

令和 3 年 6 月 19 日現在

機関番号：32714

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01647

研究課題名(和文) 浮遊粒子表面の高電界化現象を利用した船舶排ガス中ブラックカーボンの酸化処理

研究課題名(英文) Removal black carbon emitted from marine diesel by increasing electric field phenomena on surface of particles

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) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：ディーゼル排ガス中のブラックカーボンの除去と省エネルギー化を目的として研究を行った。具体的には、大気塵、ディーゼル微粒子に対して実験を行い検討した。その結果、大気塵に対する検討では、処理風速2.5 m/sの条件において、電力をほぼ消費することなく、最大で72%の集塵率が得られた。この効果の要因として、粒子の自然帯電と粒子表面における高電界化現象が考えられた。ディーゼル排ガスを用いた実験では、処理風速が約4m/sの条件で、エネルギーをほとんど消費することなく、最大51%の集塵率を得ることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大気中の浮遊粒子及びディーゼル排気微粒子を、エネルギーをほとんど消費することなく高電界のみで集塵できることを明らかにした点で、本研究成果の工学的意義は非常に大きい。また、消費エネルギーをほとんど消費することなく、大気塵を72%、ディーゼル排気微粒子を51%除去できたことは、CO2排出抑制、化石燃料の枯渇及び経済性の観点から社会的意義が極めて大きい。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to collect back carbon in diesel exhaust gases and improving energy efficiency. The experiments were carried out to collect the air born particles and diesel exhaust particles. As a result, the collection efficiency of 72% was achieved without the energy consumption at the gas velocity of 2.5 m/s in the case of collecting the air born particles. This cause may be due to natural charging of particles and increasing electric field intensity on the surface of particles. In the case of experiment for the diesel exhaust particles, the collection efficiency achieved 51% in the gas velocity of approximately 4 m/s without energy consumption.

研究分野：静電気

キーワード：船舶排ガス ブラックカーボン 電気集じん 静電気 放電プラズマ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

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、大気環境及び人体に有害な粒子状物質 (Particulate Matter: PM) が含まれ、PM 中には北極圏の雪氷を溶解するとして、現在国際海事機関 (International Maritime Organization: IMO) でその対策が検討されているブラックカーボン (Black Carbon: BC) が含まれている。近年 IMO にて検討がはじまったばかりであり、その対策方法はまだほとんど議論されていないが、BC は PM の一部であり、PM 除去用として開発されている電気集塵装置 (Electrostatic Precipitator: ESP) で捕集できると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ディーゼル排ガス中の BC の除去と省エネルギー化である。具体的には、浮遊粒子表面の高電界化現象に着目し、これを利用して放電プラズマを発生させ、BC を高エネルギー効率で除去する。

3. 研究の方法

(1) 大気塵に対する効果

本研究は、大きく分けて大気塵、試験粉体のカーボンブラック、ディーゼル微粒子に対して、実験・検討を行ってきた。ここでは、大気塵に対する実験方法について説明する。実験装置の概略を図 1 に示す。実験装置はファン、ダクト、ESP、パーティクルカウンタで構成されており、ダクトの断面寸法は 51 mm×25 mm である。ESP は同一サイズの接地平板電極と高電圧印加用平板電極の 2 板で構成された平行平板構造である。電極長は 50~450 mm とし、ギャップは 5 mm とした。平板電極の端部に半径 5 mm の丸みを設け、直流電圧を最大 -12.5 kV、すなわち 25 kV/cm の高電界が加えられるようになっている。装置内にはファンによって大気塵を流し、電極間の風速を 0.5~5 m/s に設定した。上流及び下流のダクトにはサンプリング口を設け、パーティクルカウンタを用いて 0.3 μm~5 μm の粒子濃度を測定し、集塵率を計算した。接地平板電極と接地間には電流測定用の抵抗 (10 kΩ) を接続した。

(2) 試験粉体に対する効果

後述するように、大気塵において効果が得られたため、試験粉体であるカーボンブラックを用いて集塵性能を検討したので、その方法について説明する。実験装置の概略を図 2 に示す。実験装置はファン、ダクト、コンプレッサ、CB 入りボトル、ESP、パーティクルカウンタ、高電圧発生装置で構成されており、ダクトの断面寸法は 51 mm×25 mm である。図 1 と同様に、ESP は同一サイズの接地平板電極と高電圧用平板電極の 2 枚で構成された平行平板構造とした。なお、電極長は最大 750 mm、電極間隔は 5 mm とし、平板電極の端部に半径 5 mm の丸みを設けることで最大 12.5 kV の負極性直流高電圧を印加可能とした。図 1 と同様に、25 kV/cm の高電界が加えられるようになっている。試験粉体として、ディーゼル排ガス微粒子を模擬して CB を使用した。コンプレッサを用いてボトル内の CB を攪拌するとともにダクト内に送り、大気と混合した。さらに、ファンによって、電極間の風速を 1~2 m/s に調整し ESP で CB を集塵した。上流及び下流のダクトから流通ガスの一部を吸引し、パーティクルカウンタを用いて 0.3 μm 以上の粒子濃度を測定し、集塵率を計算した。

(3) ディーゼル微粒子に対する効果

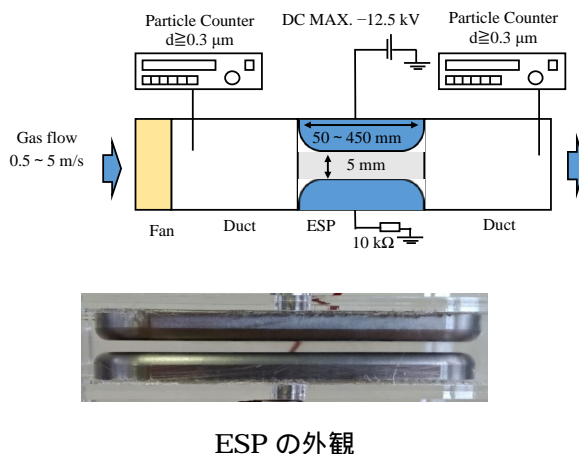


図 1. 大気塵を用いた実験装置の概略

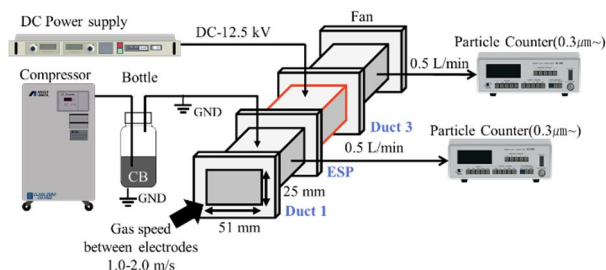


図 2. 試験粉体を用いた実験装置の概略

(1)および(2)の実験結果をもとに、新たに実験装置を設計製作し、実際のディーゼル排ガス中に含まれるBCの除去を試みた。その概略を図3に示す。実験装置はディーゼルエンジン、ダクト、ESP、電圧給電バーで構成されている。ESPは接地用円筒電極内に高電圧印加用円柱電極を電圧給電バーで吊り下げた同軸円筒構造になっている。電極間隔は10mm、円柱電極長は100~450mmとした。電極間に最大12kVの直流負極性高電圧を印加し静電界を形成した。実験で使用するディーゼルエンジンの燃料はA重油、負荷は3kWとした。エンジンからの排ガスは、ダクト及びESPを通過して排出される。ESP内における排ガス速度は約4m/s、排ガス温度は約110°Cである。ESP下流側ダクトから排ガスの一部をポンプで吸引し、排ガス微粒子をフィルターで採取した。採取前後のフィルター質量差から粒子濃度を求め集塵率を算出した。

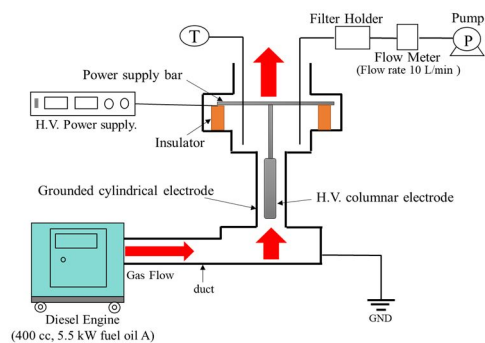


図3．ディーゼル排ガスを用いた実験装置の概略

4．研究成果

(1) 大気塵に対する除去効果

大気塵を用いた場合の各電極長における集塵率と印加電圧の関係を図4に示す。ただし、風速は2.5 m/sである。図中には実験値をプロットで、半理論値を線で示している。半理論値は次のように求めた。集塵率 η が(1)式で表せると仮定し、各電極長において電圧 $V=2.5$ kVとその時の集塵率 η を代入して係数Aを求めた。さらに、求めた係数Aの値を(1)式へ戻し、電圧変化に対する集塵率を予測した。

$$\eta = 1 - \exp(-AV) \quad (1)$$

いずれの電極長においても電圧が高いほど集塵率の実験値は向上しており電極長450mm、電圧12.5 kVにおいては72%が得られた。また、いずれの印加電圧においても電流は検出されなかった(最小測定限界は0.01 μ A)。すなわち、本実験では電力をほぼ消費することなく、最大で72%の集塵率が得られた。実験値と半理論値を比較すると、いずれの電極長においても、実験値は半理論値に比べ同等かそれ以上である。特に電極長150mmと300mmにおいては、電圧が高くなるほど、その差が大きくなっている。半理論値は、その仮定から、粒子の帯電量が電圧によらず一定の場合を表している。すなわち、粒子の帯電が自然帯電に由来する場合を示している。このため、半理論値より実験値が高くなることは自然帯電以外の要因があることを示唆している。この要因として、粒子表面における高電界化現象が考えられる。

(2) 試験粉体に対する除去効果

試験粉体であるカーボンブラックを用いた場合の各電極長における集塵率と印加電圧の関係を図5に示す。ただし、風速は1.5 m/sである。いずれの電極長においても、電圧が高いほど集塵率は向上している。また、電極長が長くなるほど、粒子の滞在時間が長くなるため集じん率は

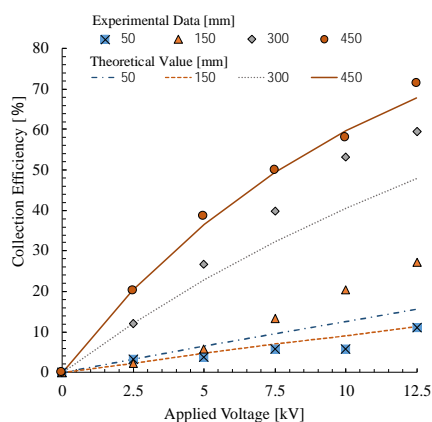


図4．大気塵における集塵率と電圧の関係に対する電極長の効果

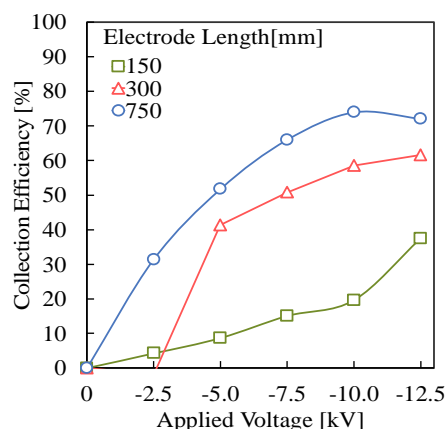


図5．試験粉体における集塵率と電圧の関係に対する電極長の効果

向上しており、電極長 750 mm のとき 74% が得られている。いずれの条件においても電極間に流れる電流は、検出限界の $0.01 \mu\text{A}$ 以下であり、単位流量当たりの消費電力は $0.26 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{s})$ 以下であった。若干条件は異なるが、従来の 2 段式 ESP で同等の集塵率を得るには、約 $10 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{s})$ の電力が必要であることが分かっている。すなわち従来の $1/38$ 以下の電力であり、高電界型 ESP が CB の集塵に対しても有効であることを示している。

(3) ディーゼル微粒子の除去効果

実際のディーゼル排ガス微粒を用いた場合の集塵率と印加電圧の関係に対する電極長の効果を図 6 に示す。いずれの条件においても電流値は測定限界の 0.01 mA 以下であり、電力をほとんど消費していない。集塵率の実験値はいずれの電極長においても電圧の上昇に伴い向上する傾向となった。また、電極長を長くすることで集塵率は向上した。電圧 9 kV に着目すると、集塵率は電極長 100 mm で 9% であるのに対し、450 mm では 23% まで向上した。

しかし、実用的には十分な集塵率でないため、電圧 9 kV の結果をもとに Deutsch の理論式から電極長と集塵率の関係を求めた。その結果を図 7 に示す。図中の丸プロットは、図 6 に示した電圧 9 kV のデータである。集塵率の計算値は、電極長が長くなるに従い高くなり、1000 mm で 44%、2700 mm で 80% に達すると予想された。そこで、条件がほぼ同等となるように電極長 1000 mm の実験装置を新たに製作し性能を確認した。その結果を四角プロットで示してある。集塵率は 51% が得られ、計算値とほぼ同等となった。以上より、高電界型 ESP により電力をほぼ消費することなくディーゼル排ガス微粒を集塵できることが示された。

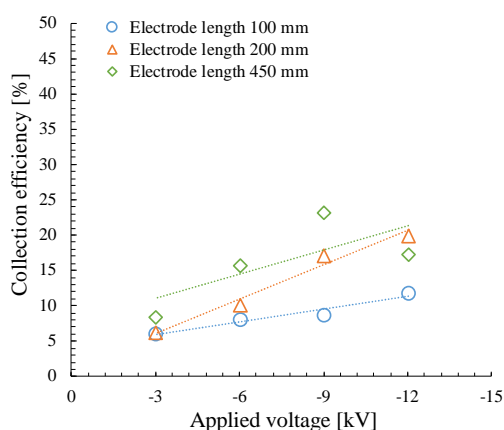


図 6 . ディーゼル排ガスにおける集塵率と電圧の関係に対する電極長の効果

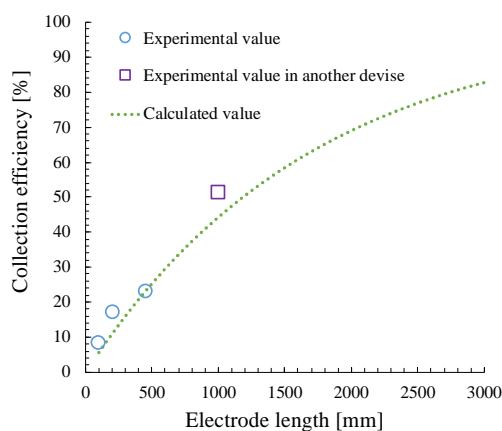


図 7 . 集塵率と電極長の関係 (電圧 9kV 時)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Akinori Zukeran, Shogo Inoue, Daiki Ishizuka, Kohei Ito, Takayuki Kaneko	4. 巻 56
2. 論文標題 Energy Saving Effect of High Electric Field on an Electrostatic Precipitator for Air Borne Particle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS	6. 最初と最後の頁 6990-6996
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIA.2020.3020788	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kohei Ito, Ryota Tamura, Akinori Zukeran, Yoshihiro Kawada, Tomohiro Taoka	4. 巻 107
2. 論文標題 Simulation and measurement of charged particle trajectory with ionic flow in a wire-to-plate type electrostatic precipitator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Electrostatics	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.elstat.2020.103488	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Akinori Zukeran, Hidetoshi Sawano, Koji Yasumoto	4. 巻 12
2. 論文標題 Collection Characteristic of Nanoparticles Emitted from a Diesel Engine with Residual Fuel Oil and Light Fuel Oil in an Electrostatic Precipitator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en12173321	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 伊藤 航平、森 悠真、瑞慶覧 章朝、川田 吉弘、田岡 智浩、柴田 憲司	4. 巻 43
2. 論文標題 線対平板型電気集塵装置におけるイオン風の解析と測定	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 静電気学会誌	6. 最初と最後の頁 25-30
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akinori Zukeran, Yuki Nanjo, Kohei Ito, Takashi Inui	4. 巻 54
2. 論文標題 Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted From Diesel Engine Using an Electrostatic Precipitator and Heat Exchanger	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS	6. 最初と最後の頁 6430-6438
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIA.2018.2859172	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 瑞慶覧章朝
2. 発表標題 高電界を利用した省エネルギー型電気集塵技術
3. 学会等名 静電気学会関西支部研究会大気圧プラズマのエネルギー・環境保全分野への最新応用技術 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石塚大貴, 池田祐斗, 瑞慶覧章朝, 池田洵, 山城啓輔, 佐久間義弘, 金子貴之
2. 発表標題 電気集塵装置における再飛散と運転時間を考慮した理論集塵率の検討
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田祐斗, 石塚大貴, 瑞慶覧章朝, 池田洵, 山城啓輔, 佐久間義弘, 金子貴之
2. 発表標題 高電界によるディーゼル排ガス微粒子の集塵における電極長の効果
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田村亮太, 館優也, 瑞慶覧章朝, 川田吉弘, 田岡智浩
2. 発表標題 棘対平板型電気集塵装置における電流密度及びイオン風解析
3. 学会等名 第22回静電気学会春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryota Tamura, Kohei Ito, Yuya Date, Akinori Zukeran, Yoshihiro Kawada, Tomohiro Taoka
2. 発表標題 Simulation and measurement of particle trajectory in an electrostatic precipitator with multiple wire electrodes
3. 学会等名 2020 IEEE IAS Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村亮太, 館優也, 瑞慶覧章朝, 川田吉弘, 田岡智浩
2. 発表標題 電気集塵装置における電力と集塵率の関係に対する線電極本数の影響
3. 学会等名 第44回静電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石塚大貴, 瑞慶覧章朝, 金子貴之
2. 発表標題 高電界型電気集塵装置におけるカーボンブラックの集塵
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村亮太、伊藤航平、瑞慶覧章朝、川田吉弘、田岡智浩
2. 発表標題 線電極3本時の場合の線対平板型 電気集塵装置における粒子軌道解析
3. 学会等名 静電気学会春季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kohei Ito, Yuma Mori, Akinori Zukeran, Yoshihiro Kawada, Tomohiro Taoka
2. 発表標題 Ionic Flow and Charged Particle Behaviour Analysis in a Wire-to-plate Type Electrostatic Precipitator with Multiple Wire Electrodes
3. 学会等名 European Aerosol Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Ito, Akinori Zukeran, Yuma Mori, Yoshihiro Kawada, Tomohiro Taoka, Kenji Shibata
2. 発表標題 Simulation and measurement of charged particle trajectory with ionic flow in a wire-to-plate type electrostatic precipitator
3. 学会等名 The International Symposium on Electrohydrodynamics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤航平、田村亮太、瑞慶覧章朝、川田吉弘、田岡智浩
2. 発表標題 線対平板電気集塵装置における粒子の帯電及び軌道解析
3. 学会等名 静電気学会講演論文集2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上省吾, 瑞慶覧章朝
2. 発表標題 高電界を利用した省エネ型電気集塵装置の開発
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤航平, 森悠真, 瑞慶覧章朝, 川田吉弘, 田岡智浩, 柴田憲司
2. 発表標題 線電極が複数本の場合の線対平板型電気集塵装置におけるイオン風解析
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akinori Zukeran, Shogo Inoue, Daiki Ishizuka, Takayuki Kaneko
2. 発表標題 Energy saving effect of high electric field on an electrostatic precipitator for air borne particle
3. 学会等名 2019 IEEE Industry Application Society Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akinori Zukeran, Hidetoshi Sawano, Koji Yasumoto
2. 発表標題 Collection characteristic of nano-particles emitted from diesel engine with residual fuel oil or light fuel oil on an electrostatic precipitator
3. 学会等名 XV International Conference on Electrostatic Precipitation (ICESP 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kohei Ito, Akinori Zukeran, Yoshihiro Kawada, Tomohiro Taoka, Kenji Shibata
2. 発表標題 Numerical Analysis of Electric Field Distribution in Wire-to-plate Type Electrostatic Precipitator
3. 学会等名 International Aerosol Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hidetoshi Sawano, Akinori Zukeran, Yasumoto Koji
2. 発表標題 Collection Characteristic of Diesel Nano-Particles in an Electrostatic Precipitator: Experiment Using Residual Fuel Oil and Light Fuel Oil
3. 学会等名 International Aerosol Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤航平, 森悠真, 瑞慶覧章朝, 川田吉弘, 田岡智浩, 柴田憲司
2. 発表標題 線対平板型電気集塵装置における電流密度分布及びイオン風の解析と実験結果の比較
3. 学会等名 第42回静電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 電気集塵装置	発明者 乾貴誌, 瑞慶覧章朝, 井上将吾, 石塚大貴	権利者 富士電機、幾徳学園
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-233439	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	江原 由泰 (Ehara Yoshiyasu) (40308028)	東京都市大学・理工学部・教授 (32678)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	山城 啓輔 (Yamashiro Keisuke)	富士電機株式会社・絶縁基盤技術研究部・部長	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関