kawakami, “Novel Electrohydrodynamically Assisted Electrostatic Precipitator for Collection of Marine Engine Particulates,” Proc. of the 9th International symposium on Marine Engineering, 2011.
 5. T. Yamamoto, S. Maeda, Y. Ehara, and H. Kawakami, “Development of EHD-Enhanced Plasma Electrostatic Precipitator,” Proc. of the 2011 IEEE-IAS Annual Meeting, Orlando, FL USA, Oct. 12, 2011.
 6. 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 Conference of Electrostatic Precipitation ICESP XII, Nuernberg, Germany, May 11, 2011.
 7. T. Yamamoto, T. Mimura, S. Asada, and Y. Ehara, “Diesel Emission Control using EHD-Assisted Electrostatic Precipitator Combined with Plasma Process,” International Symposium on Non-Thermal/Thermal Plasma Pollution Control Technology and Sustainable Energy, ISNTPT-7, St. John’s Newfoundland, Canada, June 21, 2010.
 8. T. Yamamoto, T. Mimura, Y. Ehara, A. Zukeran and H. Kawakami,” Comparison between Conventional ESP and EHD-Assisted ESP for Low Resistive Diesel Particulate Collection,” French Electrostatics, SFE 2010, Montpellier, France, Sept. 1, 2010.
 9. T. Yamamoto, S. Asada, T. Iida, and Y. Ehara, “Nobel NOx and VOC Treatment using Concentration and Plasma Decomposition,” IEEE-IAS Annual Meeting, Houston USA, Oct.5, 2010.
 10. T. Mimura, Y. Ehara, and T. Yamamoto, “Comparison between EHD ESP and Conventional ESP for Collection of Diesel Particle,” HAKONE XII 12th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, Trencianske Teplice, Slovak Republic, Sept. 14, 2010.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
山本 俊昭 (YAMAMOTO, TOSHIAKI)
東京都市大学・工学部・教授
研究者番号：50305653
 - (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