

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20541

研究課題名（和文）磁性ナノ粒子マニピュレーションによる乱流制御型風洞実験手法

研究課題名（英文）Turbulence control in boundary layer wind tunnel experiment by magnetic nano-particle manipulation

研究代表者

西嶋 一欽（Kazuyoshi, Nishijima）

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：80721969

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究を通じて、（1）ミリメートルからサブマイクロメートルオーダーの磁性粒子を流体中に分散させ外部から磁場を加えることで、流体に局所的な流れを励起することが可能であることを示した。また、（2）光学的・非接触な方法で、流れ場を可視化するためのトレーサーと磁性粒子の運動を同時に計測するためのシステムを構築した。さらに、（3）核となるマイクロビーズ表面に磁性ナノ粒子を固定した「磁性ナノ粒子固定化ビーズ」の生成に成功し、（4）マイクロ流路に分散したこれらの磁性粒子に磁場をかけると、見かけの動粘性係数が変化することを確認するとともに、その特性を光圧下で調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、大気境界層中に位置する建築物の空気力学的特性を解明するための風洞実験手法を革新することである。新たな乱流制御手法の確立によって、既存の風洞実験では再現困難であった大きなスケールの乱れや高次の乱流統計量を模擬できれば、これまでは困難であった竜巻による飛散物の飛散、吹雪による吹き溜まりなどの風複合現象に対する風洞実験による模擬への道が拓かれることである。また、そのような複合現象を模擬できれば、強風に関連する災害の発生メカニズムの解明に貢献することができるなど、社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：Through this research project, (1) we demonstrated that controlling of flow is possible with manipulation of magnetic particles (different scales ranging from millimeter to sub-micro meter), which are spread in fluid by applying magnetic field; (2) we developed a measurement system that enables us to simultaneously measure motions of magnetic particles and tracers that are introduced to analyze the flow; (3) we succeeded in the production of "magnetic nanoparticle-fixed bead" in which magnetic nanoparticles were fixed on the surface of the core microbeads; (4) we confirmed the modulation of apparent kinematic viscosity under the application of magnetic field onto these magnetic particles dispersed in a microfluidic channel and their properties were also investigated under the optical pressure.

研究分野：風工学

キーワード：風洞実験 乱流制御 ナノ粒子

1. 研究開始当初の背景

建築土木分野における耐風設計やリスク評価において、境界層風洞を用いた縮尺模型実験は風荷重評価のための基本的な手段である。境界層風洞を用いた実験では、実際の風を再現する目的で模型に接近する流れを制御する必要がある。従来の風洞実験ではこの目的のために、グリッドやスパイヤー、粗度ブロックなどといった抵抗体を配置することでパッシブに目的とする接近流を作成している。

一方、申請者らは科研費(16K14340)において、「相似測を満たせば流体の種類によらず現象を模擬できる」という原理に基づいて、空気の代わりに水溶液を用いることで実験装置の幾何学的な大きさをおよそ10分の1に小型化できる可能性があることに着目し、新たな縮尺模型実験手法を構築した。本研究では、この新たな縮尺模型実験手法において、水溶液に分散させた磁性粒子を外部磁場により制御することで、模型に接近する流れを制御するものである(図1)。

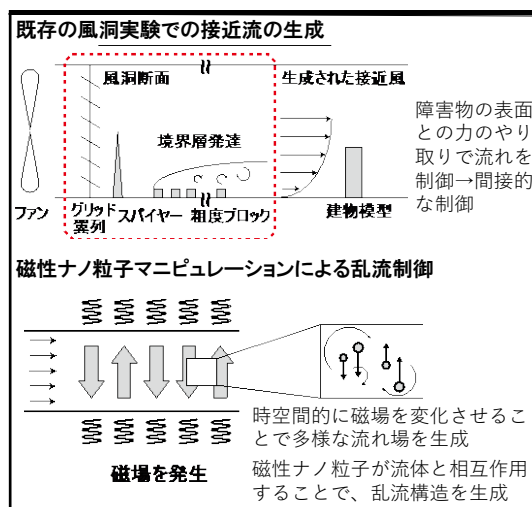


図1. 本研究が目指す新たな乱流制御

2. 研究の目的

本研究の目的は、接地境界層中に位置する建築物の空気力学的特性を解明するための風洞実験手法を革新することである。特に本研究課題では、磁性ナノ粒子を混入させた液体を流路内に充填し、外部から磁性ナノ粒子を磁気駆動することで格段に高い自由度で乱流を制御する新たな手法のいしずえを構築する。新たな乱流制御手法の確立によって、既存の風洞実験では再現困難であった大きなスケールの乱れや高次の乱流統計量を模擬できれば、これまで困難であった竜巻による飛散物の飛散、吹雪による吹き溜まりなどの風複合現象に対する風洞実験による模擬への道が拓かれる。

このような目的のもと、本研究では風工学的な実験手法という観点とナノ粒子の物性及び製造という観点から、以下の課題に取り組んだ。

課題A：乱流制御手法の開発

課題B：磁性ナノ粒子と溶媒との相互作用の解明

課題C：磁性ナノ粒子の調整

※課題B、Cに関する「研究の方法」、「研究成果」は特許出願を検討中であり、該当部分を除いて本成果報告書を公開する。

3. 研究の方法

(1) 乱流制御手法の開発

① 流体および磁性粒子の同時計測手法の確立

西嶋 G では、溶媒中に分散させたトレーサー分布の空間的相互相関に基づいて場の流速を計測する PIV (Particle Image Velocimetry) 技術と個々の磁性粒子の移動経路を追跡する PTV (Particle Tracking Velocimetry) 技術に基づいて、流体の流れ場と磁性粒子の運動を同時に計測する手法を構築した。

② 磁性粒子の運動の基本的制御

流体内に分散させた磁性粒子の制御には、ネオジム磁石を用いた。制御可能性を検討するために、まず制御と計測が容易な粒径の大きな磁性粒子を用いた。同時計測技術や基本的な制御技術が確立したのち、サブマイクロメートル～サブミリメートルオーダーの各種磁性粒子を用いて実験を行った。

4. 研究成果

(1) 乱流制御手法の開発

西嶋 G では、磁性粒子の運動と流れ場の同時計測について、流れ場と磁性粒子の運動を 2 台のハイスピードカメラを用いて同じ座標系で同期計測するためにシステムを構築した。図 2 に構築した計測システムの概要を示す。レーザー光源には 532nm にピークを持つ連続波レーザー (5W) を用いた。水溶液の流れを可視化するためのトレーサーには、グリーン光源に対してオレンジ色 (励起波長 580nm) に蛍光するものを用いた。レーザー光源に反射した光はハーフミラーを通じて 2 方向に分かれる。一方の光は 532nm 狭帯域フィルタを取り付けたハイスピードカメラ、もう一方の光は 550nm ハイパスフィルタ取り付けたハイスピードカメラでそれぞれ撮影される。これにより、同じ撮影領域に存在する 2 種類の粒子の運動を独立に撮影することができる。

本計測システムにより異なる波長の反射波長を有する粒子を撮影できることを確認したのち、ミリメートルオーダー～サブマイクロメートルの磁性粒子を分散させた水槽中に

乱流を発生させ、磁場によって駆動された磁性粒子によって生じる流れ場の分析を行った。その結果、ミリメートル～サブマイクロメートルスケールのいずれの磁性粒子によっても静止している流体に局所的な流れを励起することが可能であることを実験的に明らかにした。特に、サブマイクロメートルスケールの磁性粒子で流れを駆動できたことは、本研究が目指している磁気駆動型乱流制御の実現に大きく近づく成果である。

ここでは、鉄粉適量を混合したアルギン酸ナトリウム水溶液 (質量比約 1%) を塩化カルシウム水溶液 (質量比約 16.7%) に滴下することで製作した直径約 2.5mm の磁性粒子を用いた結果を示す (詳細は[1]を参照のこと)。図 3 に、直方体状水槽 (縦 44.2mm×横 44.6mm×高さ 31.4mm) に上記磁性粒子および蛍光トレーサーを分散させたうえで、水槽上部からネオジウム磁石で磁性粒子を制御している状態をハイスピードカメラで撮影した画像の一例を示す。同図左は、532nm 狭帯域フィルタを通して撮影した画像である。レーザー光に反射した磁性粒子が捉えられている。同図右は、550nm ハイパスフィルタを通して撮影した画像である。蛍光トレーサー (細かい粒状のもの) が捉えられている。また、目視及び撮影動画により、磁場により磁性粒子が運動し、それに伴って水槽内に流れ場が形成されることが確認できた。図 4 に、ハイスピードカメラで撮影された複数の画像を用いて PIV 解析を行い、流れ場を可視化した結果を示す。

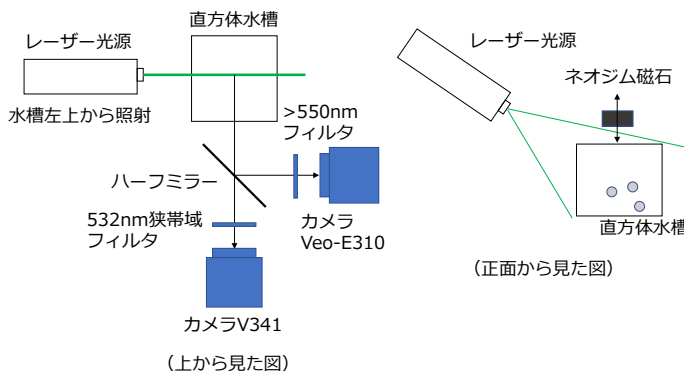


図 2. 撮影システム概要[1 より引用]

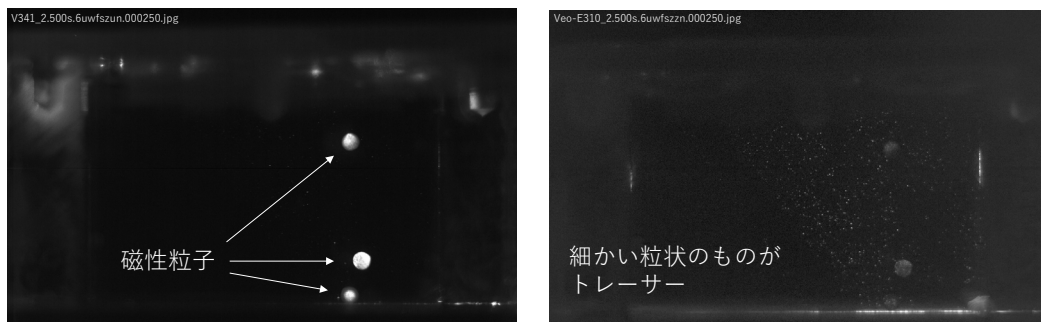


図 3. 左: 532nm 狭帯域フィルタを通して撮影した画像[1 より引用]、右: 550nm ハイパスフィルタを通して撮影した画像[1 より引用]

より粒径の小さい磁性粒子（サブマイクロメートル～マイクロメートル）に対しても同様の実験を行った。これらの実験においても磁場により磁性粒子を制御することは可能であった。ただし、一様に分散させた状態を維持しつつ流れ場を制御することには課題が残された。また、回流型水槽中で水流がある中での磁性粒子の磁気駆動については、磁場の印加方法、水槽内に要求される密度に相当する磁性粒子の安価な製造方法が課題として明らかになった。

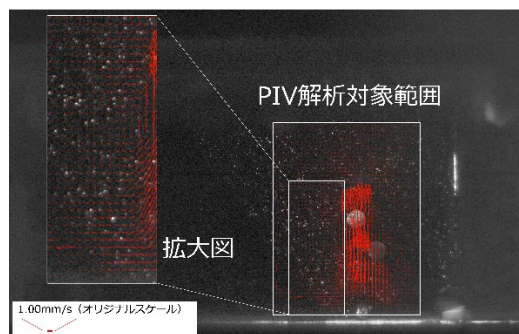


図4. 流速ベクトル図^[1]より引用

引用文献

[1]西嶋一欽*, 宮町凜太郎, 飯田琢也*, デュアルカメラ PIV による物体の軌跡と流れ場の同時計測, 令和3年度京都大学防災研究所研究発表講演会梗概, D213.

本報告書は、本研究申請書および本研究の成果として発表した内容を抜粋、要約し、また一部追記の上、再構成したものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kota Hayashi, Mamoru Tamura, Shiho Tokonami, and Takuya Iida	4. 巻 なし
2. 論文標題 Low-damage and large scale optical condensation of useful bacteria with bubble-mimetic substrate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 11926, Optical Manipulation and Structured Materials Conference 2021, 119260N (27 October 2021)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2616125	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 Kota Hayashi, Yasuyuki Yamamoto, Mamoru Tamura, Shiho Tokonami	4. 巻 4
2. 論文標題 Damage-free Light-induced Assembly of Intestinal Bacteria with a Bubble-mimetic Substrate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Biology (Nature Research)	6. 最初と最後の頁 385
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s42003-021-01807-w	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 Takuya Iida, Shota Hamatani, Yumiko Takagi, Kana Fujiwara, Mamoru Tamura, Shiho Tokonami	4. 巻 5
2. 論文標題 Attogram-level light-induced antigen-antibody binding confined in microflow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Biology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s42003-022-03946-0	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 Kana Fujiwara, Yumiko Takagi, Mamoru Tamura, Ikuhiko Nakase, Shiho Tokonami, Takuya Iida	4. 巻 -
2. 論文標題 Sensitive Detection of Biological Nanoparticles by Controlled Optical Force in Microflow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of CLEO-PR	6. 最初と最後の頁 -
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 -

〔学会発表〕 計33件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 西嶋一欽、宮町凜太郎、飯田琢也
2. 発表標題 デュアルカメラ PIV による物体の軌跡と流れ場の同時計測
3. 学会等名 京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飯田琢也、床波志保、中瀬生彦
2. 発表標題 ハイスループット光濃縮検査法の開発による感染症予防への展開
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会 イノベーション共創プログラム（CIP） 感染症を診断・予防するヘルスケアテクノロジー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飯田琢也
2. 発表標題 光濃縮による生化学反応加速と量子生命科学の新展開
3. 学会等名 量子生命科学先端フォーラム 2021冬の研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯田琢也、床波志保、中瀬生彦
2. 発表標題 光濃縮による生化学反応制御とフォトサーマルフルイディクスの展望
3. 学会等名 先端ナノミクス 講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuya Iida, Mayu Ueda, Yushi Nishimura, Mamoru Tamura, Syoji Ito, Shiho Tokonami
2. 発表標題 Rapid detection of femtogram proteins under light-induced assembly of photothermal nanoparticles in microchannel
3. 学会等名 Pacifichem 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kota Hayashi, Yasuyuki Yamamoto, Mamoru Tamura, Shiho Tokonami, Takuya Iida
2. 発表標題 Local fluorescent spectroscopy on damage-free optical condensation with bubble-mimetic substrate
3. 学会等名 Pacifichem 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuya Iida, M. Ueda, S. Hamatani, Y. Takagi, M. Tamura, S. Tokonami
2. 発表標題 Rapid and sensitive detection of proteins at solid-liquid interface under light-induced assembly of photoresponsive particles in microchannel
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science ~Toward Sustainable Development~(ISSS-9) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kota Hayashi, M. Tamura, S. Tokonami, Takuya Iida
2. 発表標題 Optical condensation of living bacteria with bubble-mimetic solid-liquid interface
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science ~Toward Sustainable Development~(ISSS-9) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masatoshi Kanoda, K. Hayashi, M. Tamura, S. Tokonami, Takuya Iida
2. 発表標題 Development of Plasmonic Surface with Periodic Nano-Bowls for Optical Condensation of Nanoparticles
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science ~Toward Sustainable Development~(ISSS-9) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kana Fujiwara, Y. Takagi, M. Tamura, I. Nakase, S. Tokonami, Takuya Iida
2. 発表標題 Specific Detection of Biological Nanoparticles by Microparticles with Molecularly-coated Surface under Optical Condensation in Microflow System
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science ~Toward Sustainable Development~(ISSS-9) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kota Hayashi, Mamoru Tamura, Shiho Tokonami, Takuya Iida
2. 発表標題 Low-damage and large scale optical condensation of useful bacteria with bubble-mimetic substrate
3. 学会等名 The 8th Optical Manipulation and Structured Materials Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大間知 誠也、林 康太、高木 裕美子、田村 守、床波 志保、飯田 琢也
2. 発表標題 異種プローブ微粒子によるDNAの固液界面での光誘導検出
3. 学会等名 応用物理学会第69回春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林康太、田村守、床波志保、飯田琢也
2. 発表標題 パブル模倣基板によるダメージフリー光濃縮と量子生命への展開
3. 学会等名 量子生命科学会第3回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 叶田雅俊、林康太、田村守、床波志保、飯田琢也
2. 発表標題 プラズモニク・ナノボウル基板によるナノ粒子の光濃縮検出
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原佳奈、高木裕美子、田村守、中瀬生彦、床波志保、飯田琢也
2. 発表標題 マイクロ狭小空間における生物学的ナノ粒子の選択的光誘起集積化
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原佳奈、高木裕美子、田村守、中瀬生彦、床波志保、飯田琢也
2. 発表標題 マイクロフロー系での光圧による生物学的ナノ粒子の特異検出
3. 学会等名 第81回分析化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 叶田雅俊、渡邊翔太、藤原佳奈、林康太、田村守、床波志保、飯田琢也
2. 発表標題 ナノボウル基板による生物学的ナノ粒子の光濃縮定量評価法の開発
3. 学会等名 第81回分析化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊翔太、本田杏奈、林康太、田村守、Olaf Karthaus、飯田琢也、床波志保
2. 発表標題 抗体修飾八ニカム基板による迅速細菌検出法の開発
3. 学会等名 第81回分析化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石倉諒汰、林康太、田村守、Olaf Karthaus、飯田琢也、床波志保
2. 発表標題 シアノバクテリア捕捉基板の電気化学特性
3. 学会等名 第81回分析化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林康太、田村守、床波志保、飯田琢也
2. 発表標題 バブル模倣型ダメージフリー光濃縮による有用細菌の機能分析への展開
3. 学会等名 第81回分析化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯田琢也、床波志保、中瀬生彦
2. 発表標題 生化学反応の光誘導加速システムが拓く生物物理の新展開
3. 学会等名 第58回日本生物物理学会年会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯田琢也、床波志保、中瀬生彦
2. 発表標題 光濃縮型超高感度バイオセンサーによる認知症研究への展開
3. 学会等名 第39 回日本認知症学会学術集会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯田琢也、床波志保、中瀬生彦
2. 発表標題 低ダメージ光濃縮によるスマート量子バイオフォトニクスへの展開
3. 学会等名 量子生命科学会第2回大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大間知誠也、林康太、石倉諒汰、田村守、床波志保、西嶋一欽、飯田琢也
2. 発表標題 圧力センサ開発に向けた金ナノ粒子添加液晶の光応答の圧力依存性解析
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大間知誠也、林康太、石倉諒汰、田村守、床波志保、西嶋一欽、飯田琢也
2. 発表標題 金ナノ粒子添加液晶の協力的光応答の圧力依存性の解析
3. 学会等名 第31回光物性研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大間知誠也、林康太、石倉諒汰、田村守、床波志保、西嶋一欽、飯田琢也
2. 発表標題 金ナノ粒子添加コレステリック液晶を用いた光計測型圧力センサの開発
3. 学会等名 第80回分析化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯田琢也
2. 発表標題 光誘導加速システムが拓く次世代医工計測とヘルスケア
3. 学会等名 第55回光学四学会関西支部連合講演会 医療・健康・ヘルスケアと光（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuya Iida, Shiho Tokonami, Ikuhiko Nakase
2. 発表標題 Light-induced acceleration of biochemical reactions mediated by plasmonic nanoparticles
3. 学会等名 The 13th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNF013)（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kana Fujiwara, Yumiko Takagi, Mamoru Tamura, Ikuhiko Nakase, Shiho Tokonami, Takuya Iida
2. 発表標題 Detection of Biological Nanoparticles by Controlled Optical Force in Microflow
3. 学会等名 CLEO-PR 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小森弘稀、藤原佳奈、勝間田麻美、高木裕美子、田村守、中瀬生彦、床波志保、飯田琢也
2. 発表標題 マイクロフロー光濃縮による疾患マーカー生体ナノ物質の高効率検出
3. 学会等名 第33回光物性研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊内秀一、大間知誠也、林康太、高木裕美子、田村守、床波志保、飯田琢也
2. 発表標題 異種プローブの光濃縮による迅速・高感度なDNA定量分析法の開発
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤原佳奈、高木裕美子、田村守、中瀬生彦、床波志保、飯田琢也
2. 発表標題 マイクロフロー光濃縮による細胞外小胞の表面状態の高感度検出
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小森弘稀、藤原佳奈、勝間田麻美、高木裕美子、田村守、中瀬生彦、床波志保、飯田琢也
2. 発表標題 生物学的ナノ粒子と生体分子の弱量子結合の光誘導加速における重力効果
3. 学会等名 量子生命科学会第4回大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 安川智之、床波志保、飯田琢也、前田耕治	4. 発行年 2020年
2. 出版社 化学同人	5. 総ページ数 17
3. 書名 機器分析ハンドブック2 高分子・分離分析編「11章 電気分析化学」	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 被検出物質の検出方法および被検出物質の検出システム	発明者 飯田琢也、床波志保、中瀬生彦	権利者 公立大学法人大阪 大阪府立大学
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2020/032758	出願年 2020年	国内・外国の別 外国

〔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	飯田 琢也 (Iida Takuya) (10405350)	大阪府立大学・理学(系)研究科(研究院)・教授 (24403)	
研究分担者	床波 志保 (Tokonami Shiho) (60535491)	大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (24403)	

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