

Title	実環境大気エアロゾルの帯電状態が生体および地表面への粒子沈着へ及ぼす影響評価
Sub Title	Evaluation of the influence of charging state of atmospheric aerosol on particle deposition on human body and ground surface
Author	奥田, 知明(Okuda, Tomoaki) 梶野, 瑞王(Kajino, Mizuo) 深瀧, 康二(Fukagata, Koji) 岩田, 歩(Iwata, Ayumi) 森, 樹大(Mori, Tatsuhiro) 三谷, 亮介(Mitani, Ryosuke) Bin Mohd Nor, Muhammad Aiman(Nishita-Hara, Chiharu) 西田, 千春(Igarashi, Yasuhito) 五十嵐, 康人(Ohtsuki, Tsutomu) 大槻, 勤(Matsuki, Atsushi) 松木, 篤(Hayashi, Masahiko) 林, 政彦(Hara, Keiichiro) 原, 圭一郎
Publisher	
Publication year	2024
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2023.)
JaLC DOI	
Abstract	本研究では、エアロゾル粒子の生体や地表面への沈着挙動を議論する上で重要である実環境大気粒子の帯電状態について、(1) 粒子の帯電状態およびその支配要因、(2) 粒子の帯電状態が粒子の生体沈着に及ぼす影響、(3) 地表面への沈着に及ぼす影響、をそれぞれ明らかにすることを目的とした。その結果、KPFM法により個別粒子の帯電状態を計測できる、放射性Cs粒子が非放射性粒子と比べて大きな負の電荷数を持つ、粒子の非帯電粒子の数割合は大気中の負イオン濃度や水蒸気量に強く影響される可能性がある、実測された粒子の帯電状態を考慮することで沈着シミュレーションの質が向上する可能性がある、等の有用な知見を得た。 We aim to clarify (1) the particle charging state and its controlling factors in ambient air, (2) the effect of particle charging state on particle deposition on living organisms, and (3) the effect of particle charging state on particle deposition on ground surfaces, respectively, which are not well known and should be understood when discussing the deposition behavior of aerosol particles. The results showed that (a) KPFM can measure the charging state of individual particles, (b) radioactive Cs particles have a larger negative charge number than non-radioactive particles, (c) the number fraction of non-charged particles may be strongly affected by the negative ion concentration and water vapor content in the ambient air, and (d) the quality of the deposition simulation may be improved by taking into account the measured charging state of the particles.
Notes	研究種目：基盤研究 (A) (一般) 研究期間：2020～2023 課題番号：20H00636 研究分野：環境化学、大気科学、エアロゾル工学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_20H00636seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00636

研究課題名 (和文) 実環境大気エアロゾルの帯電状態が生体および地表面への粒子沈着へ及ぼす影響評価

研究課題名 (英文) Evaluation of the influence of charging state of atmospheric aerosol on particle deposition on human body and ground surface

研究代表者

奥田 知明 (Okuda, Tomoaki)

慶應義塾大学・理工学部 (矢上) ・教授

研究者番号：30348809

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 34,900,000 円

研究成果の概要 (和文) : 本研究では、エアロゾル粒子の生体や地表面への沈着挙動を議論する上で重要である実環境大気粒子の帯電状態について、(1) 粒子の帯電状態およびその支配要因、(2) 粒子の帯電状態が粒子の生体沈着に及ぼす影響、(3) 地表面への沈着に及ぼす影響、をそれぞれ明らかにすることを目的とした。その結果、KPFM法により個別粒子の帯電状態を計測できる、放射性Cs粒子が非放射性粒子と比べて大きな負の電荷数を持つ、粒子の非帯電粒子の割合は大気中の負イオン濃度や水蒸気量に強く影響される可能性がある、実測された粒子の帯電状態を考慮することで沈着シミュレーションの質が向上する可能性がある、等の有用な知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エアロゾル粒子の生体や地表面への沈着挙動に関連する粒子特性のうち、サイズ分布や形状および化学組成等に関しては多くの知見が蓄積されてきたが、粒子の帯電状態についてはほとんど研究が進んでいなかった。本研究の成果により、単一粒子または空気中の粒子群の帯電状態を計測できるようになったことに加え、放射性粒子が非放射性粒子よりも生体や地表面に多く沈着する可能性があること、大気中の粒子の帯電状態が気象条件とくに水蒸気量によって変化し得ること、粒子の帯電状態の違いにより生体への沈着量が変化し得ること、粒子帯電を考慮することで沈着シミュレーション結果の質が向上する可能性があること、等を示すことができた。

研究成果の概要 (英文) : We aim to clarify (1) the particle charging state and its controlling factors in ambient air, (2) the effect of particle charging state on particle deposition on living organisms, and (3) the effect of particle charging state on particle deposition on ground surfaces, respectively, which are not well known and should be understood when discussing the deposition behavior of aerosol particles. The results showed that (a) KPFM can measure the charging state of individual particles, (b) radioactive Cs particles have a larger negative charge number than non-radioactive particles, (c) the number fraction of non-charged particles may be strongly affected by the negative ion concentration and water vapor content in the ambient air, and (d) the quality of the deposition simulation may be improved by taking into account the measured charging state of the particles.

研究分野：環境化学、大気科学、エアロゾル工学

キーワード：エアロゾル 帯電粒子 沈着 呼吸器 地表面 フィールド調査 シミュレーション

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

大気エアロゾルは、呼吸によって生体内に入り込み健康に悪影響を及ぼすほか、大気中の有害成分を含む様々な物質を地表面に輸送する重要な担体である。エアロゾルの生体や地表面への沈着挙動を議論する上で把握すべき特性のうち、サイズ分布や形状および化学組成等に関しては多くの研究が行われ知見が蓄積されてきたが、実環境大気エアロゾルの帯電状態については、それが粒子の沈着現象に関わるため重要性が指摘されているにも関わらず、ほとんど研究が進んでいない。「生体や地表面へのエアロゾル粒子の沈着現象において、従来考えられてきた粒子サイズなどのパラメータ群と比較して、実環境大気エアロゾルの帯電状態がどの程度の影響を持つか」を明らかにすることで、エアロゾルの帯電状態による生体や地表面への沈着挙動に対して観測事実に基づいた確実性を加えることが可能となり、さらにシミュレーションモデルによる多様な環境下での粒子沈着現象の精緻な予測が実現されることが期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、「実環境大気エアロゾルの帯電状態は、生体や地表面へのエアロゾル粒子の沈着にどのような影響があるか？」を理解するため、(1) 実環境大気エアロゾルの帯電状態およびその支配要因、(2) エアロゾルの帯電状態が粒子の生体沈着に及ぼす影響、(3) エアロゾルの帯電状態が粒子の地表面への沈着に及ぼす影響、をそれぞれ明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 実環境大気エアロゾルの帯電状態およびその支配要因の解明

① モデル帯電粒子としての、放射性粒子の電荷数の推算手法の確立と実測¹⁾

非放射性粒子である塩化セシウム粒子(CsCl)の 1wt% 懸濁液を用いてアトマイザーにより CsCl 粒子を発生させ、乾燥管を通過後コロナ帯電ガンによって粒子を帯電させ、微分型電気移動度分析器(DMA)に導入した。5つの電荷数(-60, -30, -10, +30, +60)に対応する電気移動度ごとに CsCl 粒子(粒径 0.4 μm)を分級し、インパクター(50%分粒径 0.5 μm)を用いてガラス基板上に粒子を捕集した。試料捕集後直ちにケルビンプローブフォース顕微鏡(Kelvin Probe Force Microscopy, KPFM, Shimadzu SPM-9700)を用いて、粒子の高さ像と表面電位を測定した。さらに走査型蛍光X線電子顕微鏡(SEM-EDX)を用いて同一基板の同一粒子の化学組成を分析した。

次に、京都大学研究用原子炉にて CsCl に中性子を照射し、 ^{134}Cs を含む CsCl 粒子(54 MBq/g)を生成した。その後、0.16 g の珪藻土、0.04 g の放射性 CsCl 粒子、1mL の純水をよく混ぜ、るつぼに入れて約 60°C で 20 時間加熱した。加熱後、粒子捕集用の石英ガラス板と、るつぼを密閉容器に入れ、連続波ファイバーレーザー($\lambda=1080\text{ nm}$)を用いて約 1 秒間照射させ、 ^{134}Cs 含有粒子を発生させた。ガラス板に付着した粉体粒子を回収し、KPFMを用いて ^{134}Cs 含有粒子の表面電位を測定した。本研究では、放射性粒子である ^{134}Cs 8個と非放射性粒子である CsCl 粒子 8個を分析対象とし、それぞれの表面電位の計測から、表面の電荷数の推算を試みた。

② フィールド観測としての、横浜におけるサブミクロン粒子の帯電分布の季節変化の解明²⁾

2022年6月から2023年1月までの期間、慶應義塾大学矢上キャンパスにおいて、当研究室にて独自開発した帯電粒子分級装置(Keio-Measurement system of Aerosol Charging State, K-MACS)^{3,4)}と光散乱式粒子計数器(Rion KA-02)により粒子の帯電分布の連続観測を行った(測定時間分解能 15 分)。さらに、-4 価から+4 価の範囲内で推算した粒子の帯電分布をガウス分布で近似することで、平均電荷数(p_{ave})と標準偏差(1σ)を算出した。

③ 室内実験としての、非帯電粒子の数割合を支配する要因に関する実験的研究⁵⁾

実験系内の温湿度がほとんど変化しない環境下と、湿度が大きく変化する環境下において、非帯電粒子数濃度と K-MACS の前後で得られる粒子数濃度の比で表した「非帯電粒子の数割合」の変動要因を実験的に調べた。

(2) エアロゾルの帯電状態が粒子の生体沈着に及ぼす影響の解明

① 室内実験による肺模型を用いた帯電粒子の沈着挙動解析

3D プリンターにより 5 分岐を持つ肺模型を作製し、帯電粒子の沈着挙動を調べた。粒子はアトマイザーで発生させ、帯電ガンあるいは荷電中和器(^{241}Am)によって帯電させた後、肺模型に流入させた。比較のために、非帯電粒子のみを肺模型に流入させる実験も実施した。

② 数値シミュレーションを用いた気道内の帯電粒子の沈着挙動解析

数値シミュレーションを用いて、気道内における帯電粒子の運動挙動ならびに沈着現象を解析した。粒子および流体の運動挙動の解析には、粒子の軌跡を剛体の運動方程式からラグランジュ的に解析する離散要素法(Discrete Element Method: DEM)と流体挙動をオイラー的に解析する数値流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)を連成させた DEM-CFD 法を使用した。

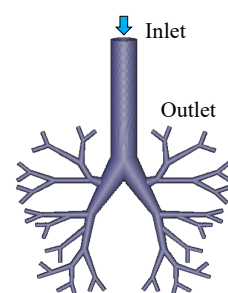


図1 簡易気道モデル

本数値シミュレーションでは図 1 に示す簡易気道モデルを用いて計算を行った。本気道モデルを第 1 分岐から第 2 分岐の Zone 1、第 2 分岐から第 4 分岐の Zone 2、第 5 分岐の Zone 3 の 3 つの領域に分割し、各領域における粒子の沈着量を解析した。流体計算における境界条件として、流体入口を 28.3 L/min、流体出口を大気圧と設定して計算を行った。計算負荷の観点から粒子径を 5.0 μm と粗視化して計算を行った。また帯電量に対する粒子の肺沈着における影響を解明するために 0-1000 価の帯電量を持つ粒子の気道内運動挙動を解析した。

(3) エアロゾルの帯電状態が粒子の地表面への沈着に及ぼす影響の解明⁶⁾

粒子の帯電状態を予測するための 3 次元数値モデル開発のために改良された気象庁領域気象化学モデル (NHM-Chem) を用いた。NHM-Chem では WRF-Chem や CMAQ などの世界標準モデルと同様に、エアロゾルを粒径別に Aitken モード、微小モード、粗大モードの 3 種類に分けて解く一般的な 3 カテゴリ法に加えて、光吸収性を持つフラクタル凝集体であり比表面積が大きく粒子帯電状態に関与すると考えられている soot aggregate を微小モードから分離し、また粗大モードのうち海塩粒子とダスト粒子を分類した 5 カテゴリを採用していることが特徴である。

4. 研究成果

(1)-① 非放射性粒子である CsCl 粒子を用いた実験系において、CsCl 粒子の電荷数と表面電位の関係を図 2a に示す。粒子の電荷数が大きくなるほど表面電位も増加した。さらに、両者の間に高い相関関係 ($r^2 = 0.82$) が見られ、電荷数ごとの表面電位の変動係数 (標準偏差/平均値) は約 30%であった。電荷数と単位面積あたりの表面電位の間にも、同様の傾向が見られた (図 2b)。これらの結果は、実環境大気中の CsCl 粒子の表面電位の計測により、CsCl 粒子の電荷数が 30%の範囲内で推算可能であることを示唆している。単位面積あたりの放射性セシウム粒子 (^{134}Cs 含有粒子) と非放射性セシウム粒子 (CsCl 粒子) の表面電位の中央値 (25%タイル値、75%タイル値) は、それぞれ -2.4×10^{12} (-3.2×10^{12} , -1.1×10^{12}) V/m^2 、 -1.8×10^{11} (-2.6×10^{11} , -5.1×10^{10}) V/m^2 であった。次に、CsCl 粒子の単位面積あたりの表面電位と電荷数との関係 (Fig. 2b) を用いて、両者の粒子の電荷数を推算した。放射性セシウム粒子 (^{134}Cs 含有粒子) と非放射性セシウム粒子 (CsCl 粒子) の電荷数の中央値 (25%タイル値、75%タイル値) はそれぞれ -760 価 (-1034, -347)、-42 価 (-67, 0.5) と推算された。これは、放射性セシウム粒子の表面が非放射性セシウム粒子よりも、負に帯電していることを示している。本研究により初めて明らかとなった放射性セシウム粒子が非放射性セシウム粒子に比べて十分に大きな負の電荷数をもつという結果は、粒子の生体沈着の観点から重要な知見となる。

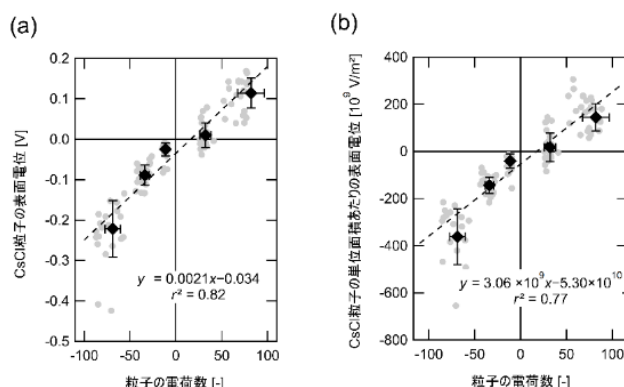


図 2 (a) 非放射性セシウム粒子を用いた表面電位と電荷数との関係 (b) 単位面積当たりの表面電位と電荷数との関係。点線は、最小二乗法で決定した近似直線である。マーカーは粒子の電荷数ごとの平均値。エラーバーはその標準偏差である。

(1)-② K-MACS/OPC を用いて矢上キャンパスでエアロゾル粒子の帯電状態の通年観測を実施した。1 σ が夏に増加し、冬に減少した一方、 p_{ave} は夏に負の値を示し、冬にかけて 0 に近づいた。粒子の帯電分布を表す p_{ave} と 1 σ の支配因子を明らかにするため、様々な気象要素 (気温、相対湿度、混合比、容積絶対湿度) との関係性を調べた。1 σ は、気温と相対湿度から算出される混合比と、容積絶対湿度との間に、それぞれ高い相関関係が見られた (1 σ と混合比との関係: $r^2 = 0.84$, 1 σ と容積絶対湿度との関係: $r^2 = 0.84$)。これは、水蒸気量が増加するほどイオン濃度が増加し、粒子とイオンとの拡散衝突の頻度が増すことで粒子の帯電分布の幅が広がったと考えられる。一方で、 p_{ave} と主な気象要素との間には明瞭な相関関係が見られなかった。ただし、 p_{ave} と 1 σ とともに風速との間に強い相関関係が見られた。これは風が強いほど、粒子とイオンとの衝突確率も増すため、粒子は負に帯電し、1 σ も増加したと考えられる。また、粒子が負に帯電する理由は、正イオンよりも負イオンの移動度が大きいためであると考えられる。特徴的な解析例として、雷の発生時に p_{ave} と 1 σ が共に大きく変動した。ここで、雷の発生時刻は、観測場地点から約 10 km 離れた横浜地方気象台の

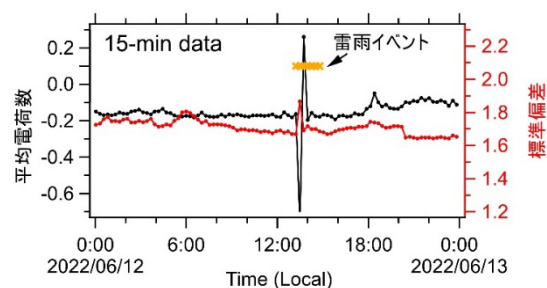


図 3 雷雨時(2022/6/12)の粒子の平均電荷数と標準偏差

データを用いた。雷発生イベントの一例を図3に示す。これは、雷の発生によりイオンが大気中に大量に放出されることで、粒子の平衡帯電分布が、正もしくは負に偏りを持つ帯電分布に変化したと考えられる。雷イベントによっては、正から負に粒子の帯電分布が変化した例も観測されたが、粒子の帯電分布の変化の度合いの要因は本観測だけでは解明することは困難であった。今後は帯電粒子の数濃度を高い時間分解能で測定する手法を確立し、雷イベントの観測数を増やすことで、雷発生に伴う粒子の帯電分布の変化を詳細に明らかにする必要がある。

(1)-③ 室内実験の結果、温湿度が安定な条件では、イオン濃度の増加とともに非帯電粒子の数割合は大きく減少することがわかった。さらに、エアロゾル数濃度に対するイオン濃度の比が大きい範囲では、非帯電粒子の数割合はゆるやかに減少した。これらの結果は、イオン濃度の増加によってイオンとエアロゾル粒子との衝突頻度が増し、帯電粒子の数が増加したことを示唆しているが、イオン濃度の増加に伴う帯電粒子数の増加度合いは、正と負イオンとの衝突によるイオンの消失や粒子の帯電分布の変化（平均電荷数や標準偏差）に影響する可能性がある。一方、湿度が変化する条件では、負イオン濃度とRH ($r^2 = 0.79$)、容積絶対湿度 ($r^2 = 0.83$)、混合比 ($r^2 = 0.83$) の間には、高い相関関係が見られた。バブラーなどで水蒸気を発生させる際に、大きな液滴表面は正に帯電し、液滴から分裂した水蒸気は負に帯電することが報告されている（レナード効果）⁷⁾。この点を考慮すると、水蒸気が発生することで、環境大気中にOHを含む負のイオンが多く生じたことを示唆している。負イオン濃度、RH、容積絶対湿度、混合比が増加すると、非帯電粒子数割合が減少した。さらに、非帯電粒子の数割合は負イオン濃度 ($r^2 = 0.69$)、RH ($r^2 = 0.86$)、容積絶対湿度 ($r^2 = 0.84$)、混合比 ($r^2 = 0.84$) との間に強い相関関係が見られた（図4）。これは水蒸気の増加に伴い、負イオンが増加し、粒子とイオンとの衝突頻度が一層増加した結果、非帯電粒子数割合が減少したと考えられる。以上の結果から、非帯電粒子の数割合は、実環境大気中の負イオン濃度や水蒸気量に強く影響される可能性がある。

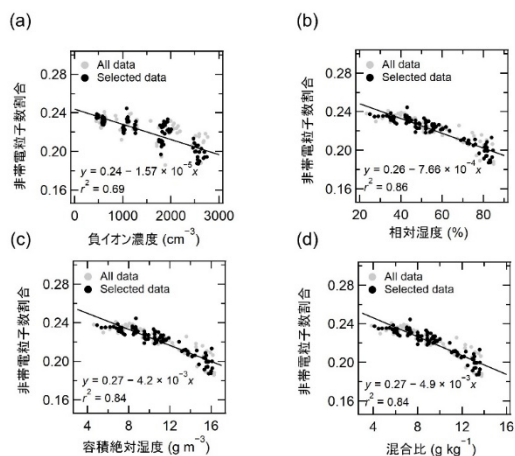


図4 (a) 負のイオン濃度(n_{ion-})、(b) 相対湿度 (RH)、(c) 容積絶対湿度、(d) 混合比に対する、非帯電粒子数割合との関係。それぞれの関係を最小二乗法で近似した直線も示した。

(2)-① 図5に肺模型における帯電粒子(帯電ガンと ^{241}Am)と非帯電粒子の通過率を示す。粒子の通過率について非帯電粒子と帯電粒子で比較すると、帯電粒子では肺模型における通過率が減少した。これは帯電粒子の方が気道に沈着しやすいことを示す。さらに帯電粒子について、帯電ガンを使用した場合と ^{241}Am のどちらにおいても同程度の通過率を示した。帯電ガンで帯電させた粒子の帯電量が ^{241}Am によって帯電させた粒子よりも大きいと仮定する場合は、粒子の帯電量によらず、帯電の有無によって気道内の粒子沈着量が変化する可能性が示唆された。

(2)-② 図6に数値シミュレーションによって解析した各帯電量に対する粒子の気道内沈着率を示す。これより、Zone 1およびZone 2における沈着量について、0 Cの粒子よりも、1-1000 Cの粒子の方が大きくなり、1-1000 Cの粒子では沈着量が大きく変化しないことが示唆された。この数値シミュレーションの結果からは、粒子帯電の有無によって沈着量が変化することが考えられた。

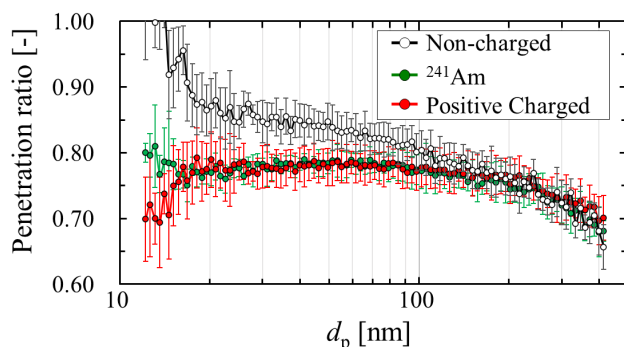


図5 帯電および非帯電粒子の気道通過率

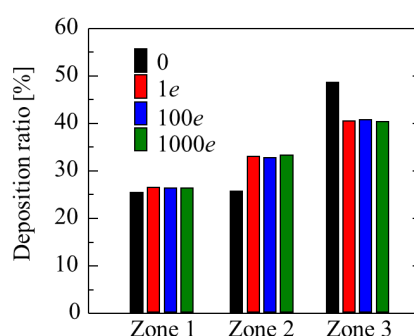


図6 気道モデルにおける帯電粒子沈着

(3) Kajino *et al.* (2021)⁶⁾では、福島原発事故由来の放射性粗大粒子(CsMP)の物理的性状を考慮した拡散沈着現象の数値シミュレーションを世界で初めて実施した。しかし、CsMP の沈着量は大幅に過小評価した(図5)。CsMP は放射性壊変により自己帯電すると考えられるが、計算では電気的中性を仮定したため、自己帯電による乾性・湿性沈着率の増幅効果を見逃したことも原因と考えられる。そこで、その効果を数値モデルに組み込むために、先行研究から得られた沈着率の増幅効果を考慮した計算を実行することで、沈着量の過小評価に一定の改善が見られた。

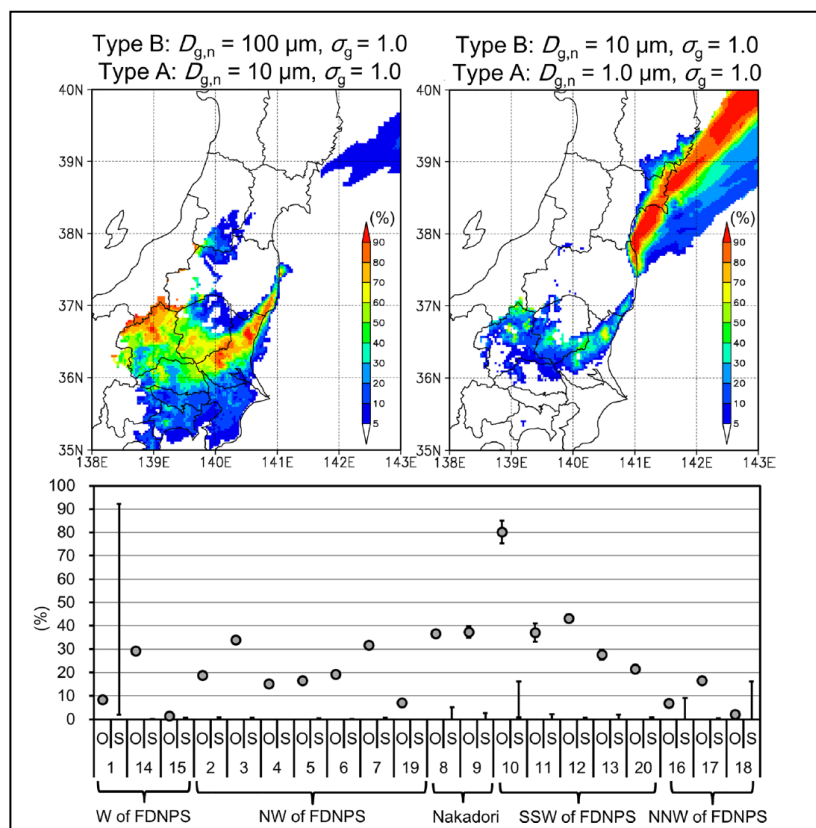


図5. Kajino *et al.* (2021) *J. Geophys. Res.* ⁶⁾ の図12を再掲。

上：CsMP の粒径分布を変化させた場合の全Cs沈着量に対するCsMP由来の沈着量割合(%)のマップ(左は最大粒径見積もり、右は最小粒径見積もり)。

下：観測から得られた全Cs沈着量に対するCsMP由来の割合(丸印)と、計算値(棒グラフ)。ほとんどの地点で計算は観測値を過小評価している。

【文献】

1. Shinke, Y., Mori, T., Iwata, A., bin Mohd Nor, M.A., Kurosawa, K., Inagaki, M., Sekimoto, S., Takamiya, K., Oki, Y., Ohtsuki, T., Igarashi, Y., Okuda, T. (2023) Technique for estimating the charge number of individual radioactive particles using Kelvin probe force microscopy, *Aerosol Science and Technology*, **57** (8), 758–768, doi: 10.1080/02786826.2023.2221726.
2. Mori, T., Ishii, Y., Iwata, A., Okuda, T. (2024) Seasonal charge distributions of submicron atmospheric particles in Yokohama, Japan, *Atmospheric Environment*, **324**, 120421, 13 pages, doi: 10.1016/j.atmosenv.2024.120421.
3. Yonemichi, T., Fukagata, K., Fujioka, K., Okuda, T. (2019) Numerical simulation of parallel-plate particle separator for estimation of charge distribution of PM_{2.5}, *Aerosol Science and Technology*, **53** (4), 394–405, doi:10.1080/02786826.2019.1569198.
4. Iwata, A., Fujioka, K., Yonemichi, T., Fukagata, K., Kurosawa, K., Tabata, R., Kitagawa, M., Takashima, T., Okuda, T. (2019) Seasonal variation in atmospheric particle electrostatic charging states determined using a parallel electrode plate device, *Atmospheric Environment*, **203**, 62–69, doi:10.1016/j.atmosenv.2019.01.040.
5. Mori, T., Iwata, A., Tabata, R., Okuda, T. (2024) Key factors controlling number concentrations of non-charged particles: an experimental study, *Aerosol and Air Quality Research*, **24** (4), 220382, 14 pages, doi: 10.4209/aaqr.220382.
6. Kajino, M., Adachi, K., Igarashi, Y., Satou, Y., Sawada, M., Sekiyama, T.T., Zaizen, Y., Saya, A., Tsuruta, H., Moriguchi, Y. (2021) Deposition and dispersion of radio-caesium released due to the Fukushima nuclear accident: 2. Sensitivity to aerosol microphysical properties of Cs-bearing microparticles (CsMP), *Journal of Geophysical Research*, **126** (1), 23 pages, e2020JD033460, doi:10.1029/2020JD033460.
7. Lenard, P. (1915). Über Wasserfallelektrizität und über die Oberflächenbeschaffenheit der Flüssigkeiten. *Annals of Physics* **352**, 463–524, doi:10.1002/andp.19153521203.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 15件）

1. 著者名 Kajino Mizuo, Kamada Akane, Tanji Natsumi, Kuramochi Masaya, Deushi Makoto, Maki Takashi	4. 巻 16
2. 論文標題 Quantitative influences of interannual variations in meteorological factors on surface ozone concentration in the hot summer of 2018 in Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Atmospheric Environment: X	6. 最初と最後の頁 100191～100191
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.aeaoa.2022.100191	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 Kajino Mizuo, Deushi Makoto, Sekiyama Tsuyoshi Thomas, et al.	4. 巻 14
2. 論文標題 Comparison of three aerosol representations of NHM-Chem (v1.0) for the simulations of air quality and climate-relevant variables	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geoscientific Model Development	6. 最初と最後の頁 2235～2264
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/gmd-14-2235-2021	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 Kajino Mizuo, Watanabe Akira, Ishizuka Masahide, Kita Kazuyuki, Zaizen Yuji, Kinase Takeshi, Hirai Rikuya, Konnai Kakeru, Saya Akane, Iwaoka Kazuki, Shiroma Yoshitaka, Hasegawa Hidenao, Akata Naofumi, Hosoda Masahiro, Tokonami Shinji, Igarashi Yasuhito	4. 巻 22
2. 論文標題 Reassessment of the radiocesium resuspension flux from contaminated ground surfaces in eastern Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Atmospheric Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 783～803
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/acp-22-783-2022	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 Kurihara Kazuki, Iwata Ayumi, Kiriya Miho, Yoshino Ayako, Takami Akinori, Matsuki Atsushi, Nishita-Hara Chiharu, Hara Keiichiro, Hayashi Masahiko, Kaneyasu Naoki, Seto Takafumi, Fujitani Yuji, Funato Koji, Inoue Kozo, Okuda Tomoaki	4. 巻 262
2. 論文標題 Lung deposited surface area of atmospheric aerosol particles at three observatories in Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Atmospheric Environment	6. 最初と最後の頁 118597～118597
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.atmosenv.2021.118597	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 Kurihara Kazuki, Iwata Ayumi, Murray Horwitz Samuel Gray, Ogane Kako, Sugioka Tomoki, Matsuki Atsushi, Okuda Tomoaki	4. 巻 13
2. 論文標題 Contribution of Physical and Chemical Properties to Dithiothreitol-Measured Oxidative Potentials of Atmospheric Aerosol Particles at Urban and Rural Sites in Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Atmosphere	6. 最初と最後の頁 319～319
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atmos13020319	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 Jing Weidong, Saito Katsutomo, Okamoto Takuma, Saito Hibiki, Sugimoto Kazuki, Nishita-Hara Chiharu, Hara Keiichiro, Hayashi Masahiko, Hasegawa Shuichi, Okuda Tomoaki	4. 巻 16
2. 論文標題 Characterization of Elemental Composition and Valence State of Cyclone-collected Aerosol Particles Using EDXRF and XAFS at Three Sites in Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Asian Journal of Atmospheric Environment	6. 最初と最後の頁 40～58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5572/ajae.2021.137	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 Alimov Zikrilla Bobamuratovich, Kusakari Hikaru, Okuda Tomoaki	4. 巻 15
2. 論文標題 Development of A Low-Cost Simultaneous Low Volume Air Sampler Controlled with Sonic Venturi	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Asian Journal of Atmospheric Environment	6. 最初と最後の頁 52～67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5572/ajae.2020.072	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 該当する

1. 著者名 Patel Prashant, Aggarwal Shankar G., Tsai Chuen-Jinn, Okuda Tomoaki	4. 巻 244
2. 論文標題 Theoretical and field evaluation of a PM2.5 high-volume impactor inlet design	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Atmospheric Environment	6. 最初と最後の頁 117811～117811
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.atmosenv.2020.117811	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 該当する

1. 著者名 Kajino Mizuo, Hagino Hiroyuki, Fujitani Yuji, Morikawa Tazuko, Fukui Tetsuo, Onishi Kazunari, Okuda Tomoaki, Kajikawa Tomoki, Igarashi Yasuhito	4. 巻 4
2. 論文標題 Modeling Transition Metals in East Asia and Japan and Its Emission Sources	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 GeoHealth	6. 最初と最後の頁 e2020GH000259
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GH000259	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 Kajino Mizuo, Adachi Kouji, Igarashi Yasuhito, Satou Yukihiko, Sawada Morihiro, Thomas Sekiyama Tsuyoshi, Zaizen Yuji, Sawa Akane, Tsuruta Haruo, Moriguchi Yuichi	4. 巻 126
2. 論文標題 Deposition and Dispersion of Radio - Cesium Released due to the Fukushima Nuclear Accident: 2. Sensitivity to Aerosol Microphysical Properties of Cs - Bearing Microparticles (CsMPs)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 e2020JD033460
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JD033460	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 Kajino Mizuo, Hagino Hiroyuki, Fujitani Yuji, Morikawa Tazuko, Fukui Tetsuo, Onishi Kazunari, Okuda Tomoaki, Igarashi Yasuhito	4. 巻 11
2. 論文標題 Simulation of the transition metal-based cumulative oxidative potential in East Asia and its emission sources in Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 6550
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-85894-z	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 Niwano M., Kajino M., Kajikawa T., Aoki T., Kodama Y., Tanikawa T., Matoba S.	4. 巻 48
2. 論文標題 Quantifying Relative Contributions of Light - Absorbing Particles From Domestic and Foreign Sources on Snow Melt at Sapporo, Japan During the 2011~2012 Winter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2021GL093940
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021GL093940	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 Sato Yousuke, Kajino Mizuo, Hayashi Syugo, Wada Ryuichi	4. 巻 18
2. 論文標題 A numerical study of lightning-induced NOx and formation of NOy observed at the summit of Mt. Fuji using an explicit bulk lightning and photochemistry model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Atmospheric Environment: X	6. 最初と最後の頁 100218~100218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aeaoa.2023.100218	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 Kajino Mizuo, Kayaba Satoko, Ishihara Yasuhiro, Iwamoto Yoko, Okuda Tomoaki, Okochi Hiroshi	4. 巻 21
2. 論文標題 Numerical simulation of IL-8-based relative inflammation potentials of aerosol particles from vehicle exhaust and non-exhaust emission sources in Japan	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Atmospheric Environment: X	6. 最初と最後の頁 100237~100237
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aeaoa.2024.100237	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 Shinke Yukimi, Mori Tatsuhiko, Iwata Ayumi, Mohd Nor Muhammad Aiman bin, Kurosawa Keiichi, Inagaki Makoto, Sekimoto Shun, Takamiya Koichi, Oki Yuichi, Ohtsuki Tsutomu, Igarashi Yasuhito, Okuda Tomoaki	4. 巻 57
2. 論文標題 Technique for estimating the charge number of individual radioactive particles using Kelvin probe force microscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Aerosol Science and Technology	6. 最初と最後の頁 758~768
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/02786826.2023.2221726	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 Mori Tatsuhiko, Iwata Ayumi, Tabata Ryoya, Okuda Tomoaki	4. 巻 24
2. 論文標題 Key Factors Controlling Number Concentrations of Non-charged Particles: An Experimental Study	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Aerosol and Air Quality Research	6. 最初と最後の頁 220382~220382
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4209/aaqr.220382	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 Mori Tatsuhiro, Ishii Yuto, Iwata Ayumi, Okuda Tomoaki	4. 巻 324
2. 論文標題 Seasonal charge distributions of submicron atmospheric particles in Yokohama, Japan	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Atmospheric Environment	6. 最初と最後の頁 120421~120421
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.atmosenv.2024.120421	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 —

[学会発表] 計20件 (うち招待講演 3件／うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Ishii, Y., Mori, T., Iwata, A., Miki, K., Matsuki, A., Okuda, T.
2. 発表標題 Observation of atmospheric particle electrostatic charging states in urban and rural regions
3. 学会等名 American Association for Aerosol Research 40th Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shinke, Y., Mori, T., Iwata, A., Kurosawa, K., Inagaki, M., Sekimoto, S., Takamiya, K., Oki, Y., Ohtsuki, T., Igarashi, Y., Okuda, T.
2. 発表標題 Investigation of the charging state of radioactive Cs particles using kelvin probe force microscopy
3. 学会等名 American Association for Aerosol Research 40th Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤間 葉子, 難波江 佑介, 岩田 歩, 石戸谷 滯, 奥田 知明, 深潟 康二
2. 発表標題 粒子沈着評価装置におけるPM2.5挙動の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新家雪実、岩田歩、黒澤景一、森樹大、奥田知明
2. 発表標題 KPFM法を用いた個別粒子の帯電状態解明方法の検討
3. 学会等名 第39回エアロゾル科学・技術研究討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤間葉子, 矢島康太郎, 新井梨乃, 難波江佑介, 深瀉康二
2. 発表標題 Numerical simulations of fine particles issued into containers
3. 学会等名 第25回乱流制御研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石戸谷滯、岩田歩、奥田知明
2. 発表標題 エアロゾル粒子の気道模型に対する沈着率の検証
3. 学会等名 第62回大気環境学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梶野瑞王、森野悠
2. 発表標題 放射性物質の輸送・沈着モデルの進化と有用性
3. 学会等名 東京電力福島第一原子力発電所事故による放射能大気環境汚染 ―これまでとこれから― (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Iwata, A., Tabata, R., Fujioka, K., Yonemichi, T., Fukagata, K., Okuda, T.
2. 発表標題 Relationship between electrostatic charging variations of atmospheric sub-micron particles and meteorological condition
3. 学会等名 European Aerosol Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Muramatsu, R., Iwata, A., Okuda, T.
2. 発表標題 Measurement of the electrostatic charging state of combustion particle using Tandem DMA
3. 学会等名 European Aerosol Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kajino, M., et al.
2. 発表標題 Deposition, dispersion, and re-suspension of radiocesium in East Japan
3. 学会等名 Fukushima and the Ocean (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梶野瑞王、森野悠
2. 発表標題 放射性物質の輸送・沈着モデルの進化と有用性
3. 学会等名 東京電力福島第一原子力発電所事故による放射能大気環境汚染 —これまでとこれから— (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤間 葉子, 新井 梨乃, 難波江 佑介, 深瀉 康二
2. 発表標題 乱流場におけるPM2.5 の壁面への沈着挙動の数値モデリング
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第60回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三谷亮介、大崎修司、仲村英也、綿野哲、Muhammad Aiman Mohd Nor、森樹大、奥田知明
2. 発表標題 エアロゾル粒子の肺内輸送現象の解析
3. 学会等名 混相流シンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 奥田知明
2. 発表標題 実環境大気中サブミクロンエアロゾル粒子の帯電状態の測定
3. 学会等名 第40回エアロゾル科学・技術研究討論会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三谷亮介、飯沼拓人、大崎修司、仲村英也、綿野哲、Muhammad Aiman Mohd Nor、森樹大、奥田知明
2. 発表標題 粉末吸入製剤における帯電による粒子残留現象の解明
3. 学会等名 第40回エアロゾル科学・技術研究討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩田歩、Samuel Gray MURRAY HORWITZ、栗原一嘉、松本篤、奥田知明
2. 発表標題 横浜、能登における氷晶核粒子濃度に対する粒子組成および熱感受性生物起源粒子の寄与
3. 学会等名 第64回大気環境学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森樹大、石井悠人、岩田歩、奥田知明
2. 発表標題 都市域における帯電粒子の数濃度分布の季節変化
3. 学会等名 第64回大気環境学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三谷亮介、飯沼拓人、Muhammad Aiman Mohd Nor、森樹大、奥田知明
2. 発表標題 粉末吸入製剤における粒子帯電現象の解明
3. 学会等名 粉体工学会2023年度秋期研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三谷亮介、飯沼拓人、Muhammad Aiman Mohd Nor、森樹大、奥田知明
2. 発表標題 帯電性粒子の肺内沈着挙動の数値解析
3. 学会等名 化学工学会第89回年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fujima, Y., Arai, R., Nabae, Y., Fukagata, K.
2. 発表標題 Modeling of PM2.5 deposition behavior on the wall surface
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

慶應義塾大学 理工学部 応用化学科 環境化学研究室：粒子の帯電状態 https://www.applc.keio.ac.jp/~okuda/research/theme/charge.html こんな研究をして世界を変えよう（内閣府/総合科学技術・イノベーション会議のエビデンス事業） 有害粒子がヒトに悪さするカギは帯電にあった！先例のない粒子の帯電研究 https://www.sekaiwokaeyo.com/theme/k0307/

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	梶野 瑞王 (Kajino Mizuo) (00447939)	気象庁気象研究所・全球大気海洋研究部・主任研究官 (82109)	
研究分担者	深瀉 康二 (Fukagata Koji) (80361517)	慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授 (32612)	
研究分担者	岩田 歩 (Iwata Ayumi) (30827340)	慶應義塾大学・理工学部（矢上）・助教 (32612)	

6. 研究組織（つづき）

	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	森 樹大 (Mori Tatsuhiko) (60801181)	慶應義塾大学・理工学部（矢上）・助教 (32612)	
研究協力者	三谷 亮介 (Mitani Ryosuke) (10980609)	慶應義塾大学・理工学部（矢上）・特任助教 (32612)	
研究協力者	ビンモハマドノル ムハンマドアイマン (bin Mohd Nor Muhammad Aiman) (50939189)	慶應義塾大学・理工学部（矢上）・研究員 (32612)	
研究協力者	西田 千春 (Nishita-Hara Chiharu) (00572463)	慶應義塾大学・理工学部（矢上）・特任講師 (32612)	
研究協力者	五十嵐 康人 (Igarashi Yasuhito) (90343897)	京都大学・複合原子力科学研究所・特任教授 (14301)	
研究協力者	大槻 勤 (Ohtsuki Tsutomu) (50233193)	京都大学・複合原子力科学研究所・特任教授 (14301)	
研究協力者	松木 篤 (Matsuki Atsushi) (90505728)	金沢大学・環日本海域環境研究センター・准教授 (13301)	
研究協力者	林 政彦 (Hayashi Masahiko) (50228590)	福岡大学・理学部・教授 (37111)	

6. 研究組織（つづき）

	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	原 圭一郎 (Hara Keiichiro) (10390593)	福岡大学・理学部・助教 (37111)	

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
---------	---------