

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：55301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03991

研究課題名（和文）磁力を利用した変位縮小機構による微細作業用ピンセットの開発

研究課題名（英文）Development of Precision Tweezers Based on Displacement Reduction Mechanism Using Magnetic Force

研究代表者

野村 健作（Nomura, Kensaku）

津山工業高等専門学校・総合理工学科・教授

研究者番号：80198621

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：顕微鏡下で使うマイクロツールは、人の指先のような器用な動作が高精度にできることが求められるため、圧電アクチュエータや静電アクチュエータを利用したアプローチが主流であるが、インターフェースや電源により主体装置である顕微鏡本体よりも肥大化してしまうことが課題である。そこで指先の動きが力学的にエンドエフェクターへ繋がるメカニカルなリンク機構を見直し、磁力によって弾性体を変形させる変位縮小機構を開発し、1/1000倍を超える高い変位縮小率が得られることを確認した。さらに、この動作原理を応用して顕微鏡に搭載できるサイズで精密ピンセットを開発して有効性を実験的に検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

顕微作業は、2～3cmの指先の動作を約1/1000倍して顕微鏡の作業空間へ伝えるツールが望まれ、電動あるいは油圧マニピュレータで大きく位置決めした後ピエゾで精密位置決めするような組合せ機構でしか実現できない。つまり2～3cmの変位を単体の機構で1/1000倍する縮小するのは、現在技術の欠落している穴場であり、解決すべき課題である。開発した磁力を用いた変位縮小機構は、数cmの変位を直接入力でき、1/1000倍を超える変位縮小率を有する単一体の機構であり、顕微作業用の定番ツールになり得ることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：Microtools used under a microscope are required to be able to perform dexterous movements similar to those of a human fingertip with high precision. Currently, the mainstream approach is to use piezoelectric actuators or electrostatic actuators, but the problem is that they become larger than microscopes due to interfaces and power supplies.

We reexamined the mechanical link mechanism in which the movement of the fingertips dynamically connects to the end effector, and developed a displacement reduction mechanism that deforms an elastic body using magnetic force. As a result, we confirmed that a high displacement reduction ratio of more than 1/1000 times could be obtained. Applying this operating principle, we developed precision tweezers that can be mounted on a microscope and experimentally verified their effectiveness for microscopic work.

研究分野：超精密アクチュエータ

キーワード：変位縮小機構 マイクロマニピュレーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光学顕微鏡で観察しながら行う微細作業は、マイクロメータオーダの作業空間の中で行われ、人が指先で直接操作できる限界を超えている。微細切削加工作業においてもサブミリオーダの部品は肉眼で識別できる大きさではなく、セッティング作業に多大な時間と労力を要し困難を極めていることが報告されている。このため微細手術支援ロボット da Vinci^①のようなマスタースレーブ機構によって人の指先動作を微細空間に再現できれば、作業効率が向上するものと期待できる。ただし、da Vinci のマスタースレーブのモーションスケールは 1/1~1/5 であり、微細作業には縮小率が不足している。

一方、圧電素子の発生変位をリンク機構によって変位変換する機構が普及している。原子間力顕微鏡を用いた先端研究^②にも基盤技術として不可欠な装置として機能している。最近では、圧電素子の変位量を拡大する変位拡大機構としても利用され^③、工夫しだいでリンク機構の潜在的活用例はまだ多く存在すると考えられる。しかし、対偶での遊びや摩擦のあるリンク機構には位置決め性能に限界があり、マイクロメートルオーダの微細作業にはリンク連結部に課題が残されている。

これまでのメカニカルなリンク機構による変位縮小機構には、手術器具として使われる鉗子や原画を縮小・拡大転写するパンタグラフ機構があり^④、直感的操作が可能なマニピュレータとして注目されている。これらは、リンク機構を使って指先の動きを縮小するには適しているが、リンク長の比率を変えても 1/10 以下の縮小率を得るのは困難であることと、支持部の遊びや摩擦からスティックスリップが発生することから分解能に限界がありマイクロメートルオーダの微細作業には向いていない。

このように、指先の 2~3cm の入力変位に対して 20~30 μm の変位を出力し、光学顕微鏡のステージ上に搭載できる寸法をもつ変位縮小機構は実現の難しい技術的穴場となっている。

2. 研究の目的

通常、医療、バイオ、化学の分野で行われる顕微作業は、2~3 cmの指先の動作を約 1/1000 倍して顕微鏡の作業空間へ伝えるツールが望まれ、電動あるいは油圧マニピュレータで大きく位置決めした後ピエゾで精密位置決めするような組合せ機構でしか実現できない。つまり 2~3 cm の変位を単体の機構で 1/1000 倍する縮小するのは、現在技術の欠落している穴場であり、解決すべき課題である。提案する変位縮小機構は、従来のメカニカルな機構から逸脱した動作原理に基づき、1/1000 倍の縮小率を単体で実現する機構である。2~3cm の入力変位に対して 20~30 μm の変位を出力し、光学顕微鏡のステージ上に搭載できる寸法をもつ変位縮小機構を開発することを目的としている。これまでの変位縮小技術には、テコを使った 1/10~1/100 の変位縮小率をもつレバー機構や平行リンク機構とピエゾ素子を駆動源とする弾性体機構がある。レバー機構では変位縮小率が不足し、ピエゾ素子による弾性体機構では 2~3 cm の入力変位をダイレクトに伝えることができない問題点があるので、目的とする入力変位と出力変位をもつ変位縮小機構をつくるには、テコで一端縮小した変位をさらに弾性ヒンジで縮小するしかない。しかし、この方法では装置全体の小型化に不利であるのと出力変位をマイクロツールに伝達することも困難である。つまり、テコや弾性ヒンジを使ったメカニカルな機構では手動で与えた入力変位を縮小して顕微鏡下の微細空間で取り出すことは困難である。

本研究では、つぎの 3 ステップを踏んで顕微作業用精密ピンセットを開発する。

- (1) これまでのメカニカルなリンク機構による変位縮小機構を見直し、磁力を用いた無電力変位縮小機構を提案する。本機構は、現存技術では困難とされる数 cm の指先の動きをマイクロメートルオーダへ単体機構で変位縮小できる原理を有し、手振れが伝わりにくい構造となっている。これらの特徴を実験的に検証するとともに、様々な微細作業に対応するために発生変位や変位縮小率の調整方法および発生力特性について考察する。
- (2) 開発した変位縮小機構の基本特性を高分解能レーザ変位計で高精度測定を実施して 1/1000 倍の変位縮小率が得られることを検証するとともに、2 自由度変位縮小機構を開発して発生変位特性と発生力および操作性について調査する^⑤。
- (3) 狭隘な作業空間である顕微鏡ステージ上に搭載できるサイズに小型化した精密ピンセットを製作してその基本性能を検証する^⑥。

3. 研究の方法

(1) 1 自由度変位縮小機構

図 1 に変位縮小機構の動作原理を示す。磁力によって吸引される弾性ビームの撓み量を永久磁石の位置で調整する機構であり、弾性ビームの先端にマイクロピペットのようなエンドエフェクターを取り付け、永久磁石を手動で操作することを想定している。無電力で駆動できること、手振れが弾性ビームには

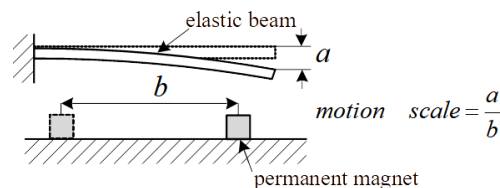
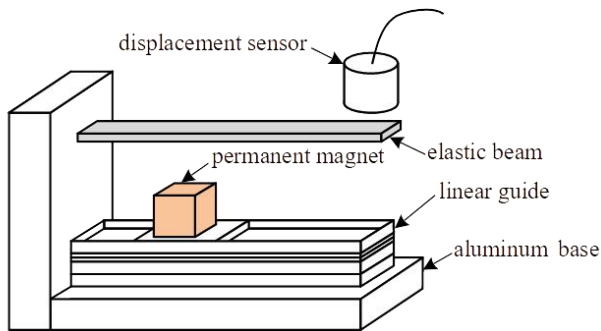


図 1 変位縮小機構の動作原理

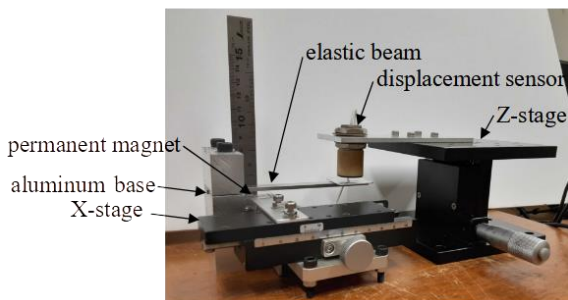
伝わりにくい構成であること、数 cm の入力変位を受け入れることができ、単一体構造で実現できることが特徴である。

図 2 は磁力を用いた変位縮小機構の概略である。実験装置は、図 2 (a) に示すように弾性ビーム、永久磁石とそれを移動させるリニアガイド、固定するためのアルミニウムベースおよび変位センサから構成されている。永久磁石を指でリニアガイドに沿って移動させることで弾性ビーム先端の撓み量を調整する動作原理となっている。図 2 (b) は、変位センサの位置決め用の Z 軸ステージと永久磁石を移動させるための X 軸ステージを含めて実際に構成した実験装置である。弾性ビームは、一般構造用圧延鋼材 (SS400 3mm×10mm) の素材を長さ 104.4mm の片持ち梁状にアルミニウムベースに固定した。永久磁石は、大きさ 10mm×10mm×10mm で表面磁束密度 420mT のネオジウム磁石を利用した。変位センサには、非接触型の渦電流式変位センサ (新川電機製 VC060) を利用した。センサ端面の直径 (22mm) より弾性ビームの幅が狭いため、アルミニウム平板をセンサターゲットとして弾性ビーム先端に貼り付けている。センサの中心位置は弾性ビームの固定端より 88.5mm である。また、永久磁石と弾性ビーム間の磁場を歪めないようにするため、リニアガイドに使われるベアリングボールや各要素を固定するためのビスを除きアルミ素材で作られる要素を利用した。この装置によって永久磁石の移動量と弾性ビームの撓み量の関係を調査した。

また、本機構の発生力特性は撓み量と荷重の関係から計算して求める。図 3 に示すように弾性ビーム先端で微小物を押しつける力を求める。磁石の位置で先端が微小対象物に接したとすると、磁石をさらに先端側へ移動させることで微小物に押しつける力を加えることができる。このとき微小物は移動せず押し付け力に耐えているとすると弾性ビームは撓むことがないので磁力が先端側に移動するだけとなり、徐々に発生力は大きくなる。



(a) experimental equipment configuration



(b) experimental equipment setup

図 2 1 自由度変位縮小機構の実験装置

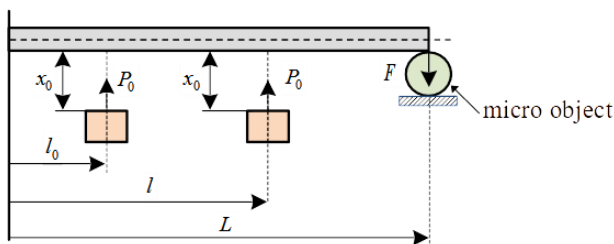


図 3 発生力の定義

(2) 変位縮小率の高精度測定と 2 自由度変位縮小機構

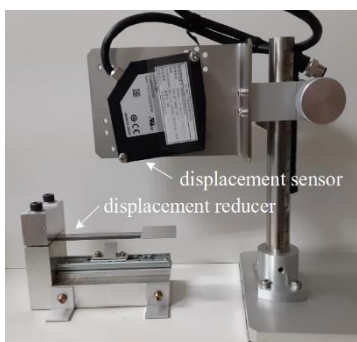


図 4 高精度センサを用いた測定系

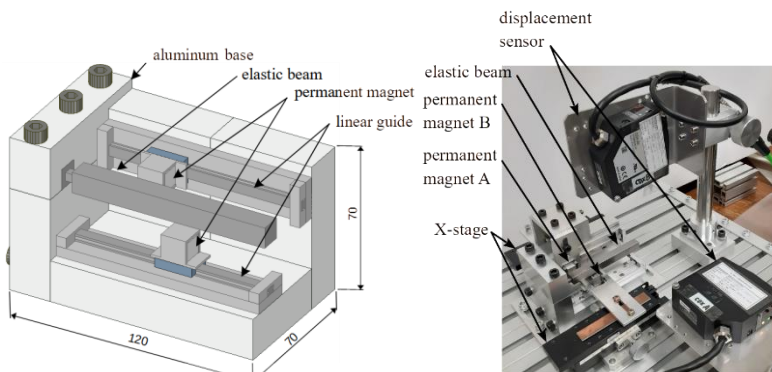


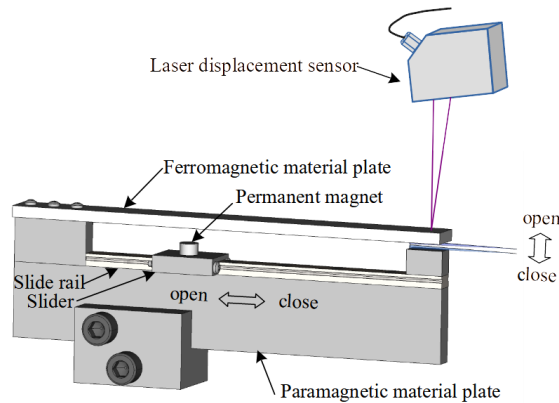
図 5 2 自由度変位縮小機構

図 4 は構成した 1 自由度変位縮小機構の弾性ビームの撓みを高精度レーザ変位センサ (オプテックス・エフエー株式会社 CDX-85) で測定するための装置であり、他の構成は図 2 で示した装置と同じである。

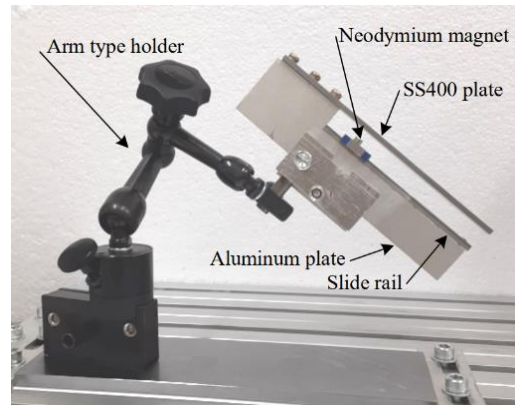
図 5 に 2 自由度変位縮小機構の構成を示す。弾性ビームを水平方向と垂直方向に吸引するように 2 つの永久磁石 (A, B) を配置している。弾性ビーム (SS400 10mm×10mm) は、ヒンジ部を設

けて撓みやすいように加工している。

(3) 顕微作業用精密ピンセット



(a) Precision tweezers



(b) Developed precision tweezers

図6 顕微作業用精密ピンセット

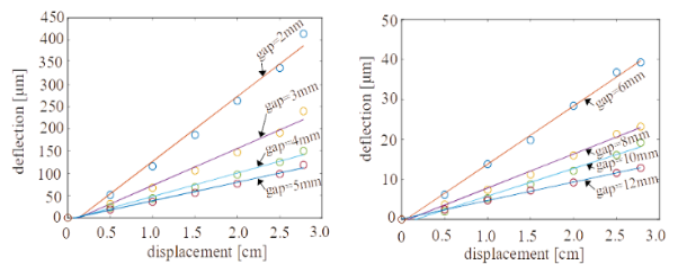
図6 (a)は、磁力を用いた変位縮小機構で構成した精密ピンセットの構成要素を示している。ピンセットは、永久磁石で駆動される強磁性体素材の弾性ビーム(SS400鋼板)と磁力に影響されない常磁性体素材のアルミニウム平板から構成され、磁石の移動によって先端が開閉動作を行う。また、光学顕微鏡のステージに搭載できるように小型化を図っている。弾性ビームは寸法9×3×140mmのSS400鋼板と厚さ5mmのアルミニウム平板に固定したスライドレールを移動するスライダー上に永久磁石(φ5×3mm 表面磁束密度385mT)を載せている。この精密ピンセットは図6 (b)に示すように、汎用のアームホルダーに取り付けて比較的自由的な姿勢で顕微鏡ステージに設置できるようにしている。この装置により、ピンセットの開閉量と発生力特性を調査した。

4. 研究成果

(1) 1自由度変位縮小機構

図7に1自由度機構における永久磁石の移動量と弾性ビーム先端の撓み量の測定結果を示す。ここでは、高精度レーザ変位センサを用いたときの結果を示す。永久磁石と弾性ビーム間のギャップはリニアガイドの下にアルミニウム平板を挟み込むことで調整した。実線は測定値を一次近似した直線である。フルストローク(弾性ビーム先端の最大撓み量)と変位縮小率をまとめると表1のようになる。ギャップを大きくすることによって高い変位縮小率を得ることができるが、対象物によってはフルストロークが不足する場合もあるので適切なギャップを選択する必要がある。フルストロークはギャップによって調整できるので、微細作業によって求められるフルストロークになるようにギャップを設定すればよい。ここでは、光学顕微鏡の実視野の大きさとギャップの設定法を示す。顕微鏡で視認しながらプローブで動き回る微生物を捕獲するような場合、プローブには実視野を超えるフルストロークが要求される。光学顕微鏡の実視野は接眼レンズの視野数と対物レンズの倍率で決まり、たとえば、接眼レンズの視野数が20で倍率が10倍、40倍、60倍、80倍の対物レンズを使用した場合、実視野の直径はそれぞれ2.0mm, 0.50mm, 0.33mm, 0.25mmとなる。10倍の対物レンズを使用したときにはフルストロークが不足するが、それぞれギャップは2mm, 3mm, 4mm, 5mmに設定すればよい。

図3に示すように弾性ビーム先端が対象物を押し付ける力を発生力として定義し、永久磁石を移動させることで増加する発生力を求めると最大発生力はギャップが2mmのときの9.34Nである。



(a) gap=2mm~5mm

(b) gap=6mm~12mm

図7 磁石移動量と弾性ビームの撓み量

表1 1自由度変位縮小機構の基本特性

gap (mm)	full stroke (μ m)	reduction ratio
2	414.2	1/68.4
3	240.0	1/120.0
4	150.6	1/189.1
5	119.2	1/240.0
6	39.3	1/688.6
8	23.2	1/1178.0
10	19.2	1/1446.1
12	12.9	1/2173.0

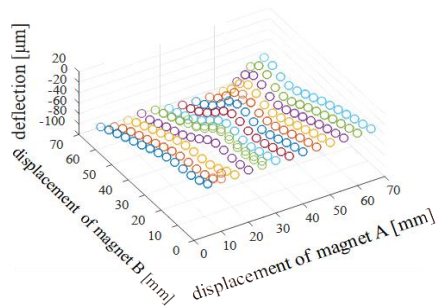


図8 2自由度変位縮小機構の変位特性

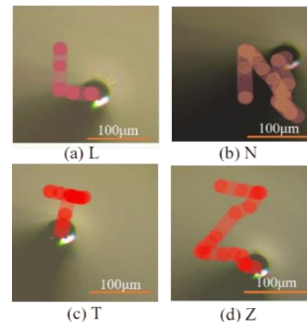


図9 プローブ先端で描いた文字

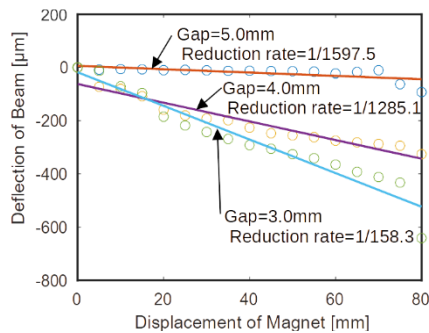


図10 精密ピンセットの変位特性

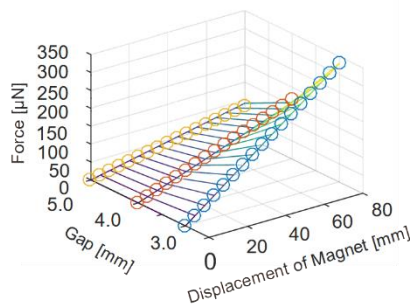


図11 精密ピンセットの発生力

(2) 2自由度変位縮小機構

図8は2自由度機構の発生変位特性を調べた結果である。ヒンジ部に3.3mm×3.3mmの断面をもつ弾性ビームを使用し、2つの永久磁石を5mmきざみで0mm～65mm移動させたときの弾性ビームの垂直方向の撓み量を示している。フルストロークは80μmで変位縮小率は1/812.5となっている。2つの永久磁石が近接すると互いの磁力が干渉して歪な変位特性になっている。磁力同士が干渉することは避けられないが、この特性が指で永久磁石を動かすときの操作感にどのように影響するかを評価するため弾性ビーム先端にピペットを取り付けて文字を描く操作を行った。図9にピペット先端の軌跡で描いた文字(大きさ約100μm)を示す。事前に30分程度の操作練習により「L」、「N」、「T」、「Z」のように直線で構成される文字は容易に描けるようになった。

(3) 顕微作業用精密ピンセット

図10に精密ピンセットの発生変位特性を示す。近似した直線の逆数を変位縮小率とするとギャップが5mm, 4mm, 3mmで1/1597.5, 1/1285.1, 1/158.3となった。また、磁石移動量80mmでの最大たわみをフルストロークとすると50.1μm, 280.6μm, 505.5μmが得られた。精密ピンセットの開閉量は、対象とする微小物の大きさに応じてギャップにより調整できることを確認した。図11に精密ピンセットの発生力特性を示す。この場合、発生力はピンセット先端で対象物を掴んだ時の把持力を示している。最大発生力は、ギャップが3mm, 4mm, 5mmでそれぞれ343μN, 225μN, 29μNであり、1mm以下の微小物を扱うには十分な発生力を有していると言える。

(4) まとめ

磁力を用いた1自由度変位縮小機構を開発し、発生変位特性および変位縮小率を実験的に調べることで顕微作業用ツールとしての性能を有していることを確認するとともに、この原理を応用した2自由度変位縮小機構を開発し、100μm程度の大きさの文字が描けることを示して実用的な応用範囲を拡張した。さらに、強磁性体素材と常磁性体素材から構成されるピンセットを開発することで顕微作業用ピンセットとして有効に動作することを確認した。

<引用文献>

- ① 小林, 佐久間: 微細手術支援ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 4, pp. 444-447, 2004.
- ② R. Nigmatullin et al.: Atomic force microscopy study of cellulose surface interaction controlled by cellulose binding domains, SCIENCE DIRECT, Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 35 (2004) pp.125-135
- ③ 吉川, 水野: リンク機構による変位の拡大と縮小, 精密工学会誌, Vol. 56, No. 10, pp. 1823-1828, 1990
- ④ 野村健作: 磁力を用いた無電力変位縮小機構の基本特性, 津山工業高等専門学校紀要, 63号 (2021), pp. 1-6
- ⑤ 野村健作: 磁力による弾性変形を利用した変位縮小機構, 日本機械学会中国四国支部 第61期総会・講演会予稿集 (2023), 09d4
- ⑥ 野村健作: 磁力を用いた変位縮小機構による精密ピンセットの開発, 日本機械学会 IIP2024 情報・知能・精密機器部門 (IIP 部門) 講演会予稿集 (2024), IIPH-1-1, pp. 212-215

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 野村健作	4. 巻 63号
2. 論文標題 磁力を用いた無電力変位縮小機構の基本特性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 津山工業高等専門学校紀要	6. 最初と最後の頁 pp.1-6
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 野村健作
2. 発表標題 磁力を用いた変位縮小機構による精密ピンセットの開発
3. 学会等名 日本機械学会 IIP2024 情報・知能・精密機器部門（IIP部門）講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 野村健作
2. 発表標題 磁力による弾性変形を利用した変位縮小機構
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部 第61期総会・講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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