

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：53701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2014

課題番号：22560258

研究課題名(和文) 光学式振動型センサのための光ファイバ先端でのマイクロ光造形システムの構築

研究課題名(英文) Construction of micro laser-lithography systems for the vibration type sensors driven photothermally on the tip of optical fiber

研究代表者

稲葉 成基 (INABA, Seiki)

岐阜工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：30110183

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：光駆動のセンサやアクチュエータを光造形するシステムを構築した。光ファイバ先端の側面または断面に光造形できる。この装置を用いて、第一に、光駆動の振動型センサを製作し、液中で光トラップによって固定されている小球を振動させ、振幅を測定した。低周波で粘性係数を測定できる可能性を論じた。また、この値は光トラップから解放された小球の速度からも推定できることを示した。第二に、マイクロクリーナを製作し、構築した筒長が長いほど効果があることを明らかにした。第三に、マイクロピンセット、マイクログリッパ、縦振動型アクチュエータ及び扇形の振動子を製作し、光駆動によるそれらの変位を測定し、性能の有効性を評価した。

研究成果の概要(英文)： Micro laser-lithography systems were constructed for making sensors and actuators driven photothermally. These sensors and actuators can be fabricated at the side or the cross section of the optical fiber tip. Firstly, vibration type sensor was fabricated, and the amplitude of vibration was measured by vibrating the micro sphere which was held in liquid by optical trap. It was considered that the viscosity coefficient might be determined in the low frequency region. This value can be also estimated by measuring the velocity of sphere released from the optical trap. Secondly, micro cleaner was fabricated. It was pointed out that the longer pipe was effective. Thirdly, micro tweezers, micro gripper, longitudinal vibration type actuator and fan-shaped cantilever were fabricated. Their usefulness was evaluated by measuring the displacement of them driven photothermally.

研究分野：レーザ工学

キーワード：光造形法 光ファイバ 光駆動センサ 光駆動アクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

医用あるいは工業用のマイクロセンサやマイクロメカトロニクスに関する研究はマイクロマシニング技術の成熟に伴って、近年非常に注目されているが、ほとんどが電気で駆動させるものである。マイクロセンサ・アクチュエータを動作させるための電極が狭いために、低電圧であっても電界が強く、絶縁破壊等が問題になる。また、爆発性の気体中や、電気分解による損傷が問題になるような液体中では使用できない。光をエネルギー源として用いれば上記の問題は解決される。

一方、マイクロマシニングの主流はシリコンの異方性エッチングを利用したものであるが、立体的なものを構築するには限界がある。研究代表者はこれまで光トラップと光造形法を組み合わせた光駆動マイクロ構造物の構築に関する研究を実施してきた。また、光駆動の光学式センサを構築しその成果を発表している。しかしながら、この全光学式センサは光学系のセッティングが複雑になるので、光ファイバ先端を切削加工し、センサ内蔵の簡便な光学系を構築した。

このような背景のもと、さらに複雑な形状のマイクロセンサを構築するには、ファイバ先端の切削加工だけでは限界があると考えた。研究代表者は半導体レーザーを用いた光造形法に関する研究を行っており、光ファイバ先端でマイクロ光造形する着想に至った。これまでの研究成果を生かし、光ファイバ先端に全光学式センサあるいはアクチュエータを構築する。二光子吸収を利用したマイクロ光造形法は開発されているが、本研究では安価な半導体レーザーにより光ファイバ先端に光駆動マイクロセンサやアクチュエータを構築するためのマイクロ光造形法に関する研究を行う。

2. 研究の目的

次の4点を具体的な研究目的とした。

(1) 光ファイバ先端の側面に、半導体レーザーを用いてマイクロ光造形するシステムを構築する。さらに、研究代表者が開発してきた光ファイバ用マイクロ旋盤加工によって、クラッドの全部あるいは一部分を取り除き、半導体レーザーを用いて側面にマイクロ光造形するシステムを構築する。

(2) 上記のシステムを用いて光駆動のマイクロセンサ及びアクチュエータを製作し、その特性を測定する。

(3) 光ファイバ先端の断面に、半導体レーザーを用いて3次元にマイクロ光造形するシステムを構築する。

(4) 上記のシステムを用いて、光駆動のマイクロセンサ及びアクチュエータを製作し、その特性を測定する。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために具体的に以下のような研究方法を設定した。

(1) 光ファイバ側面での光造形装置の製作位置決め方法及び光造形の手法を決定する。また、ファイバの回転機構が必要となるので、そのシステムを構築する。

(2) 光ファイバ断面での光造形装置の製作位置決め方法及び光造形の手法を決定する。光造形法には種々の方法があるが、本研究では安価な半導体レーザーを用いた手法を取り入れるので、それに適した光造形法を検討する。

(3) 特性の測定方法

特性を測定するための手法を検討する。

(4) 具体的なセンサ及びアクチュエータの製作と特性の測定

構築したシステムを用いて光駆動のセンサ及びアクチュエータを製作し、その基礎的な特性を測定する。

4. 研究成果

以下の具体的な成果が得られた。

(1) 光ファイバの側面に光造形するシステムの構築

後で述べる断面で採用した光ファイバからの光をモニタリングする方法では、位置決め精度があがらなかった。また、位置決めと光造形が同時に行えない欠点を当初から抱えていた。図1に示す顕微鏡システムを利用する新たな方式に変更した。この方法によれば位置決めと光造形が同時に実施できる。実際に基礎的な実験を行ったところ、光ファイバ先端側面に、光造形できる精度があることを確かめた。

光造形法としては、対物レンズを用いた方法を採用した。また、光ファイバの回転機構を導入した。

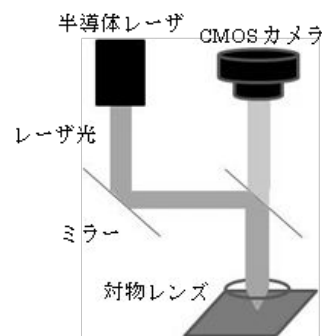


図1 側面での位置決めと光造形システム

(2) 光ファイバの断面に光造形するシステムの構築

装置の概略を図2に示す。断面での位置決め方法は、光ファイバ先端からの出射光をガイド光とし、その中心を位置決めして、マイクロステージを移動させることにより設定することが、最も簡便であり、精度も高いことが明らかになった。

また、光造形法としては、上部の光ファイバを樹脂内に挿入する液中硬化法を用いている。液中の任意の場所で硬化できる。また、使用するファイバ径により、硬化の大きさを

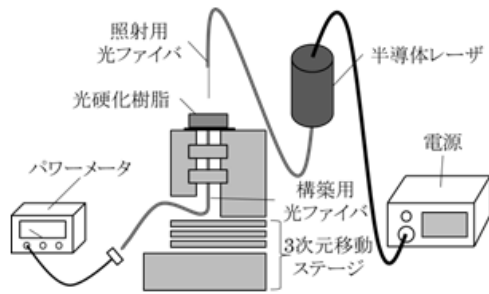


図2 光ファイバ断面での光造形装置

変えることができる。具体的には、シングルモードファイバ(コア径 10 μm)、及びマルチモードファイバ(クラッド径 125μm、200μm、400μm、600μm、1000μm)の6種類で硬化特性を測定して、光造形装置に組み込んだ。

(3) 特性の測定方法

光駆動のセンサあるいはアクチュエータの特性を測定する場合には、光ファイバ先端に構築した振動子の変位を測定することが一般的である。これまで研究代表者が行ってきた研究では、変位を光学的に検出し、共振周波数や共振の鋭さQを測定してきた。本研究では振動子の変位を直接的に顕微鏡下で観測する手法を取り入れていたが、それに加えて、新たな次の手法を考案した。

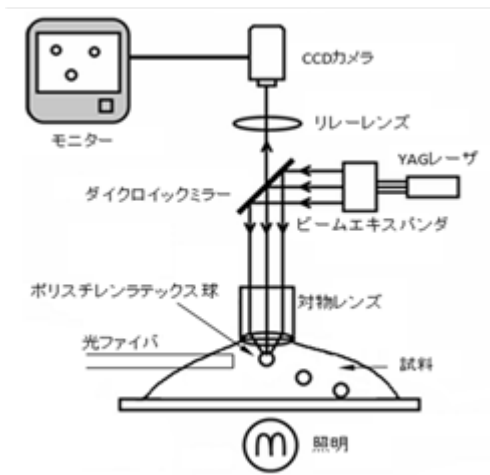


図3 光トラップを用いた検出システム

光ファイバ先端に構築した光駆動のセンサあるいはアクチュエータはそれ自身が振動している場合と、それが引き起こしている現象がある。研究代表者はそれを観測する手法に光トラップを導入した。これは今までにない新たな知見である。一種の非接触の光学的な片持ち梁を形成している。

図3に検出システムの概略を示す。顕微鏡下でYAGレーザーによってポリスチレンラテックス球(以下PE球と略す)は光トラップにより空間的に固定されている。横方向から光ファイバの出力光を照射すると光圧力による力を横方向に受ける。この時、光トラップを開放すると、PE球は横方向の光圧力

を受け、横方向に移動する。この時の移動速度を測定することにより、光圧力を推定することができる。図4は代表的な特性であり、光ファイバの出力を上げていくと、横方向の力を受けることを示している。光ファイバ先端に何も処理をしない場合は単なる光圧力であり、先端を処理(この例では光硬化樹脂で終端)すると熱流の影響で移動速度がさらに速くなる。

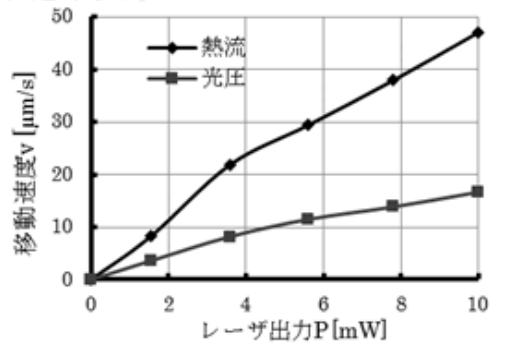


図4 光トラップを利用した特性測定

また、特性の測定では移動速度ではなく、トラップが維持できなくなる YAG レーザ出力で評価することもできる。

(4) 具体的なセンサ・アクチュエータの製作と特性の測定

側面での光造形によるマイクロクリーナの製作

液中の壁に付着した微小物体は粘着力が強く、これを取り去ることは容易ではない。また、光造形法で微小物体を構築した時に、実際に最も問題になるのは、溝などの部分に光硬化樹脂が表面張力で残り、これが固化することである。筆者はこれを光駆動で吹き飛ばすマイクロクリーナを考案した。具体的には、側面に光造形を施し、所定の長さまで光硬化樹脂でコーティングした。その後、コーティングした内部の光ファイバをエッチングで取り除いて、光ファイバ先端に筒を構築した。光ファイバからの半導体レーザー光は光造形された筒で吸収され、先端から放出される熱流によって微小物体を吹き飛ばす。

特性を評価するために、図3のシステムを用い、トラップを外した後の移動速度を測定した。その結果を図5に示す。横軸は半導体レーザーの出力、縦軸は吹き飛ばされた PE 球の移動速度を示す。

は筒長 327 μm、は筒長 223 μm、は筒長 112 μm、×は光造形せず被膜だけを残してエッチングを行い作製したマイクロクリーナである。筒長が 112μm、223μm、327μm の場合を比べると、長さ按比例して 8μm/s ずつ早くなった。筒が長くなり指向性が増し、熱流の拡散が抑えられ、飛ばす力が強くなったと考えられる。被膜だけのマイクロクリーナは特性がよくない。光ファイバ側面に光造形したマイクロクリーナのほうが、構造物分の厚みがあることで、光エネルギーが効率よく

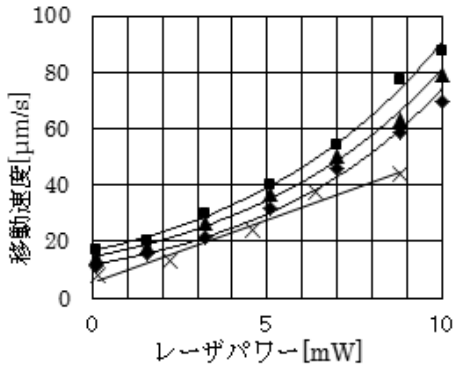


図5 移動速度のレーザーパワー依存性

熱エネルギーに変わったと考えられる。

次に熱流でトラップが外れる YAG レーザの出力を測定した結果を図6に示す。

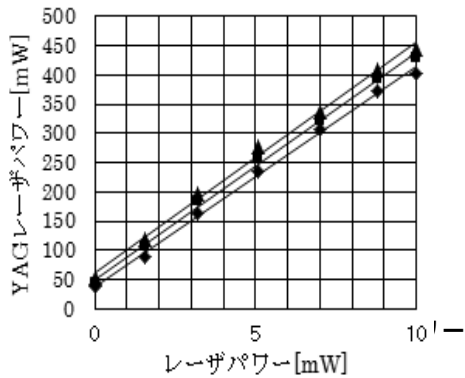


図6 トラップ力のレーザーパワー依存性

レーザーパワーに比例して大きくなった。また、筒長の異なるマイクロクリーナを比較すると、筒長が約 100 μm 長くなると、トラップ力に直接関係する YAG レーザパワーは 20mW 程度大きくなった。筒長が長い方がより強い熱流を発生している。

側面での光造形による振動型センサ

のマイクロクリーナのレーザーを強度変調したところ、3 mW の出力で PE 球が 1 μm 振動した。光トラップされた物体の振動は本研究で新しく得られた知見である。光トラップは横方向の力でも捕捉されている。図3で対物レンズを固定端とした、見えない片持ち梁を形成しているものと考えられる。

筆者らのこれまでの研究により、液体中における片持ち梁の共振周波数や共振の鋭さ Q から、液体の密度や粘性係数が測定できる。

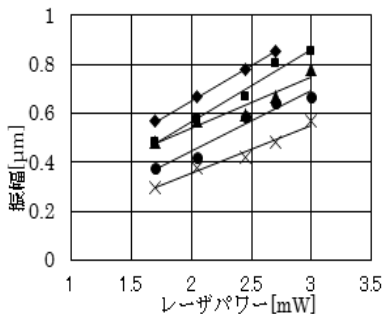


図7 振幅のレーザーパワー依存性

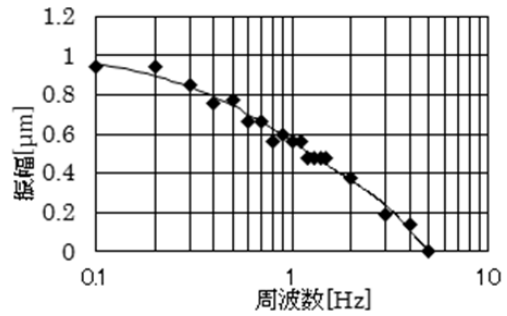


図8 振幅の周波数特性

レーザーパワーを 3mW、YAG レーザの出力を 100mW での周波数特性を図8に示す。筆者らの液体中の光熱振動の研究によれば、この後共振周波数で振幅は大きなピークを示す。本装置では共振周波数でトラップから外れることが予想された。しかしながら、共振を起こしたらテックス球がトラップから外れることはなく、共振周波数を測定することはできなかった。固有振動数は $\sqrt{k/m}$ で与えられ、ラテックス球の質量が非常に小さく、固有振動数が非常に高く、共振を実現できなかったと考えられる。使用したレーザー電源は 1MHz までの変調であり、さらに高調波で変調すれば共振周波数及び共振の鋭さ Q を求めることが可能であった可能性がある。今回は確認できなかったが、光トラップされている物体の共振現象は非常に興味のある事象である。

断面での光造形によるマイクロピンセット

製作した光熱駆動ピンセットを図9に示す。光ファイバ断面の直径は 250 μm 、コアの直径は 50 μm 、構造物の高さは 750 μm 、直径は約 50 μm 、間隔は 150 μm である。光熱駆動ピンセットの変位のレーザー出力依存性を図10に示す。レーザーパワーを強くすると光熱効果により発生する熱も大きくなるため、より大きな変位が得られた。

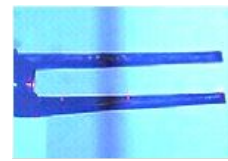


図9 光駆動マイクロピンセット

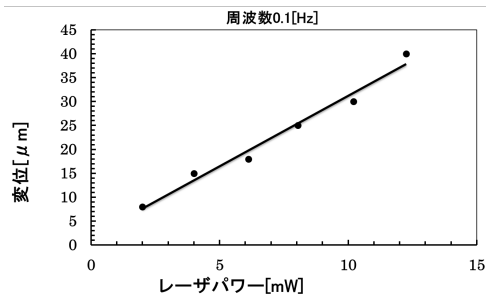


図10 変位のレーザーパワー出力依存性

製作した構造物は二本であるため、より安

定して物体をつかむためには三本以上の構造物にすることが必要であると考えられる。

断面での光造形によるマイクログリッパ

光ファイバ先端断面での光造形により、四本手のマイクログリッパを製作した。図 1 1 にその概略を示す。シングルモードファイバを照射用光ファイバ、マルチモードファイバを構築用光ファイバとした。マルチモードファイバ断面の直径は 125 μm 、高さ 200 μm 、先端の直径 10 μm 、底の直径 30 μm の構造物を 80 μm の間隔で造形した。レーザーパワー 9.6 mW で 5 μm の変位であったが、これはピンセットの長さから比較すると妥当な変位である。

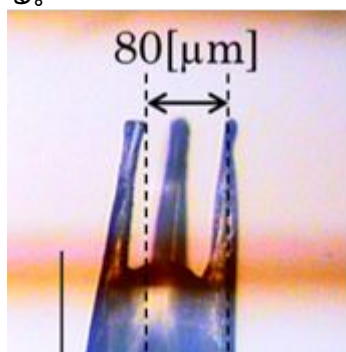


図 1 1 マイクログリッパ

断面での光造形による粘性係数測定

レーザー照射用の光ファイバとしてコア径 10 μm のシングルモードファイバを使用し、コア径 100 μm のマルチモードファイバの先端に長さ 70 μm の筒状構造物を図 1 2 のように作製した。



図 1 2 作成した構造物

図 3 の光トラップシステムにおいて、エタノールと水の混合比を変えて、PE 球の移動速度を測定した。液体の粘性係数はわかっているので、図 1 3 に粘性係数と移動速度の対応

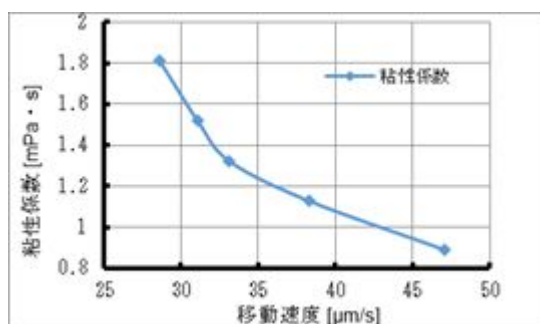


図 1 3 粘性係数と移動速度

を示す。この特性を校正曲線として、別の液体の移動速度から粘性係数を推定することができる。

断面での振動型センサのための扇形振動子

光ファイバの微細加工による振動型センサの研究から、片持ち梁の形状は密度や粘性係数を測定する場合、液体に面接する表面積ができるだけ広いことが適していることがわかっている。具体的には団扇のような形状が、感度が高いのであるが、これを光ファイバ先端で切削加工で製作することは困難である。

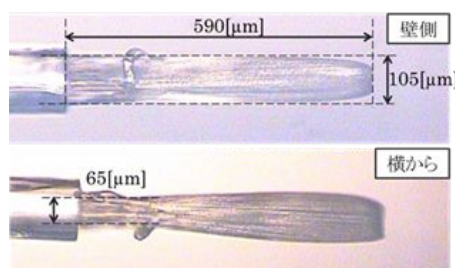


図 1 4 団扇型振動子

図 1 4 に、光ファイバ断面に製作した団扇型振動子を、図 1 5 に光駆動された変位のレーザーパワー依存性を、図 1 6 に変位の周波数特性を示す。

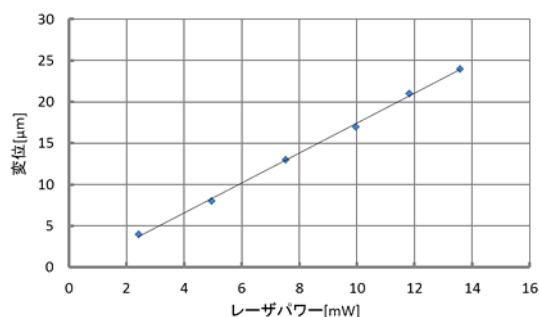


図 1 5 変位のレーザーパワー依存性

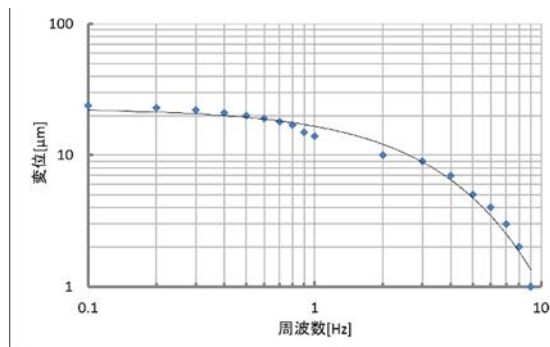


図 1 6 変位の周波数特性

これまでの振動子と比べて十分な光駆動の変位が得られている。また、周波数特性からも、共振周波数で十分な変位の共振現象を得ることが予想できる。

縦振動型アクチュエータ

水晶振動子のように縦に振動する光駆動のアクチュエータを光ファイバ先端に構築した。概略を図17に示す。光ファイバをマイクロキャピラリーに挿入し、光造形法により固定封印する。逆側から真空グリースを塗布した光ファイバを挿入する。レーザー光で空洞部の温度が上がり圧力が増して先端のファイバを駆動することができる。

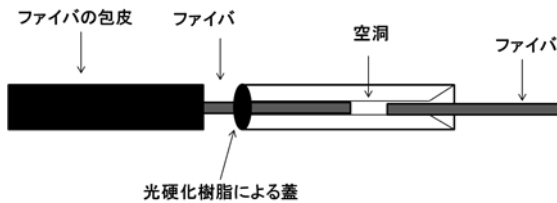


図17 縦振動型アクチュエータ

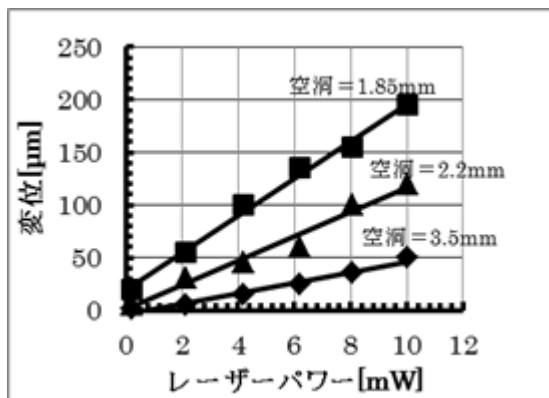


図18 変位のレーザーパワー依存性

挿入したファイバの変位のレーザーパワー依存性を図18に示す。空洞部分が小さいほど変位は大きくなる。図19に変位の周波数特性を示す。

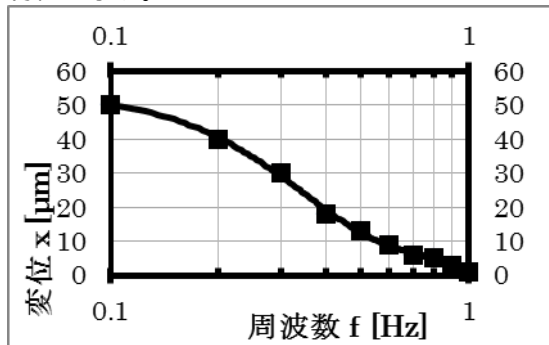


図19 変位の周波数特性

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1件)

稲葉成基、長屋智貴、五島健太、ポンマサック・パーワンナー、熊崎裕教、光ファイバを用いたマイクロ光造形法、岐阜工業高等専門学校紀要、査読有、47巻、2012、7~10

[学会発表](計3件)

荒井一真、高木洋輔、稲葉成基、熊崎裕教、シングルモードファイバを用いた光造形法による光熱駆動ピンセットの製作、平成25年度電気関係学会東海支部連合大会 J1-3、2013年9月24日、静岡大学工学部

高木洋輔、稲葉成基、熊崎裕教、荒井一真、光ファイバ先端でのマイクロ光造形法による光熱駆動マイクロリーナの製作、平成25年度電気関係学会東海支部連合大会 J1-5、2013年9月24日、静岡大学工学部

長屋智貴、稲葉成基、熊崎裕教、ポンマサック・パーワンナー、光ファイバ先端での光熱駆動ピンセットの製作、平成23年度電気関係学会東海支部連合大会 E4-3、2011年9月27日、三重大学工学部

6. 研究組織

(1)研究代表者

稲葉 成基 (INABA, Seiki)

岐阜工業高等専門学校・電気情報工学科・教授

研究者番号：30110183