

令和 5 年 5 月 23 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00214

研究課題名（和文）集積化マイクロデバイスを用いたナノすきま潤滑の素過程の解明

研究課題名（英文）Elucidation of elementary processes of nano-gap lubrication using integrated microdevices

研究代表者

福澤 健二（Fukuzawa, Kenji）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：60324448

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、平行平面しゅう動系を実現する、マイクロマシン技術を用いたしゅう動部・アクチュエータを集積化したマイクロ潤滑計測デバイス、ナノしゅう動すきまの測定を実現するエリプソメトリー顕微鏡によるすきま計測法、および蛍光一分子の運動を解析しナノしゅう動すきまの潤滑剤の流れ測定を実現する蛍光相関法という、新規な潤滑計測法を提案し、実際に計測系を構築し、原理的な可能性の確認に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今後の加工精度向上を生かした革新的な機械の実現のためには、ナノすきま潤滑技術は、さらに重要になると考えられる。本研究で提案・実証したマイクロ潤滑計測デバイス、エリプソメトリー顕微鏡、蛍光相関法をさらに発展させることで、ナノすきまでの流体潤滑の素過程解明のための有用な知見の取得が期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to propose a method for measuring lubrication with precisely controlling sliding gaps. We proposed three novel lubrication measurement methods: (1) Micro-device integrating sliding parts and actuators using micromachine technology to realize a parallel-plane sliding system, (2) gap measurement method using ellipsometric microscopy to realize real-time measurement of nano-gaps, and (3) fluorescence correlation spectroscopy to realize measurement of lubricant flow in nano gaps by analyzing the motion of fluorescent single molecules. We have succeeded in experimentally confirming the principle and feasibility of the proposed methods.

研究分野：ナノ計測，ナノトライボロジー

キーワード：ナノトライボロジー マイクロ流体デバイス

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

材料・加工技術の進歩によるしゅう動面の高精度化は、より微小なしゅう動すきまでの流体潤滑を可能とし、機械性能を革新してきた。とくに、加工面の平滑さ（面精度）の向上は、相對運動する機械部品間のすきま（しゅう動すきま）の微小化を可能としてきた。そして、油などにより流体潤滑される歯車や自動車エンジンのしゅう動部などにおいても、装置性能の革新のためには、しゅう動すきまの微小化が重要で、機械要素間のしゅう動すきまは μm オーダから nm オーダへと、さらなる微小化が求められている。例えば、自動車エンジンにおいては、近年の超低燃費化の社会的要請により、潤滑剤低粘度化による粘性摩擦削減が必須となっており、超低粘度化達成に向けて各社はしのぎを削っている。そして、粘度が低いほどしゅう動面を分離する流体力学的圧力が小さくなるため、エンジンしゅう動部のすきまは微小となる。このように、産業界において、微小すきま潤滑はより重要となっており、今後の加工精度向上を生かした革新的な機械実現のためには、さらに重要になると考えられる。

一方、潤滑剤を含め多くの液体では、すきまが分子の大きさに近い nm オーダになると、粘度が増加するなど、これまでの μm 以上のマクロなすきまの液体とは異なる流体特性を持つことが明らかになっている。そのため、ナノすきまの流体潤滑については、従来のマクロすきまの流体潤滑とは異なる理論体系の確立が必須と考えられているが、計測の困難さゆえ現象把握さえ十分でなかった。

ナノすきまの潤滑剤などの流体の特性はすきまに強く依存する。そのため、すきまを精密に制御した潤滑計測法の確立が必須である。ナノしゅう動すきまを実験的に構成するには、ナノすきまのしゅう動面の平行度調整の課題を解決するため、球面と平面の組み合わせをしゅう動面とすることが一般的であった。しかしながら、球面と平面から構成されるすきまは、測定領域の各点で異なってしまうため、精密なすきま制御が困難であった。このように、研究開始当初は、ナノすきま潤滑の現象解明に必須な、すきまを精密に制御し、各測定点ですきまが等しくなるような潤滑計測法は確立していなかった。

2. 研究の目的

本研究では、すきまを精密に制御した潤滑計測法の提案をねらいとした。球面と平面から構成されるしゅう動すきまだけでなく、測定領域内ですきまが等しくなる平行平面しゅう動系を、マイクロマシン技術を用いたしゅう動部・アクチュエータを集積化したマイクロデバイスで構築することを試みた。また、しゅう動すきまの測定のために、エリプソメトリー顕微鏡によるすきま計測法の確立を試みた。さらに、流体潤滑の本質であるしゅう動すきまの潤滑剤の流れ測定についても蛍光一分子の運動を測定する方法で試みた。

3. 研究の方法

研究目的で掲げた研究項目について新規な方法を提案し、原理的な可能性を実験的に検証した。

(1) マイクロマシン技術を用いた集積化潤滑計測デバイスの構築

平行平面しゅう動系の実現には、1) しゅう動面の平行しゅう動、2) ナノスケールのすきまの制御、の課題克服が必須で、本研究ではマイクロマシン技術を用いて克服することを試みた。具体的には、以下の手順を基に作製法を種々試み、作製法の確立を図った。

まず、シリコン基板を深堀エッチングすることで、シリコン基板内に平行板ばねで支持したしゅう動子を形成する。そして、しゅう動子の表面をナノ深さだけエッチングし、ガラス基板を上から覆い接合することで、ナノしゅう動すきまを形成する。これにより、測定領域各点ですきま

を等しくできる平行平面しゅう動系を実現できる。また、静電アクチュエータも集積化したデバイスとし、平行平面型ナノしゅう動すきまとアクチュエータを集積化したマイクロ潤滑計測デバイスの作製法の確立を試みた。そして、作製したデバイスの駆動力などの特性を評価し、潤滑剤の粘性力測定の実理確認を試みた。

(2) エリプソメトリー顕微鏡によるナノしゅう動すきま計測

本計測においては、ナノしゅう動すきまの把握が重要である。エリプソメトリー(偏光解析法)は偏光を利用し、ナノメートルオーダーの膜厚計測を可能とする方法である。エリプソメトリーの原理に基づき、さらに独自の光学系を用いることで、ナノすきま分布を定量化することを可能とした顕微鏡を開発した。本法では、顕微鏡の対物レンズの後ろ側焦点面に照明光を集光することで、エリプソメトリー信号の確保に必須な斜め平行光を発生する。これにより、対物レンズは試料面に対して垂直に配置することが可能となり、回折限界程度の面内分解能も可能となる。本研究では本顕微鏡によりナノしゅう動すきまの測定を試みた。

(3) ナノしゅう動すきまの流れ計測

流れ計測には、蛍光分子の運動を解析する蛍光相関法のナノすきまへの適用を試みた。潤滑剤の中に蛍光分子を溶かし、微小レーザースポット(集光点)を横切るときの蛍光分子の蛍光強度を測定する。潤滑液体の流れが速い場合は発光時間が短く、遅い場合は時間が長いので、蛍光強度の時間的自己相関関数を計測すると、速い場合は減衰が速く、遅い場合は減衰が遅い。自己相関関数をカーブフィットして時定数を求めることでナノすきまの潤滑剤の流速測定を試みた。

4. 研究成果

研究目的で掲げた(1)~(3)について、以下の成果を得た。

(1) マイクロマシン技術を用いた集積化潤滑計測デバイスの構築

マイクロマシン技術を用いた作製法の確立と潤滑計測法としての実理確認を達成した。開発した作製法を図1に示す。エッチングには、シリコン基板を深堀り加工可能な反応性イオンエッチング(Deep-RIE)法を用いた。まずしゅう動部となる一辺、高さとも数十 μm 程度の直方体形の段差をシリコン基板表面からのエッチングにより形成する(図1(a))。そして、シリコン基板

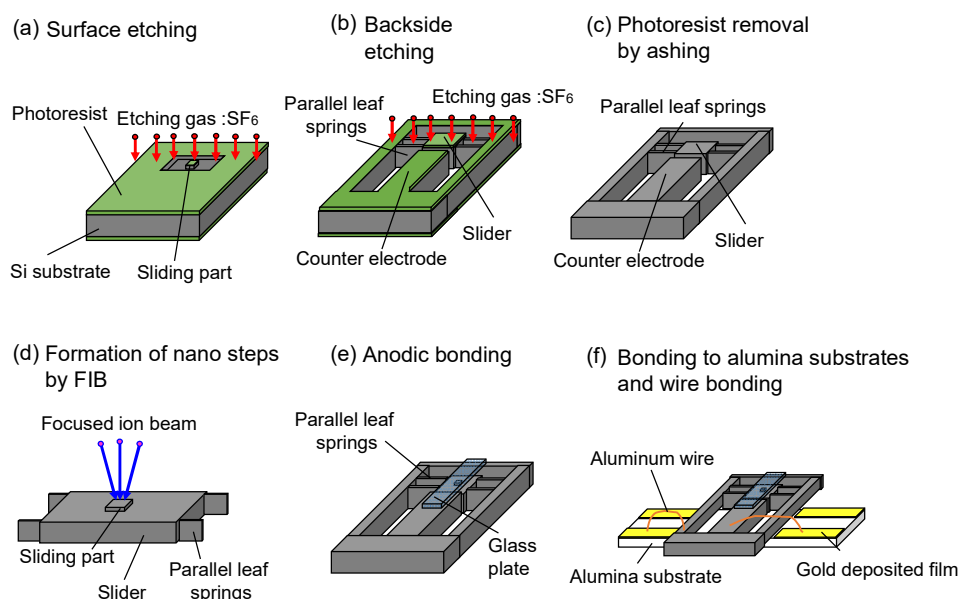


図1. マイクロ集積化潤滑計測デバイスの作製方法

の裏面からのエッチングにより平行板ばねで支持した一辺 $100\ \mu\text{m}$ オーダの直方体を形成し、先に作製した直方体形のしゅう動部の付いたしゅう動子とする (図 1 (b), (c)). つぎに、集束イオンビーム (FIB)法を用いて、しゅう動部の表面をナノ深さだけエッチングする (図 1 (d)). この部分がナノすきまとなる. さらに、シリコン基板とガラス基板を接合することでナノしゅう動すきまを形成する (図 1 (e)). 接合は陽極接合法を用い、介在物なしで直接接合する. このナノ段差を形成したシリコン基板にガラス基板を陽極接合させる方法で、これまでのしゅう動計測系では困難であった測定領域各点ですきまが等しい平行平面しゅう動系による潤滑計測系を実現できた.

最後に、作製したデバイスを、電極を形成したアルミナ基板に接着し、ワイヤボンディング法を用いて、アルミナ細線によりデバイスの電極とアルミナ基板の電極を接続する (図 1 (f)). シリコン基板は導電性のものと

し、対向電極としゅう動子電極間に電圧を印加することで、静電アクチュエータを構成する.

作製したマイクロ集積化潤滑計測デバイスの電子顕微鏡写真を図 2 に示す. ねらい通りのマイクロ構造、すなわち、しゅう動部、しゅう動子、平行板ばね、さらに対向電極を作製することができた. すなわち、開発した作製法により、本研究で提案するマイクロ集積化潤滑計測デバイスを作製することができた.

作製したデバイスのしゅう動子と対向電極に電圧を印加することで、電極間に静電気力が発生し静電アクチュエータとして機能する. 図 3 に電圧を印加した際のしゅう動子の変位から得た静電駆動力を示す. ガラス基板に対してしゅう動子をしゅう動可能で、潤滑計測系として有効であることを確認できた.

さらに、本デバイスのしゅう動子とガラス基板の間に潤滑剤を注入し、しゅう動させた際の粘性力測定を試み、測定可能であることを原理的に確認できた.

(2) エリプソメトリー顕微鏡によるナノしゅう動すきま計測

マイクロ潤滑計測デバイスと同様のマイクロメートル領域のしゅう動面についてナノしゅう動すきまの可視化が可能であることを確認した. 原理確認を優先するために、本研究の集積化マイクロ潤滑計測デバイスのしゅう動部と、ほぼ同程度の大きさ (一辺数十 μm) のしゅう動部をマイクロマシン技術を用いて形成し、しゅう動時のすきま測定の可否を検証した. その結果、分

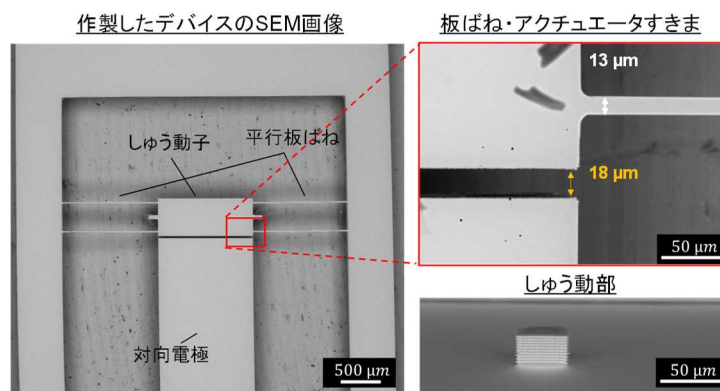


図 2. 作製したマイクロ集積化潤滑計測デバイス

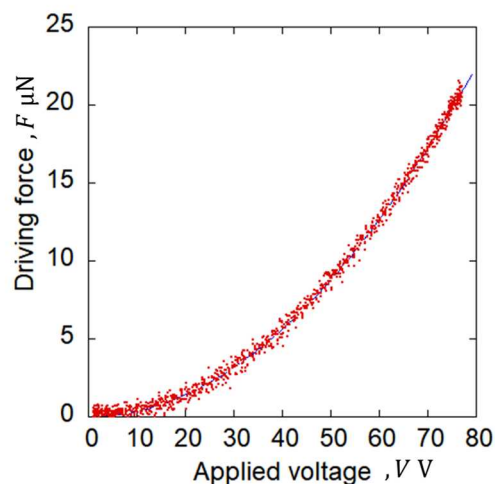


図 3. 作製したマイクロ集積化潤滑計測デバイスのアクチュエータの駆動特性

解能 0.1 nm オーダでナノしゅう動すきま測定が可能であることを確認できた。

(3) ナノしゅう動すきまの流れ計測

蛍光分子を用いた流れ計測について、ナノすきま流路を有するマイクロ流体デバイスを用いて原理確認を試みた。原理確認を優先するために、本研究の集積化マイクロ潤滑計測デバイスのしゅう動すきまと同様の構造のナノすきま流路を有するマイクロ流体デバイスを作製した。これを用いて、蛍光一分子の運動を解析して流速を得る、蛍光相関法によるナノすきまの潤滑剤の流れ計測の可否を検証した。図4にすきま 30 nm のナノ流路において計測した、蛍光相関法の基本となる蛍光分子の蛍光強度の自己相関関数の例を示す。この結果が示すように、本法によりナノしゅう動すきまの流れ測定が原理的に可能であることを確認できた。これに加えて課題も明らかになった。すなわち、通常の蛍光相関法では、光のスポット径が測定領域より小さいが、ナノすきまでは逆の関係となるため、精度向上には、これまでのマクロな空間での蛍光相関法で用いられている解析法に代わる、ナノ空間に適用可能な新しい解析法が必要であることを見出した。

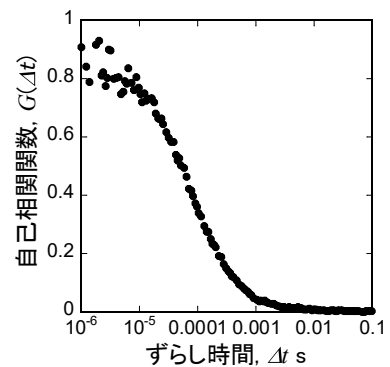


図4 すきま 30 nm のナノ流路での蛍光相関法の測定結果。

以上のように、本研究では、平行平面しゅう動系を実現する、マイクロマシン技術を用いたしゅう動部・アクチュエータを集積化したマイクロ潤滑計測デバイス、ナノしゅう動すきまの測定を実現するエリプソメトリー顕微鏡によるすきま計測法、および蛍光一分子の運動を解析しナノしゅう動すきまの潤滑剤の流れ測定を実現する蛍光相関法という、新規な潤滑計測法を提案し、実際に計測系を構築し、原理的な可能性の確認に成功した。これらの提案した方法をさらに発展させることで、ナノすきままでの流体潤滑の素過程解明のための有用な知見の取得が期待できる。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Song Yuxi, Fukuzawa Kenji, Hirayama Tomoko, Yamashita Naoki, Yamada Norifumi, Itoh Shintaro, Azuma Naoki, Zhang Hedong	4. 巻 56
2. 論文標題 Effects of Polarity of Polymers on Conformation and Lubricating Film Formation of Adsorbed Films	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 1954 ~ 1964
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.2c02238	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 Yuxi Song, Kenji Fukuzawa, Shintaro Itoh, Hedong Zhang, Naoki Azuma	4. 巻 165
2. 論文標題 In-situ measurement of temporal changes in thickness of polymer adsorbed films from lubricant oil by vertical-objective-based ellipsometric microscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Tribology International	6. 最初と最後の頁 107341 (9 pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.triboint.2021.107341	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17件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yuxi Song, Kenji Fukuzawa, Shintaro Itoh, Naoki Azuma, Hedong Zhang
2. 発表標題 Effects of polarity of polyalkylmethacrylate (PAMA) polymer additives on film formation ability during sliding
3. 学会等名 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Junpei Takashima, Kenji Fukuzawa, Shintaro Itoh, Naoki Azuma, Hedong Zhang
2. 発表標題 Measurement of viscosity of confined in nano-meter gap using combination of micro fluidic device and fluorescence correlation spectroscopy
3. 学会等名 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsuyosi Kato, Kenji Fukuzawa, Shintaro Itoh, Naoki Azuma, Hedong Zhang,
2. 発表標題 Shear response of liquid film confined in nano-gaps measured by vertical-objective type ellipsometric microscopy
3. 学会等名 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kou Hiraiwa, Yuta Oshitani, Kenji Fukuzawa, Shintaro Itoh, Naoki Azuma, Hedong Zhang
2. 発表標題 Proposal of integrated micro fluidic device for measurement of viscosity of confined in nano-meter gap with accurate gap control
3. 学会等名 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Song Yuxi, Kenji Fukuzawa, Tomoko Hirayama, Shintaro Itoh, Hedong Zhang, Naoki Azuma
2. 発表標題 Effects of polarity of polyalkylmethacrylate(PAMA) polymer additives on adsorbed film's thickness and durability
3. 学会等名 トライボロジー会議2022 春
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤 剛史, 福澤健二, Song yuxi, 伊藤 伸太郎, 東 直輝, 張 賀東
2. 発表標題 垂直観測型エリブソメトリー顕微鏡を用いたナノすきま液体のせん断応答計測の精度向上
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高島純平, 福澤健二, 東直輝, 伊藤伸太郎, 張賀東
2. 発表標題 マイクロ流体デバイスと蛍光相関分光法の組み合わせによる微小すきまの潤滑剤粘度・流速のすきま一定型計測
3. 学会等名 トライボロジー会議2022 秋
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平岩広羽, 押谷優太, 福澤健二, 東直輝, 伊藤伸太郎, 張賀東
2. 発表標題 ナノすきまにおけるすきま一定型粘度計測のためのマイクロ集積化デバイス
3. 学会等名 トライボロジー会議2022 秋
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ソニコシ, 福澤健二, 平山朋子, 山下直輝, 伊藤伸太郎, 東直輝, 張賀東
2. 発表標題 ポリアルキルメタクリレート (PAMA) 系高分子添加剤の極性が摺動時の油膜形成能力に及ぼす影響
3. 学会等名 トライボロジー会議2022 秋
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤 剛史, 福澤 健二, 東 直輝, 伊藤 伸太郎, 張 賀東, 中川 勝, 縄田 亮, 関 淳一, 浅野 俊哉
2. 発表標題 垂直観測型エリブソメトリー顕微鏡によるナノ閉じ込めされた液体のせん断特性の定量化
3. 学会等名 IIP2023 情報・知能・精密機器部門 (IIP部門) 講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 ソノユシ, 福澤健二, 伊藤伸太郎, 張賀東, 東直輝
2. 発表標題 潤滑油からのポリアルキルメタクリレート (PAMA)ポリマー吸着膜の形成メカニズムと構造
3. 学会等名 トライボロジー会議2021 春
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤剛史, 山中魁人, 福澤健二, 伊藤伸太郎, 東直輝, 張賀東
2. 発表標題 垂直観測型エリブソメトリー顕微鏡を用いたナノすきま液体のすきま一定型せん断応答計測
3. 学会等名 トライボロジー会議2021 春
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高島純平, 長谷川奨, 福澤健二, 東直輝, 伊藤伸太郎, 張賀東
2. 発表標題 ナノ深さ流路中での蛍光相関分析法による一様ナノすきまの潤滑剤の粘度計測
3. 学会等名 トライボロジー会議2021 春
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 押谷 優太, 福澤 健二, 東 直輝, 伊藤 伸太郎, 張 賀東
2. 発表標題 ナノすきま潤滑現象解明のためのしゅう動部と駆動部を集積化したマイクロ流体デバイスの開発
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ソユシ, 葛冬萌, 福澤健二, 伊藤伸太郎, 張賀東, 東直輝
2. 発表標題 ポリアルキルメタクリレート (PAMA) ポリマー添加剤の極性が吸着・摩擦特性に及ぼす影響
3. 学会等名 トライボロジー会議2021 秋
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ソユシ, 難波克也, 福澤健二, 伊藤伸太郎, 張賀東
2. 発表標題 Evaluation of adsorbed film formation of additives in lubricant oil with verticaltype-objective ellipsometric microscope
3. 学会等名 トライボロジー会議2020 秋 別府
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山中魁人, 福澤健二, 東直輝, 伊藤伸太郎, 張賀東
2. 発表標題 垂直観測型エリプソメトリー顕微鏡を用いたナノすきま液体のせん断応答計測
3. 学会等名 トライボロジー会議2020 秋 別府
4. 発表年 2020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
研究 分担者	伊藤 伸太郎 (Itoh Shintaro) (50377826)	名古屋大学・工学研究科・准教授 (13901)	

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
研究分担者	東 直輝 (Azuma Naoki) (50823283)	名古屋大学・工学研究科・助教 (13901)	

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