

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26249013

研究課題名(和文)浸漬型ナノすきま潤滑の理論体系確立のための包括的計測法

研究課題名(英文)Multidirectional measurement methods toward establishing theoretical system of lubrication at nanometer-gaps

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) 31,600,000円

研究成果の概要(和文)：微小しゅう動すきまにおける潤滑現象解明のための計測法の確立を目的とし、すきまを精密に規定した力計測およびすきま観測のための新規な計測法を提案し原理確認に成功した。提案した計測法により、微小すきまの潤滑剤の特性、境界の特性、および潤滑特性とすきまの関係の定量化が原理的に可能であることを明らかにした。本研究で開発した方法は、ナノすきまの潤滑現象解明に有効な方法となることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：We have proposed new methods for force measurement, in which the sliding gap is precisely adjusted, and observation of gap shapes during sliding, in order to clarify lubrication phenomena at small sliding gaps. We have succeeded in confirming the principle of the proposed methods and clarified that the methods enable us to quantify gap-dependences of lubricant properties, boundary characteristics, and lubrication performance. The methods developed in this study can be expected to be effective methods for clarifying the lubrication phenomenon at nanometer-gaps.

研究分野：マイクロ・ナノ計測工学

キーワード：トライボロジー ナノトライボロジー マイクロマシン 境界潤滑

1. 研究開始当初の背景

精密加工技術の進展に伴う加工精度の向上,特に加工面の平滑さ(面精度)の向上により,相対運動する機械部品間のすきま(しゅう動すきま)の微小化が可能となってきた。この微小しゅう動すきまを活かして,革新的な機械性能を実現するための潤滑システムの実現が期待されている。例えば,膨大なデジタル情報を保存するデータセンタにおけるハードディスクドライブ(HDD)では,ナノメートルスケールのすきまを介したヘッド・ディスク間の潤滑性能が情報の記録密度向上に必須となっている。また,自動車エンジンにおいても,エンジン始動時には比較的潤滑油の少ない状態で微小すきまを介した潤滑が求められる。近年のアイドリングストップ方式のエンジンの普及により,微小すきま潤滑はより重要となってきている。

このように微小すきま潤滑技術は,今後ますます重要になると考えられているが,その理論体系の確立は十分でなかった。最大の障害は微小すきまの現象であるため,計測が困難な点であった。微小すきまでは,すきま変動が現象に大きな影響を与えるため,微小すきまの潤滑特性あるいは現象を定量化するには,すきまを精密に規定した潤滑に関する力計測が重要であるが,従来の方法ではこれを満たすものがなかった。そして,力計測としては,摩擦力などの水平力,およびせん断された潤滑剤が発生し荷重を支える動圧力など鉛直力の計測が重要である。

そこで,われわれのグループでは,すきまを精密に規定した水平力・鉛直力計測法を確立すべく新規な計測法の研究を進めてきた。水平力計測法として先端を球状とした光ファイバをしゅう動プローブとした方法の開発を,鉛直力計測法として水晶振動子を用いた方法の開発を進めてきた。また,すきまの計測も重要であるため,エリプソメトリー(偏光解析)の原理に基づいたナノメートル厚さの薄膜観測法(エリプソメトリー顕微鏡)のすきま観測への応用を進めてきた。

2. 研究の目的

これまでの研究により計測法の基盤は確立しつつあったが,微小すきまの潤滑現象の体系的な定量化には不十分であった。本研究では,微小すきま潤滑の理論体系構築のための計測法の確立をねらいとして,これまで進めてきた研究を発展させ,新しい計測法を提案することを目的とした。とくに,新規なマイクロしゅう動プローブとエリプソメトリーによるすきま観測法の開発を試み,微小すきまの潤滑剤の特性(粘性・弾性),境界の特性(固液界面すべり),および潤滑特性(動圧力・摩擦力)とすきまの関係の定量化の可能性を検討した。

3. 研究の方法

本研究では,すきまを精密に規定した水平

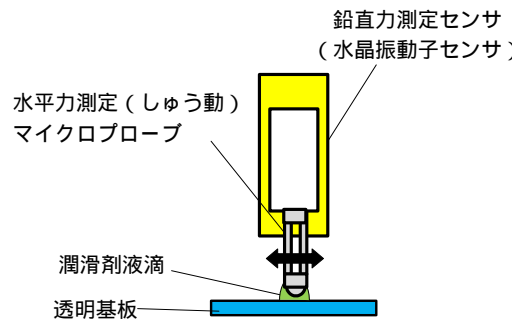


図1. 提案した水平力・鉛直力測定系の概略図。水平力検出用の微小ガラス球と力検出用のマイクロ構造から成るしゅう動プローブおよび鉛直力検出用の水晶振動子センサを用いる。

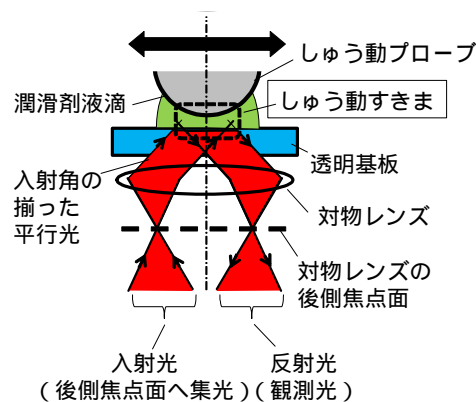


図2. 提案したエリプソメトリー(偏光解析)の原理に基づいた微小すきま分布(形状)の観測法(エリプソメトリー顕微鏡)。

力・鉛直力計測法およびすきま観測法の研究を進めた。図1に本研究で提案した水平力・鉛直力同時計測法の概略図を示す。水平力計測については,マイクロマシン技術を用いた新規なプローブによる計測法を試みた。鉛直力計測については水晶振動子センサ法の研究を進めた。さらに,すきま観測については,図2に示すようなエリプソメトリーに基づいた光学観測法の研究を進めた。以下に各研究項目について述べる。

(1) マイクロプローブを用いた水平力計測法

これまでは,通信用の光ファイバの先端をレーザ加熱により溶融して球状のしゅう動部とし,光ファイバ部を力検出部としていた。先端の球状しゅう動部に摩擦力などの水平力が働くと,光ファイバ部が変形し,この変形を測定することで水平力を定量化した。

しかし,しゅう動部はレーザで溶融して作製していたので,寸法や形状の自由度に乏しく,曲率半径はおおむねファイバ径で決まり,0.1 mm程度と比較的小さな半径しか得られなかった。そのため,しゅう動すきまの観測が容易でない,あるいは潤滑特性計測時に発生

する水平力・鉛直力が小さいという課題を有していた。これに加えて、正弦波的に加振したプローブを潤滑剤に挿入し、振幅・位相応答から粘弾性を得るのに成功したが、一周の間で速度が変化するので、広く潤滑計測で行われている一定速度での計測が容易でないという課題があった。

本研究では、しゅう動部の寸法・形状の自由度を向上させるために、しゅう動部と力検出部を別々に作製することとした。そして、水平力検出部としては、これまで用いてきた光ファイバでなく、マイクロマシン技術を用いて作製したマイクロ構造とした。作製したしゅう動部をマイクロ構造に取り付け、しゅう動プローブとして完成させた。

しゅう動部は、赤外線加熱炉を用いて微小ガラス球を加熱溶融し、表面張力で形成されるガラス曲面とすることを試みた。溶融ガラス面は平滑であるため、ナノメートルすきまの潤滑計測に必須な表面粗さ 1 nm 以下を達成できる。水平力検出用のマイクロ構造としては、図 1 に示した水平方向（紙面に平行な方向、x 方向）および直交する水平方向（紙面に垂直な方向、y 方向）の両方向に変形するマイクロ構造とした。マイクロ構造は、x および y 方向には柔で、z 方向には剛と設定することで、すきま変動の抑制と高感度力検出が両立できる。

そして、マイクロ構造を、位相を 90 度ずらし振幅を調整した正弦波により x, y 方向に変位加振した。これによりプローブ先端が円軌道を描き一定速度でのしゅう動計測が可能となる。マイクロ構造としては、x 方向に変形する平行ばねを y 方向に変形する板ばねで支持した構造、および正方形断面を有する角柱形プローブの二つのタイプのプローブについて検討した。いずれのプローブも x および y 方向には柔で、z 方向には剛と設定できるため、高感度な力計測と高精度なすきま制御が両立できる。また、角柱形プローブについては、断面を正方形とすることで、x および y 方向に対称とし、x, y 方向に加振した際に、プローブ先端に円軌道を描かせることができ、一定速度でのしゅう動計測が可能となる。

本計測で対象とする力は最大 100 μ N 程度、また変位系の分解能は 1 nm 程度である。これらから、必要なすきま変動 1 nm 以下（鉛直ばね定数 10^5 N/m オーダ）、力検出感度 10 nN オーダ（力検出方向のばね定数 10 N/m オーダ）、固有振動数 1 kHz オーダの達成には、マイクロメートルスケールの寸法が求められるため、マイクロマシン技術を用いてプローブを作製した。本研究では、加工精度に優れたドライエッチング法の Deep-RIE (Reactive Ion Etching) による作製法を用いた。加工基板としては、エッチストップ層が内部に埋め込まれ、表裏に別々の構造が作製可能な SOI (Silicon On Insulator) 基板を用いた。

(2) 水晶振動子センサを用いた鉛直力計測法

しゅう動時の z 方向の力（鉛直力）を、水晶振動子センサを用いて計測した（図 1）。水晶振動子の振動は水平方向であるため、プローブに誘起される鉛直方向の振動は小さく、高精度なすきま制御を実現できる。この鉛直力計測法を、(1) 項で研究を進めた水平力計測法と組み合わせて、しゅう動すきまを精密に規定した水平力・鉛直力同時計測法へと展開した。

さらに、水晶振動子センサを用いて、境界特性を決めるすべり長（界面すべりの指標）の定量化を試みた。プローブをピエゾ素子により鉛直方向に加振し、その際のプローブ・基板すきまからの潤滑剤の絞り出しに伴う鉛直方向の粘性力（スキーズ反力）を水晶振動子センサで測定した。なお、プローブの水平加振は行わず上下動のみさせた。スキーズ反力のすきまに対する依存性を測定し、すべり長定量化の可否を検証した。

(3) エリプソメトリー顕微鏡によるすきま観測法

エリプソメトリーの原理に基づき、しゅう動面の変形を含めたすきまの面内分布観測法の確立を試みた（図 2）。しゅう動面を下から観測するので透明な基板を用いた。しゅう動部は、プローブ/潤滑膜/基板の多層膜系であり、エリプソメトリーは多層膜系の膜厚を定量化できるので、しゅう動すきまを可視化できる。そして、偏光状態の変化からすきまを求めるので、光干渉法のようにすきま = 0 で感度が 0 とならず、微小すきまの高感度計測が可能となる。すきまの違いによる偏光状態の分布をエリプソメトリー信号像として得ることより、すきま分布をリアルタイム観測した。十分なエリプソメトリー信号を得るには、大きな入射角を持った斜め照明が必須である。通常のエリプソメータのように、照明系に合わせて斜め観測系とすると視野が狭小化し、面内分解能は数十 μ m が限界となる。そこで、研究を進めてきた新しい原理のすきま観測法を試みた。対物レンズの後側焦点面上の光軸からずれた点に照明光を集光し、試料面を斜めかつ平行に照明する。斜め照明となるため、すきまによるコントラストが得られる。また、観測系は試料面に垂直となるため斜め観測系で問題となっていた、視野狭小化による面内分解能低下の課題を解決し、原理限界の 0.1 μ m オーダと従来の斜め観測型のエリプソメトリー顕微鏡に比べ、面内分解能を 10 倍程度以上向上できる。

4. 研究成果

本研究により得られた研究成果を以下に述べる。

(1) マイクロプローブを用いた水平力計測法 赤外線加熱炉を用いてガラス球を加熱溶

融してしゅう動部を作製した。ガラス球を溶融させることで、表面がナノメートルスケールで平滑で、かつ大きな曲率半径を有するしゅう動部の形成が可能であることを確認した。しかし、ガラス球を基板上で完全に溶融させてしまうと、基板のシリコンとガラスの熱膨張率の差が比較的大きいため、熱応力によりガラス球にひび割れが生ずることが判明した。そこで、これを避けるために、比較的曲率半径の大きなガラス球を用いて、球の形状が変形しないが、表面のみが溶融する加熱方法を試み、半径0.5 mmで表面粗さRa = 0.1 nm オーダと、半径が大きくかつ平滑なしゅう動部の形成に成功した。これにより従来の光ファイバを加熱溶融して作製していたプローブの課題であった、しゅう動部の寸法・形状についての自由度が低いという課題を解消できた。

力検出用のマイクロ構造としては、x方向に変形する平行板ばねをy方向に変形する板ばねで支持した構造、および正方形断面を有する角柱形構造の二つのタイプについて、マイクロマシン技術を用いて試作に成功した。そして、ねらいとした二軸加振による一定速度によるしゅう動の動作確認に成功した。水平力測定のためにプローブを水平方向に加振すると、プローブ先端が鉛直方向にわずかながら変位する。これはしゅう動すきま変動をもたらす可能性がある。このすきま変動の抑制については、角柱形のプローブの方が優れることを明らかにした。

そして、加熱溶融処理した球形しゅう動部と角柱形マイクロ力検出部を顕微鏡下で接着することで、当初ねらいとしていた、しゅう動面の曲率半径が大きく、かつ高感度な水平力検出可能なしゅう動プローブを完成させた。図3に、試作例を示す。さらに、高感度な水平力検出に必須な、水平方向のプローブ変位検出法としては、高精度なレーザドップラー法を検討し、ねらいとしていた水平力計測性能を達成できた。

(2) 水晶振動子センサを用いた鉛直力計測法

前項のしゅう動プローブを用いた水平力検出法を、水晶振動子センサを用いた鉛直力測定法と組み合わせた測定系を構築した。しゅう動時のすきま変動の抑制のために、水晶振動子センサの支持部にしゅう動プローブを取り付け、支持部に取り付けたピエゾ素子で、支持部を水平方向に加振する方法が有効であることを見出した。

そして、試作したマイクロしゅう動プローブを用いた水平力検出系を水晶振動子センサ系に組み合わせ、しゅう動すきまを精密に規定した水平力・鉛直力同時計測系を構築した。従来の一軸方向(図1のx方向)の加振による往復しゅう動および本研究で着想した二軸加振(x, y方向)による一定速度でのしゅう動時の水平力・鉛直力同時計測が原理的に可能であることを実験的に確認でき

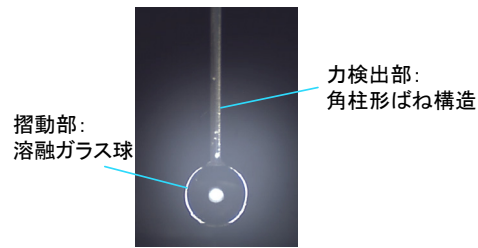


図3. 溶融加熱処理した微小ガラス球しゅう動部とマイクロ力検出部を組み合わせたしゅう動プローブ。

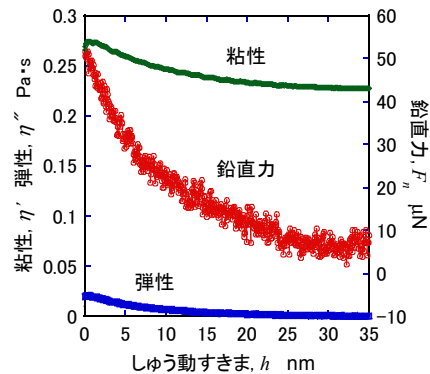


図4. マイクロしゅう動プローブおよび水晶振動子センサによる水平力・鉛直力同時計測結果の例。水平力計測の結果からナノメートルすきまにおける潤滑剤の粘性と弾性を定量化した。

た。図4に水平力・鉛直力同時計測法を用いて得た計測結果の例を示す。マイクロプローブを用いた水平力計測から、ナノメートルすきまにおける潤滑剤の粘性および弾性を定量化でき、かつ水晶振動子センサを用いた鉛直力計測からナノメートルすきまにおける潤滑剤の発生する鉛直方向の力が検出できた。

また、水晶振動子センサを用いた鉛直力測定によるすべり長測定系を構築した。潤滑剤を挟んだプローブ・基板すきまを変動させ、すきま依存性の測定を試みた。プローブは既存の光ファイバプローブを利用したが、より大きな曲率半径とすることが有効であることが判明し、この点を改良することによりすべり長定量化のためのスキューズ力計測が可能であることを実験的に確認できた。

以上のように、提案する方法で、微小すきまの潤滑剤の特性(粘性・弾性)と境界の特性(スリップ長),および潤滑特性(動圧力・摩擦力)とすきまの関係の定量化が可能であることを示すことができた。

(3) エリプソメトリー顕微鏡によるすきま観測法

エリプソメトリーの原理に基づいた微小しゅう動すきま観測系を構築した。エリプソメトリー信号の較正法としては、ピエゾステ

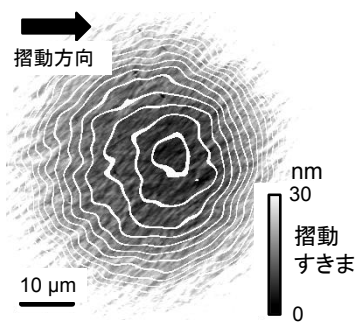


図 5. エリプソメトリー顕微鏡を用いたナノしゅう動すきまの観測例。

ージによりすきまを変えながらエリプソメトリー信号を実測し、エリプソメトリー信号をすきまに変換する方法が有効であることを明らかにした。さらなる高精度化のためには、較正法としてエリプソメトリーで広く用いられている回転補償子法も有効であることを明らかにした。そして、本研究で提案した方法により、しゅう動時のナノメートルオーダーのすきま分布の定量化が可能であることを示すことができた(図5)。ここでは、球状しゅう動子を、平坦な基板上で潤滑剤を介してしゅう動させた時のすきまの分布(形状)を観測したものであり、ナノメートルスケールのすきま形状が定量化できた。

微小すきま潤滑現象解明のための計測法の確立を目的とし、すきまを精密に規定した力計測とすきま観測のための、新規な計測方法を提案し原理確認に成功した。提案した計測法により、微小すきまの潤滑剤の特性と境界の特性、および潤滑特性とすきまの関係の定量化が原理的に可能であることを明らかにできた。本研究で開発した方法は、ナノすきまの潤滑現象解明に有効な方法となることが期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

Kenji Fukuzawa, Ryota Watanabe, Shintaro Itoh, Hedong Zhang, Effect of Bonded Molecules on Replenishment of Lubricant-Depleted Area Created by Sliding on Molecularly Thin Lubricant Film, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, Vol. 51, No. 11, 2015, 3300804(4pages) DOI: 10.1109/TMAG.2015.2435373

Kenji Fukuzawa, Chihiro Yamashita, Hiroya Ishikawa, Shintaro Itoh, Hedong Zhang, Measurement of Thickness Distribution of Molecularly Thin Lubricant Films on Head Sliders Using Ellipsometric Microscopy, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, Vol. 52, No.

7, 2016, 3300904 (4pages)

DOI: 10.1109/TMAG.2016.2514611

[学会発表](計15件)

山下 千尋, 樽角 拓実, 武田 寛史, 福澤 健二, 伊藤 伸太郎, 張 賀東, エリプソメトリー顕微鏡を用いた薄膜の局所的膜厚の定量化, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 2014.9.8, 東洋大学(東京都)

Kenji Fukuzawa, Ryota Watanabe, Shintaro Itoh, Hedong Zhang, Effect of Bonded Molecules on Replenishment of Lubricant-Depleted Area Created by Sliding on Molecularly Thin Lubricant Film, IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG Beijing 2015), 2015.5.14, China National Convention Center (Beijing, China)

山下 千尋, 福澤 健二, 伊藤 伸太郎, 張 賀東, 垂直観測型エリプソメトリー顕微鏡による摺動すきま分布の計測, トライボロジー会議 2015 春 姫路, 2015.5.27, 姫路商工会議所(姫路市, 兵庫県)

山下 千尋, 石川 寛也, 福澤 健二, 伊藤 伸太郎, 張 賀東, エリプソメトリー顕微鏡を用いた磁気ヘッドスライダ上の潤滑膜の観測, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015.9.16, 北海道大学(札幌市, 北海道)

Kenji Fukuzawa, Chihiro Yamashita, Hiroya Ishikawa, Shintaro Itoh, Hedong Zhang, Measurement of Thickness Distribution of Molecularly Thin Lubricant Films on Head Sliders Using Ellipsometric Microscopy, 13th Joint MMM-Intermag Conference, 2016.1.15, Hilton San Diego Bayfront (San Diego, USA)

福澤 健二, 山下 千尋, 伊藤 伸太郎, 張 賀東, 垂直観測型エリプソメトリー顕微鏡の摺動すきま形状計測への適用, IIP2016 情報・知能・精密機器部門(IIP部門)講演会, 2016.3.14, 東洋大学(東京都)

Shintaro Itoh, Yuya Ota, Kenji Fukuzawa, Hedong Zhang, Temperature dependence of Viscosity of Poly-Alpha-Olefins Sheared in a Nanometer-size Gap, 2016 STLE Tribology Frontiers Conference, 2016.11.13, Historic Drake Hotel (Chicago, USA)

伊藤 伸太郎, 太田 裕也, 福澤 健二, 張 賀東, ナノメートルオーダーの微小隙間でせん断されるポリオレフィン油の粘性の温度依存性計測, トライボロジー会議 2016 春 東京, 2016.5.23, 国立利根大学記念青少年総合センター(東京都)

福澤 健二, 宮田 顕, 山下 千尋, 伊藤 伸太郎, 張 賀東, エリプソメトリー顕微鏡を用いた磁気ヘッド上の潤滑膜観測の高精度化, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016.9.13, 九州大学(福岡市, 福岡県)

笹尾 優介, 福澤 健二, 山下 千尋, 伊藤 伸太郎, 張 賀東, 垂直観測型エリプソ

メトリー顕微鏡を用いた微小摺動すきま分布の計測,トライボロジー会議 2016 秋 新潟, 2016.10.12, 朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター (新潟市, 新潟県)

神谷 健人, 伊藤 伸太郎, 福澤 健二, 張 賀東, 固体表面の吸着膜がナノ隙間でせん断されるポリ オレフィン潤滑油の摩擦特性に及ぼす影響, トライボロジー会議 2016 秋 新潟, 2016.10.13, 朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター (新潟市, 新潟県)

伊藤 伸太郎, 神谷 健人, 福澤 健二, 張 賀東, 脂肪酸添加剤がナノ隙間でせん断される潤滑油の粘性に及ぼす影響, サステイナブルトライボロジー会議 2016 奄美大島 (STCA2016), 2016.11.1, 奄美山羊島ホテル (奄美市, 鹿児島県)

福澤 健二, 笹尾 優介, 伊藤 伸太郎, 張 賀東, 垂直観測型エリプソメトリー顕微鏡を用いたナノしゅう動すきま分布の計測, サステイナブルトライボロジー会議 2016 奄美大島 (STCA2016), 2016.11.1, 奄美山羊島ホテル (奄美市, 鹿児島県)

福澤 健二, 鶴飼 智之, 森田 祥平, 伊藤 伸太郎, 張 賀東, ナノすきま潤滑計測のための微小ガラス球を用いたマイクロプローブの開発, IIP2017 情報・知能・精密機器部門 (IIP 部門) 講演会, 2017.3.14, 東洋大学 (東京都)

青山 祥子, 戸田 達輝, 伊藤 伸太郎, 福澤 健二, 張 賀東, ファイバーウォプリン グ法を用いたトライボロジー計測における摺動距離の拡大の試み, IIP2017 情報・知能・精密機器部門 (IIP 部門) 講演会, 2017.3.14, 東洋大学 (東京都)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://ayame.fukuzawa.nuem.nagoya-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福澤 健二 (FUKUZAWA Kenji)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 60324448

(2) 研究分担者

伊藤 伸太郎 (ITO H Shintaro)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 50377826

(3) 連携研究者

該当なし