

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14103

研究課題名（和文）波面ホログラム最適化による音響立体ディスプレイの性能向上

研究課題名（英文）Performance Improvement of Acoustophoretic Volumetric Display through the Optimization of Acoustic Hologram

研究代表者

伏見 龍樹（FUSHIMI, Tatsuki）

筑波大学・図書館情報メディア系・助教

研究者番号：60890944

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、音響ホログラムを最適化し、音響立体ディスプレイの性能向上に寄与する技術を開発しました。具体的には、以下の3つの成果を達成しました。【1 ホログラム最適化手法の拡張】音響ホログラムの最適化アルゴリズムを開発し、音の振幅と位相を同時に制御できることを実証しました。【2 更新速度の向上】音響を使って物体を動かす新しい方法を解析し、振動子の位相を高速に変えずに物体を移動させるシステムを開発しました。【3 画質の向上】音圧や位相を記録しながら最適化を行うシステムを開発し、平衡位置も校正できるシステム開発に成功しました。これらの成果は、音響立体ディスプレイ技術の更なる発展に貢献します。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、音響立体ディスプレイの性能向上を目指し、音響ホログラムの最適化を行った。ホログラム最適化手法を拡張し、音の振幅と位相を同時に制御できることを実証しました。これにより、音響装置の開発において重要な指針が得られた。また、更新速度の向上に関して、音響を使って物体を動かす新しい方法を発見した。これにより、振動子の設定を変えずに物体を移動させることが可能となった。さらに、画質の向上を目指して、音圧や位相を記録しながら最適化を行うシステムを開発し、目標の達成のみならず、平衡位置の校正にも成功した。これらの成果は、音響立体ディスプレイ技術の発展に貢献し、さまざまな分野での応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to improve the performance of acoustophoretic volumetric display by using acoustic hologram optimization. Specifically, we achieved the following three results: 【(1) Extension of hologram optimization methods】We developed an optimization algorithm for acoustic holograms and demonstrated that it is possible to control both the amplitude and phase of sound simultaneously. 【(2) Improvement in update speed】We analyzed a new method for moving objects using sound and found that it is possible to develop a system that moves objects without rapidly changing the phase of the oscillators. 【(3) Improvement in image quality】We developed a system that records sound pressure and phase while optimizing, and successfully implemented system that also optimizes equilibrium position. These achievements contribute to the advancement of acoustophoretic volumetric display technology and have potential applications in other scientific fields.

研究分野：音響浮揚，音響立体ディスプレイ，音響ホログラム

キーワード：音響立体ディスプレイ 音響浮揚 音響ホログラム 最適化 自動微分 実験的最適化 位相勾配

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

裸眼 3D ディスプレイや AR グラスの開発される中、複数のユーザーが同時に 3D 映像を鑑賞できるディスプレイの需要が高まっている。2018 年に、研究代表者らは超音波を利用して浮遊する物体を高速で移動させることにより、SF 小説に登場するようなディスプレイのプロトタイプを実証し、そのようなディスプレイが技術的に可能であることを示した (音響立体ディスプレイ)¹。しかし、現状の音響立体ディスプレイは画質の劣化や更新速度の制限などの問題があり、実用化にはまだ遠い。

音響立体ディスプレイの更新速度を向上させるためには、音響波によって生成される音響放射力を最大化し、その力を高速に更新できることが必要である。初期プロトタイプでは、対向する音響振動子を設置し、定在波を利用している。この手法は最も強い音響放射力を生成するため、最も合理的だと考えられていた。また、理論モデル²も定在波を用いたシステムを想定し、浮遊体は箸で掴むように二つの圧力が高い間に挟み、音圧が低いところに引き寄せられるのが合理的かつ常識的な手法である。

しかし、このようなシステムを想定すると、密度が極端に低い物体を用いたディスプレイの運用が必要となり、発泡スチロールやエアロゲルなどの低密度材料を用意しなければならない。低密度の物体を理想的な球形に保つことは困難であり、実用化に向けては密度が高くても普遍的に存在し、調達が容易で安全であり、室内を汚さない液体や固体を用いたディスプレイの開発が望ましい。研究開始当時、これらの問題に対する解決策は存在しなかったため、音響立体ディスプレイの更新速度を向上させるには、振動子の駆動方法を工夫して低密度材料を想定した理論限界まで達成することが重要であると考えられた。

また、音響浮遊装置を実験環境で使用すると、数値モデルでは予測できない場の乱れが発生^{1,2}し、それが画像の乱れや画質低下の原因となることが研究代表者らの研究によって明らかになっている。この問題を解決するためには、実験環境での場の乱れを実験的に計測しながら補正し、画質の向上を図ることが求められている。

2. 研究の目的

そこで本研究プロジェクトではそのような現状を鑑みて、画質劣化と更新速度制限を音響ホログラム (超音波装置の設定値) の観点から挑戦することで、機能制限を突破することを目的とした。研究代表者らは分野内で最も精度が高い音響ホログラムの最適化手法を開発³しており、本研究ではこの最適化法をそれぞれの分野で適用することで、場の歪みの補正や振動子の駆動手法を最適化することを目指して申請を行った。

3. 研究の方法

【(1) ホログラム最適化手法の拡張】

音響ホログラムの最適化手法は音響立体ディスプレイの根幹ともいえる技術であり、その精度や機能拡張は音響立体ディスプレイで実現可能な表現幅に直結する。音場は位相と振幅に分割することができ⁴、音響浮揚装置も複数の振動子の位相と振幅を調整することで浮揚場所を変更可能である。これまでの音響ホログラムの最適化においては、音響浮揚装置の位相と振幅 (若しくは位相のみ) を調整し、音場の振幅のみを指定する形式が一般的であり、その他の組み合わせ (例えば振動子の振幅のみを調整して、音場の位相を調整する) では実証されていなかった。研究代表者らは様々な駆動様式と音場を組み合わせ、最適化する手法を開発し、まず、ホログラム最適化技術の拡張を行った。

【(2) 更新速度の向上】

当初の予定では、振動子の駆動手法の開発にあたる予定であったが、研究プロジェクトの開始直後に更新速度の向上に纏わる非連続的な向上を示唆する現象を実験中に発見したため、その現象の精査から取り組んだ。超音波装置で進行波のみの焦点を生成するように設置し、波長の 1/4 以上 ($40 \mu\text{m}$ 以上) の液滴を撥水メッシュの上に置いたうえで焦点に移動させると液滴が空中に 10 cm 以上跳躍することが発見された。この組み合わせは **図 1** で示す斜線の領域であることを示し、**定在波を用いても $40 \mu\text{m}$ の液滴を操作するのは困難**^{5,6}である。

それを容易に操作し、空中に跳躍させる技術はこれまでに無く、他の非接触液滴操作手法 (例えば、EWOD や光操作、静電場⁷⁻¹⁴) を用いた手法でも数 cm 跳躍させるのが限界である。前述のとおり、強力な音響放射力を生成できることが、音響立体ディスプレイの更新速度向上に寄与する為、音響立体ディスプレイの新たな操作モードとして活用可能性が想像される。

更に、この音響放射力の新たな運用モードのみならず、液滴が跳躍しない振幅まで音圧を下げ

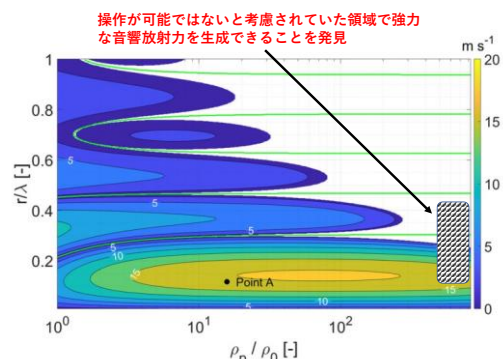


図 1: 新規現象. [2]より引用

ると液滴が焦点に引き寄せられる現象を発見した。前述のとおり、空中の音響操作では浮揚体は音圧が高いところに引き寄せられることが前提・常識的にあり、音圧が高いところに引き寄せられる現象は水中音響^{15,16}などでしか報告されていない。水中で音圧が高いところに引き寄せられる現象はBruusによる論文で明快に（操作対象物と音波伝搬媒体の密度差, Acoustic Contrast Factorにより）説明がつく¹⁵が、空中では全ての物体が音波伝搬媒体（空気）よりも密度が高い為、**Acoustic Contrast Factorのみでは説明不可能な現象**を確認した。

振幅が高いところに引き寄せられる現象は、位相勾配を用いた物体移動の可能性も期待できる。これまで、空中音響では浮揚した物体の位置を振動子の駆動シグナルを高速に変更しながら物体を移動させていたのに対し、**振動子のシグナルを更新せずとも物体が音場の勾配に沿って自動的に移動¹⁶⁻¹⁸が可能となることを示し、現状のシステムに比較して非連続的なシステム改善が将来的に期待**された。

上記のような発見があったため、新たな音響立体ディスプレイの道筋を立てるためにも初年度は高速カメラを用いて液滴の動作を解析し、理論モデルを構築することで理解を深めた。研究当初は液滴のみでしか観察されず、音響浮揚に一般的に使用する低密度発泡スチロール球体（直径1mmほど）では高音圧に引き寄せられるなどの現象は観察されなかった。よって、液滴自体がばねのようになり跳躍する可能性（EWODなどでの跳躍はこの現象を用いる）があったが、高速カメラで解析したところ、液滴の形状に変化は起きず、音波を照射した瞬間に跳躍していることが確認できたため、音響放射力を用いて跳躍していることが確認された。

近年まで、Rayleigh領域（波長の10分の1以上のサイズ）の物体の音響放射力の計算は困難であったが、理論モデル（Andersson & Ahrens¹⁹とZehnter et al.²⁰）を用いて解析を進めたところ、理論的に焦点に集まる現象が発生することが確認でき、理論・実験の双方から、現象を理解することに成功した。

2年目にはこの理解を基に、音響ホログラムの最適化を行った。現在はメッシュの上で操作を行う為、2次元（X-Y）方向での安定性のみを保証することで操作できるが、音響立体ディスプレイとして活用するためにはX-Y-Zの3軸で安定させる必要がある。また、Aで開発した音響ホログラム最適化を活用して、物体が自動移送される音場が作成可能であるか検証を進めた。

【(3) 画質の向上】

画質の向上については当初予定通りに研究を遂行し、実験的にしか発生しない音場の補正に取り組んだ。数値モデルにおいては高い精度を達成する自動微分型音響ホログラム最適化を活用し、実験的に計測した音圧を数値モデルとの誤差として代入することで、数値モデルから得られるロス関数の勾配を使用しながら、**実験値と目標値の差の最小化**を行った（図2）。これらは既に、光学²¹や人工知能²²の分野で実証されており、本研究はその手法を応用して音響場の最適化を行った。1年目にはアルゴリズムと実験設備の設営から行った。XYZステータジとUSB型オシロスコープを活用して、自動的に任意点から音響音圧を取り、最適化するシステムまで開発した。

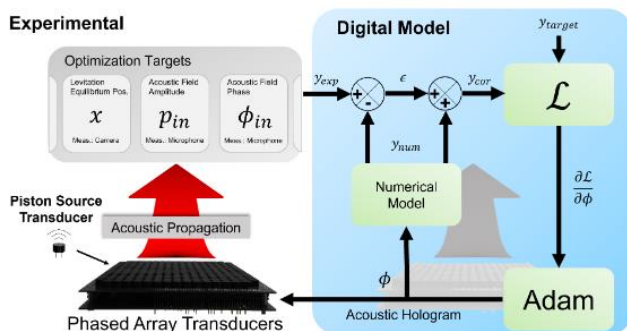


図2：実験的最適化システム

2年目にはこのシステムを更に拡張させ、(1)で開発した最適化アルゴリズムが実験環境でも活用できることを実証し、どのような場面で実験的最適化アルゴリズムが必要となるのか検証を行った。当初予定では実験的に得られたデータを基にニューラルネットに学習させ、実験とモデルとの差分の炙り出しを行う予定であったが、残念ながら学習が上手く行われなかった。

しかし、本研究の目的は画質の向上であることを念頭に考慮した結果、研究当初にはない新規手法に着想し、その開発に着手した。数値モデルから平行位置を予測させると線形的に平衡位置が算出可能であるが、実験的には非線形的な関係^{1,23}にある。研究開発当初は、実験データを基にニューラルネットを実験モデルを構築し、実験モデルから音響放射力を算出し、平衡位置の最適化アルゴリズムを開発することを念頭に置いていたが、**実験を通して実験的最適化手法のロバスト性が高いことを見出した**。そこで、平衡位置を実験的に光学カメラを用いて計測し、平衡位置を修正する実験的最適化アルゴリズムの開発に2年目の後半では取り組んだ。

4. 研究成果

【(1) ホログラム最適化手法の拡張】

早期に音響ホログラム最適化アルゴリズムの開発を終え、その機能や性能を明らかにした。空中超音波において音場の振幅と位相を同時に変調できるアルゴリズムの開発に初めて成功し、「Target acoustic field and transducer state optimization using Diff-PAT」としてAIP

Advances に発表し, Editor's Pick に選出された. 最適化のロス関数には表れないが, 超音波装置の駆動方法によって音場の性質が異なることが判明し, 今後の音響装置の開発においても重要な指針となることが期待される. また, Wiley 社による専門書 Acoustic Technologies in Biology and Medicine において, 「Acoustic Levitation and Acoustic Hologram」 についての章を依頼され, 本研究プロジェクトの一部について言及し, 現在審査中である.

【(2) 更新速度の向上】

研究開発を進めた結果, 発見した現象を定量的に解析し, 原理現象を音響放射力のモデルを用いて説明可能であることを示した. この新規現象を用いれば, 位相勾配を用いて自動的に物体を移動させることが判明し, 今後は空中超音波でも振動子の位相設定を変更せずとも, 自動的に物体を移送できるシステムの導入が進む. 残念ながら, 駆動手法を2次元から3次元に増やして操作する手法まで今回の研究予算では発展しなかったが, 位相勾配による音響放射力や音場のトポロジーへの理解を進めることで, 3次元的に振動子を駆動せずとも一定の軌道をたどるシステムの開発が期待される. このようなシステム自体が斬新である為, システム構想を発表するペーパーを現在投稿中 (プレプリント

<https://jxiv.jst.go.jp/index.php/jxiv/preprint/view/166>) であり, 特許申請中である. システム構想の応用については, 幅広い分野での応用が期待できるため, 国内外屈指の研究グループに研究協力を仰ぎ, 応用性も広く含んだ内容となっている. また, 位相勾配を用いて位相可能である点や原理現象のモデル解析を含めた論文も現在, 準備中である. 今後も, このシステムを活用した応用が音響立体ディスプレイのみならず, 科学領域全体で活用されることが期待される.

【(3) 画質の向上】

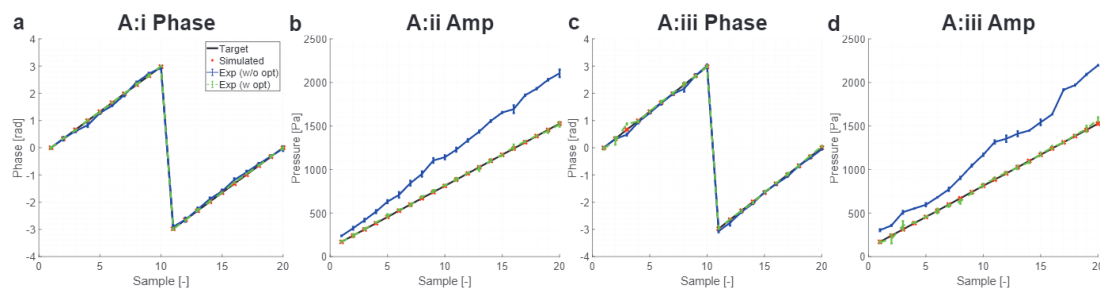


図 3 : 実験的最適化システムの性能

実験的にマイクロホンで音圧や位相を記録しながら最適化するシステム開発に成功し, 図 3 のようにターゲットを完璧に達成するシステムを開発した. 実験を通して, 数値モデルと実験では位相計算は完璧に一致し, 音圧計算のみがずれていることが判明した. 他方, 実験における非線形性について検証を進めたところ, 非線形現象の影響が少なくても数値モデルと実験とで差が発生することが判明した. これらの知見は今後ともにモデルの差の同定に資するノウハウとなる. また, このシステムを発展させることで平衡位置を光学的に捕捉し, 修正することに成功した (図 4). 当初予定であったニューラルネットワークの開発には至らなかったが, 最終目的へ着実に進めた. これらの成果は現在, 国際論文誌において査読中であり, プレプリントとして Jxiv に既に公開してある.

参考文献

1. Fushimi, T., Marzo, A., Drinkwater, B. W. & Hill, T. L. Acoustophoretic volumetric displays using a fast-moving levitated particle. *Appl Phys Lett* **115**, 64101 (2019).
2. Fushimi, T., Drinkwater, B. W. & Hill, T. L. What is the ultimate capability of acoustophoretic volumetric displays? *Appl Phys Lett* **116**, 244101 (2020).
3. Fushimi, T., Yamamoto, K. & Ochiai, Y. Acoustic hologram optimisation using automatic differentiation. *Sci Rep* **11**, 12678 (2021).
4. Fushimi, T., Yamamoto, K. & Ochiai, Y. Target acoustic field and transducer state optimization using Diff-PAT. *AIP Adv* **11**, 125007 (2021).

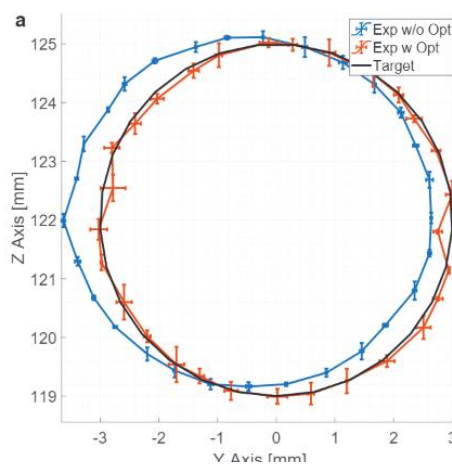


図 4 : 平衡位置を実験的に最適化することに成功

- (2021).
5. Marzo, A., Barnes, A. & Drinkwater, B. W. TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator. *Review of Scientific Instruments* **88**, 085105 (2017).
 6. Foresti, D., Nabavi, M., Klingauf, M., Ferrari, A. & Poulidakos, D. Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **110**, 12549–12554 (2013).
 7. Enright, R. *et al.* How coalescing droplets jump. *ACS Nano* **8**, 10352–10362 (2014).
 8. Takeda, K., Nakajima, A., Hashimoto, K. & Watanabe, T. Jump of water droplet from a super-hydrophobic film by vertical electric field. *Surf Sci* **519**, 3–6 (2002).
 9. Boreyko, J. B. & Chen, C. H. Self-propelled jumping drops on superhydrophobic surfaces. *Physics of Fluids* **22**, 1–2 (2010).
 10. Li, N. *et al.* Ballistic Jumping Drops on Superhydrophobic Surfaces via Electrostatic Manipulation. *Advanced Materials* **30**, 1703838 (2018).
 11. Traipattanakul, B., Tso, C. Y. & Chao, C. Y. H. Study of jumping water droplets on superhydrophobic surfaces with electric fields. *Int J Heat Mass Transf* **115**, 672–681 (2017).
 12. Wang, Z. *et al.* Jumping drops on hydrophobic surfaces, controlling energy transfer by timed electric actuation. *Soft Matter* **13**, 4856–4863 (2017).
 13. Jun Lee, S., Lee, S. & Hyoung Kang, K. Droplet jumping by electrowetting and its application to the three-dimensional digital microfluidics. *Appl Phys Lett* **100**, (2012).
 14. Liu, F., Ghigliotti, G., Feng, J. J. & Chen, C. H. Numerical simulations of self-propelled jumping upon drop coalescence on non-wetting surfaces. *J Fluid Mech* **752**, 39–65 (2014).
 15. Bruus, H. Acoustofluidics 7: The acoustic radiation force on small particles. *Lab Chip* **12**, 1014–21 (2012).
 16. Melde, K., Mark, A. G., Qiu, T. & Fischer, P. Holograms for acoustics. *Nature* **537**, 518–522 (2016).
 17. Cox, L., Melde, K., Croxford, A., Fischer, P. & Drinkwater, B. W. Acoustic Hologram Enhanced Phased Arrays for Ultrasonic Particle Manipulation. *Phys. Rev. Applied* **12**, 64055 (2019).
 18. Li, J., Lv, Z., Hou, Z. & Pei, Y. Comparison of balanced direct search and iterative angular spectrum approaches for designing acoustic holography structure Comparison of balanced direct search and iterative angular spectrum approaches for designing acoustic holography structure. *Applied Acoustics* **175**, 107848 (2020).
 19. Andersson, C. & Ahrens, J. Acoustic Levitation from Superposition of Spherical Harmonics Expansions of Elementary Sources: Analysis of Dependency on Wavenumber and Order. *IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS 2019-October*, 920–923 (2019).
 20. Zehnter, S., Andrade, M. A. B. & Ament, C. Acoustic levitation of a Mie sphere using a 2D transducer array. *J Appl Phys* **129**, 134901 (2021).
 21. Peng, Y., Choi, S., Padmanaban, N. & Wetzstein, G. Neural Holography with Camera-in-the-loop Training. *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH Asia)* **39**, 1–14 (2020).
 22. Wright, L. G. *et al.* Deep physical neural networks trained with backpropagation. *Nature* **601**, 549–555 (2022).
 23. Fushimi, T., Marzo, A., Hill, T. L. & Drinkwater, B. W. Trajectory Optimization of Levitated Particles in Mid-Air Ultrasonic Standing Wave Levitators. *2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)* 1–9 (2018) doi:10.1109/ULTSYM.2018.8580093.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Fushimi Tatsuki, Yamamoto Kenta, Ochiai Yoichi	4. 巻 11
2. 論文標題 Target acoustic field and transducer state optimization using Diff-PAT	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 125007 ~ 125007
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0069182	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 Tatsuki Fushimi, Daichi Tagami, Kenta Yamamoto, Yoichi Ochiai	4. 巻 -
2. 論文標題 In-situ Optimization of Acoustic Hologram with Digital Twin	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Jxiv	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.51094/jxiv.249	査読の有無 無
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 Yusuke Koroyasu, Thanh-Vinh Nguyen, Shun Sasaguri, Asier Marzo, Inigo Ezcurdia, Yuuya Nagata, Takayuki Hoshi, Yoichi Ochiai, Tatsuki Fushimi	4. 巻 -
2. 論文標題 Acoustic Needles: 3D Microfluidics using Focused Ultrasound passing through Hydrophobic Meshes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Jxiv	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.51094/jxiv.166	査読の有無 無
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

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 粒子操作装置、及び粒子操作方法	発明者 伏見龍樹, 落合陽一, 垣安祐輔	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-122138	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

Applied Diff-PAT

<https://zenodo.org/record/5701914#.YljaJ0hByUk>

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

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