

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24246028

研究課題名(和文) その場計測制御による超高アスペクト比微細形状のフォトニック・ナノジェット加工

研究課題名(英文) Laser micro-machining using photonic nanojets controlled by in-situ measurement

研究代表者

高谷 裕浩 (Takaya, Yasuhiro)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70243178

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,300,000円

研究成果の概要(和文)：チューナブル・フェムト秒チタンサファイアレーザー光源を用いた本研究独自のフェムト秒パルスPNJ生成基本光学系を設計・試作した。それを用いて、固定マイクロ球を利用したPNJ位置制御による、単結晶Siウェハ基礎加工実験を行い、サブミクロンスケールの加工分解能を有することを示した。また、プローブ球位置計測手法として白色光共焦点法を適用した、高分解能PNJ定在場スケール検出によって、数10nmの高分解能な変位計測を実現した。さらに、ピッチ597nm、深さ57nmの表面微細形状を有する回折格子の表面トポグラフィ・イメージングを遂行し、走査型マイクロ球光学顕微鏡の基本原理を確立した。

研究成果の概要(英文)：A novel machining method using the photonic nanojet (PNJ) is proposed to fabricate a three dimensional micro-shape with nanometer scale. The femtosecond pulse PNJ machining system was developed using the tunable femtosecond Ti:Sapphire laser. The laser machining of the Si wafer with the material removal of sub-micrometer scale was achieved by employing the PNJ position control method using the microsphere stably attached to a micropipette. The chromatic confocal system is introduced to measure the position of the microsphere accurately. Using this technique, the interpolated PNJ standing wave scale enables to measure displacement with an accuracy of dozens of nanometers for the bases of in-process measurement. A novel scanning probe microscopy for imaging surface topography using the optically trapped microsphere is proposed. It was confirmed that the proposed method could resolve the surface topography with a sub-micron resolution by measuring the gratings with 1800 GPM.

研究分野：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：フォトニック・ナノジェット 超高アスペクト比微細加工 微粒子レンズ 光放射圧 フェムト秒パルスレーザー 非熱的アブレーション加工 定在場スケール 加工量計測

1. 研究開始当初の背景

近年、環境・エネルギー、医療・バイオや情報通信などの分野において、サブミクロンスケールの高アスペクト比（深さ/幅）形状加工はMEMSデバイス、微小径ノズルやマイクロ流路などに要求されるが、その加工は非常に困難である。様々な微細加工技術の中でも、レーザー加工はレーザー光を走査することで所望の形状に加工することが可能であり、高速な加工を実現している。従来のレーザー加工には集光ビームが用いられる。焦点で小さいビーム径を得るためには、開口数の高い対物レンズを用いる必要があるが、デフォーカスとともにビーム径は大きくなる。したがって、集光ビームを用いたレーザー加工ではサブミクロンスケールの高アスペクト比形状加工は困難である。そのため、その高フルエンス[J/cm²]による非熱的なアブレーション加工特性と多様な材料への適用性の高さから、フェムト秒パルスレーザー加工の高精度・微細化が活発に研究されている。しかし、短波長、短パルス化による微細化のアプローチはアスペクト比向上との両立が難しく、新たな手法が求められている。

2. 研究の目的

これまで研究代表者らは、集光レーザーの光放射圧により3次元的に捕捉されたマイクロ球を利用した、マイクロ加工工具及びマイクロプローブの研究によって次の成果を上げている。

- ・マイクロ球（直径数マイクロメートル）のレンズ効果（微粒子レンズ）による2次集束レーザー光を利用した微細加工の可能性を実証。さらに、その加工現象の実験的調査¹⁾と数値解析²⁾を遂行している。

- ・ナノ座標測定機用の走査型マイクロプローブとして、マイクロ球の透過光と試料面反射光の干渉によって形成される定在場スケール³⁾を利用した非接触変位計測の基本原則を提案している。

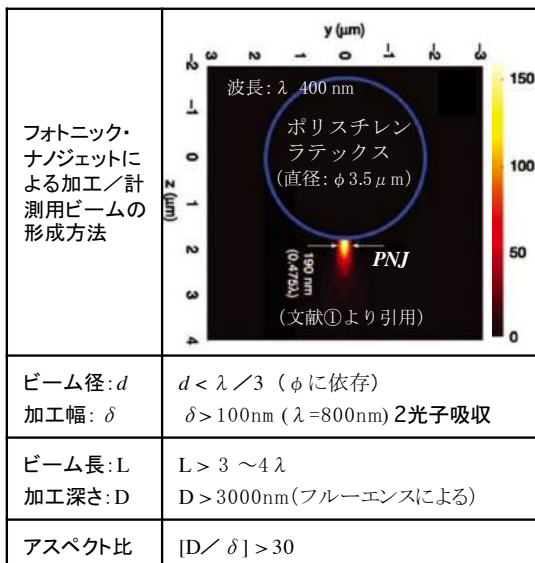


図1 フォトニックナノジェットの基本特性

以上のような加工および計測における微粒子レンズ効果による現象は、近年、解析的に見いだされたフォトニック・ナノジェット（以降、PNJ (Photonic Nanojet)）⁴⁾の物理特性と極めて類似している。図1に示すように、PNJは入射波長より大きいサイズのマイクロ球の下部に形成され、回折限界をはるかに超えるビーム径と波長の3倍以上のビーム長を有する高エネルギーの伝搬ビームである。

本研究は、PNJの加工および計測ビームとしての優れた特性に着目し、図2に示す3つの光学系(a)~(c)と試料走査ステージを統合したその場計測制御加工システムの構築、およびフェムト秒パルスPNJによる加工およびPNJ定在場スケールに基づく計測とそれらの発展・融合によって、独創的な超高アスペクト比微細形状加工・計測原理の確立を目的としている。

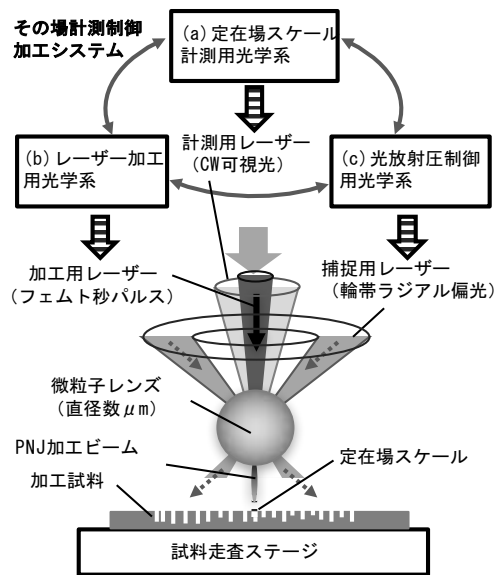


図2 フォトニックナノジェット計測制御加工システムの基本構想

3. 研究の方法

フェムト秒パルスPNJの生成過程や基礎現象は未知な点が多く、解析結果の信頼性確保が難しいため、数値解析および基礎実験の両面から徹底した現象解明を行い、本研究の重要な基礎となる高精度なPNJ制御技術を確立した。また、フェムト秒パルスPNJの制御特性と加工分解能との関係を詳細に検討し、微細形状加工の実現性および加工分解能などを検証した。さらに、定在場スケール変位計測法を、数マイクロメートルの加工深さを高精度に評価可能な変位計測に適用するため、新たな高精度化手法について検討した。また、研究遂行過程において、加工計測制御の有効性を確認するためには、加工表面トポグラフィ・イメージングによるその場観察が有効であることが認識され、走査型マイクロ球光学顕微鏡に関する新たな研究手法を導入した。

(1) フェムト秒パルスPNJの制御特性と加工特性

PNJの位置制御を行うためには、マイクロ球の位置制御が不可欠である。本研究では、マイクロ球をマイクロピペットにより保持し、加工試料から離れた状態で3次元位置制御を行うことで加工試料とPNJの相対位置を制御する。マイクロ球の位置制御によるビームの位置制御の概略図を図3に示す。制御パラメータは、保持したマイクロ球の表面(下端)とシリコン基板表面の間の距離 h である。マイクロピペットを用いて、空気吸引によってマイクロ球(シリカ微粒子; 直径 $8.0\mu\text{m}$, 屈折率1.44)を保持する。保持したマイクロ球を3次元位置制御し、対物レンズ(開口数0.5)によって集光されたレーザー光が照射されるように挿入する。

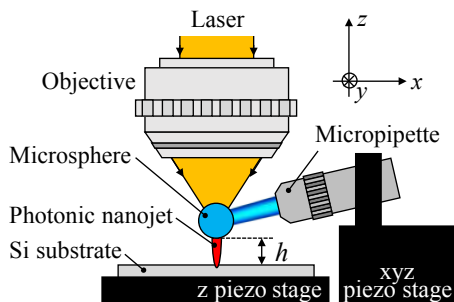


図3 PNJ位置制御による加工実験の方法

上述のPNJ加工実験を遂行するために、図4に示す実験装置を構築した。加工ビーム光学系、共焦点光学系および顕微鏡観察系の3つの機能から構成される。フェムト秒パルスレーザー(中心波長 800nm , パルス幅 $<100\text{fs}$)を光源とする加工ビーム光学系は、強度およびパルス数を制御するためのバリアブルアッテネータ、シャッターを備えている。共焦点光学系を通った試料表面の反射光は、フォトダイオードによって検出され、試料表面位置が検出される。また、加工ビーム集光用の対物レンズと結像レンズから構成される顕微鏡光学系によって、CCDに試料表面観察画像を結像する。さらに、試料ステージ系およびマイクロ球位置制御ステージ系を別々に配置し、それぞれ試料とマイクロ球の位置を独立して制御できる構成とした。

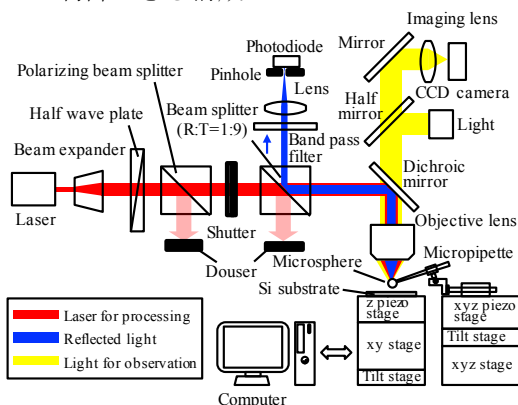


図4 PNJ位置制御による加工実験装置の構成

(2) 高分解能PNJ定在場スケールを用いた変位計測原理

光放射圧プローブを水平方向に走査することによって、プローブ球と試料面の距離が周期的光干渉場(定在場スケール)の一周期分($1/2$ 波長)変位する度に生ずる光軸方向のプローブ球変位とジャンプを検出する。このプローブ球変位を測定することによって得られるプローブ信号からプローブ球と試料面間の相対変位を算出する。高分解能PNJ定在場スケール検出を実現するため、プローブ球位置計測手法として白色光共焦点法を適用した。光放射圧プローブシステムに白色光共焦点光学系を導入した測定システムの構成を図5に示す。本手法では対物レンズで生じる色収差を利用することにより、プローブ球位置に対して検出される波長が固有に決まる。基本特性を検証するため、ピエゾステージを用いて光軸方向変位を与えたときのプローブ球位置計測を行った。

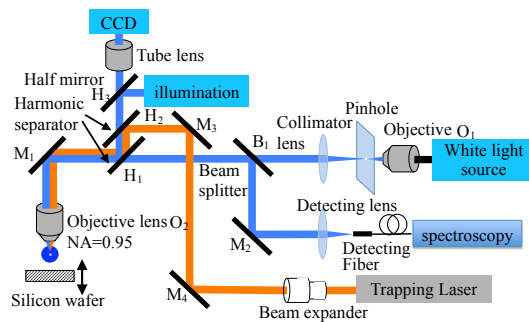


図5 白色光共焦点法を利用した光放射圧プローブシステムの基本構成

(3) 走査型マイクロ球光学顕微鏡による表面トポグラフィ・イメージング

走査型マイクロ球光学顕微鏡システムを図6に示す。レーザトラップ光学系、落射照明光学系、焦点可変機能を有する結像光学系から構成される。結像光学系は対物レンズと結像レンズの間に2枚の同じ開口数と焦点距離を持つレンズが配置されている。

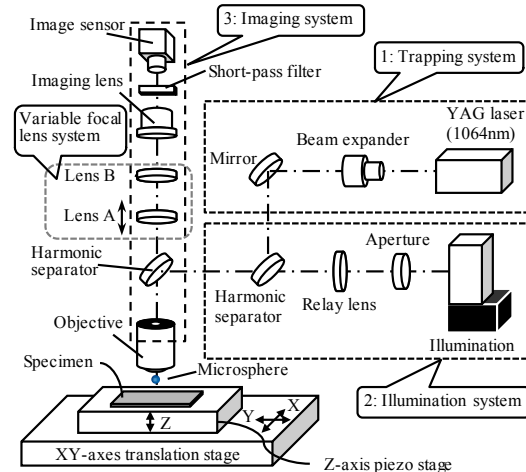


図6 走査型マイクロ球光学顕微鏡の構成

4. 研究成果

(1) フェムト秒パルス PNJ 加工法の基本特性の解明

PNJ による基礎的な加工特性を明らかにするため、図7に示すように、シリコン基板上に最密状に配列したマイクロ球を用いて、穴加工実験を遂行した。デフォーカスすることによって周囲のマイクロ球には、基板に対して入射角 30° で入射する。

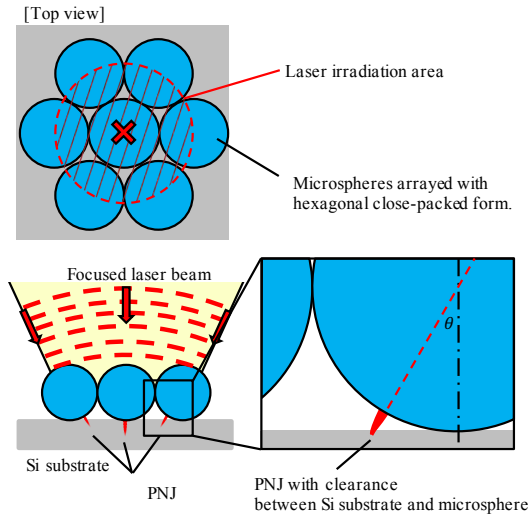


図7 PNJ を用いた基礎的な加工実験

AFM を用いて、斜めに発生した PNJ による加工痕を測定した結果を図8に示す。マイクロ球とシリコン基板間の微小空間によって材料除去が妨げられることなく、加工が可能であったと考えられる。従って、PNJ による材料除去加工においては、PNJ 位置制御による、マイクロ球とシリコン基板の間の空間制御が重要であることがわかった。

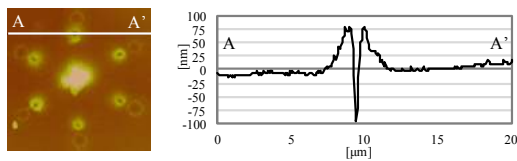


図8 PNJ による加工痕の AFM 測定結果

そこで次に図4に示した PNJ 位置制御による加工実験装置を用いて、共焦点法によるマイクロ球位置検出を行いながら、加工実験を遂行した。図9に距離 h を $0.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$ で制御したときの加工実験結果を示す。加工穴深さは $h=0.5 \mu\text{m}$ のとき 362nm 、 $1.0 \mu\text{m}$ で 1085nm 、 $1.5 \mu\text{m}$ で 1561nm 、および $2.0 \mu\text{m}$ で 1130nm であった。PNJ の位置制御によってサブミクロンスケールで穴深さを制御可能である。これらの結果から、発生している PNJ の光軸方向の強度分布は、 $h=0.5 \mu\text{m}$ から h が大きくなるとともに強度も高くなり、 $1.5 \mu\text{m}$ 付近でピークに達しており、PNJ の理論的な強度分布と良く一致している。PNJ の位置制御を行う

ことで穴径や穴深さなどの加工量がサブミクロンスケールで変化した。よって、PNJ の位置制御によりサブミクロンスケールの加工分解能を実現することが可能である。

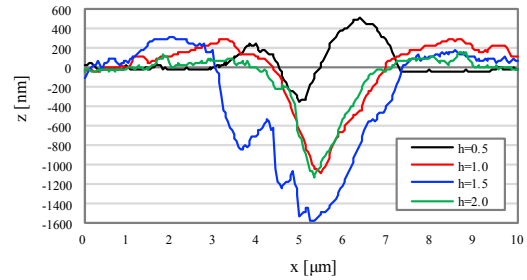


図9 PNJ の位置制御による加工実験結果

(2) 高分解能 PNJ 定在場スケールを用いた精密変位計測原理の確立

独自に構築した白色光共焦点光学系による基礎的な位置計測実験を遂行した。シリコン基板上において、初期位置 $14 \mu\text{m}$ から光放射圧プローブに連続的な変位を与えたときの PNJ 定在場スケールの測定結果を図10(a)に示す。開発した定在場スケールの内挿技術を用いて、図10(b)に示すような、数 10nm の高分解能な変位計測を実現した。さらに、回帰直線からの偏差を図10(c)に示す。標準偏差が 60nm の高い線形性が得られた。PNJ 加工量計測手法として十分な測定精度が得られた。

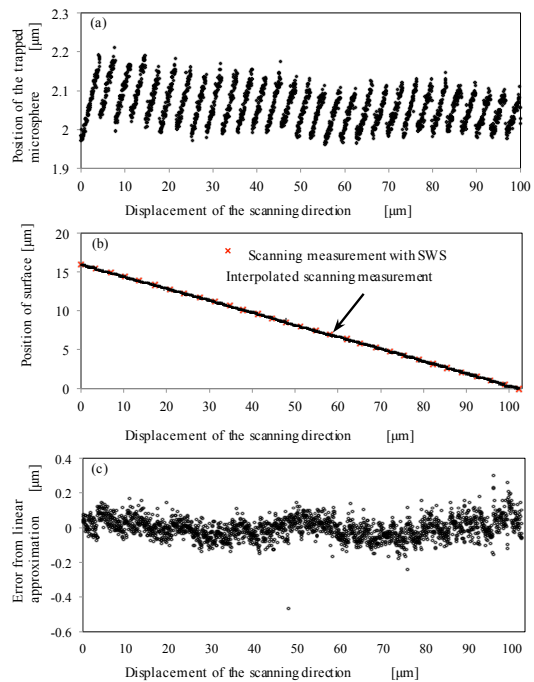


図10 高分解能 PNJ 定在場スケールによる変位測定結果

(3) 走査型マイクロ球光学顕微鏡による表面トポグラフィ・イメージング法の原理検証

ピッチ 597nm 、深さ 57nm の表面微細形状を有する回折格子を測定試料として、光放射圧プローブを利用した表面トポグラフィ・イメ

ージングの基礎実験を遂行した。図11にマイクロ球を走査しながら観察した結果を示す。矢印方向に移動しながら0.5 μm 間隔で撮像した画像である。太い矢印で示した画像中の黒い斑点は、試料とともに移動していることから、回折格子上の微細欠陥が検出されていることがわかる。

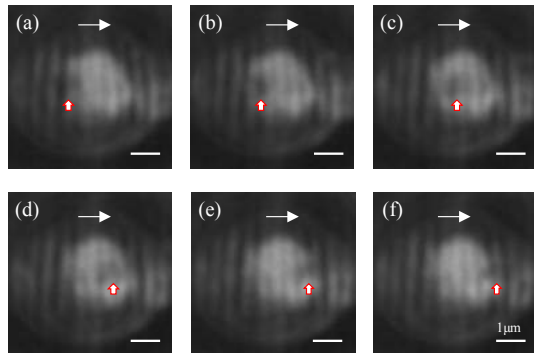


図11 回折格子(1800GPM)の走査型表面トポグラフィ・イメージング

【引用文献】

- ① Yasuhiro Takaya, et. al., A Novel Surface Finishing Technique for Microparts Using an Optically Controlled Microparticle Tool, CIRP ANNALS VOL. 55/1, 2006, pp. 613-616.
- ② 中村玲王奈ほか: 光放射圧制御微粒子工具によるナノ加工の研究 -微粒子工具近傍のエネルギー分布解析-, 2009年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2009), pp. 837-838.
- ③ Yasuhiro Takaya, Masaki Michihata, Terutake Hayashi, Measurement of micro fine figure using radiation pressure controlled micro-displacement sensor, Proc. of the 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting (HPC 2010), (2010), pp. 243-248.
- ④ Alexander Heifetz, et. al., Photonic Nanojets, Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, Vol. 6, 2009, pp. 1979-1992.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① Yasuhiro Takaya, Michihata, Terutake Hayashi, Taisuke Washitani, Dimensional measurement of microform with high aspect ratio using an optically controlled particle with standing wave scale sensing, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 査読有, Vol. 62(1), 2012, pp. 479-482, DOI:10.1016/j.cirp.2012.03.114
- ② Shin-ichi Ueda, Masaki Michihata, Terutake Hayashi and Yasuhiro Takaya, Wide-range Axial Position

Measurement for Jumping Behavior of Optically Trapped Microsphere near Surface using Chromatic Confocal Sensor, Int. J. of Optomechatronics, 査読有, Vol. 9, 2015, pp. 131-140, DOI:10.1080/15599612.2015.1034901

〔学会発表〕(計23件)

- ① Masaki Michihata, Yasuhiro Takaya, Taisuke Washitani, Terutake Hayashi, Scanning measurement of step height and freeform surface by using optically trapped microsphere, The 12th euspen International Conference, 2012年6月4日-8日, Stockholm (Sweden)
- ② Yasuhiro Takaya, Masaki Michihata, Terutake Hayashi and Taisuke Washitani, Mode selective probing method of micro trench structure using optically trapped probe, ISOT' 12 (International Symposium on Optomechatronic Technologies) (招待講演), 2012年10月29日-31日, Paris (France)
- ③ Masaki Michihata, Tadaaki Yoshikane, Terutake Hayashi and Yasuhiro Takaya, New technique of single-beam gradient-force laser trapping in air condition, ISOT' 12 (International Symposium on Optomechatronic Technologies), 2012年10月29日-31日, Paris (France)
- ④ 鷲谷泰佑, 道畑正岐, 林 照剛, 高谷裕浩, 光放射圧プローブによる定在場スケールを用いた三次元形状のスキャニング測定(第2報)-定在場中でのプローブ球の挙動解析-, 2013年度精密工学会春季大会学術講演会, 2013年3月13日-15日, 東京工業大学(東京都)
- ⑤ 吉兼匡昭, 道畑正岐, 林 照剛, 高谷裕浩, 表面微細構造を用いた光放射圧プローブスタイラスの捕捉(第2報)-基板材料と表面離脱性の関係-, 2013年度精密工学会春季大会学術講演会, 2013年3月13日-15日, 東京工業大学(東京都)
- ⑥ Yasuhiro Takaya, Masaki Michihata, Terutake Hayashi, Micro-probing system for coordinate metrology using a particle controlled by optical radiation pressure based on standing wave scale sensing method, International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology (icOPEN) 2013 (招待講演), 2013年4月9日-11日, Singapore
- ⑦ 大島玄喜, 高谷裕浩, 林 照剛, 道畑正岐, フォトニック・ナノジェットの生成に関する研究-ベッセルビーム照明条件の検討-, 2013年度精密工学会関西地方定

- 期学術講演会, 2013年6月14日, 大阪工業大学(大阪府・大阪市)
- ⑧ 上田真一, 道畑正岐, 林 照剛, 高谷裕浩, 光放射圧プローブによる定在場スケールを用いた三次元形状のスキヤニング測定(第3報)-スケールの内挿誤差の検討-, 2013年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2013年9月12日-14日, 関西大学(大阪府・吹田市)
- ⑨ 上野原 努, 高谷裕浩, 林 照剛, 道畑正岐, フォトニック・ナノジェットを利用した微細加工に関する基礎研究, 日本機械学会関西支部学生員卒業研究発表講演会, 2014年3月17日, 大阪府立大学(大阪府・堺市)
- ⑩ 上野原努, 道畑正岐, 高谷裕浩, 林 照剛, フォトニックナノジェットを利用した表面微細加工に関する研究, 2014年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2014), 2014年9月11日-13日, 岩手大学(岩手県・岩手市)
- ⑪ 上田真一, 道畑正岐, 高谷裕浩, 林 照剛, 光放射圧プローブによる定在場スケールを用いた三次元形状のスキヤニング測定(第4報)-マイクロ球光軸方向位置の共焦点計測-, 2014年度精密工学会学術講演会秋季大会, 2014年9月16日-18日, 鳥取大学(鳥取県・鳥取市)
- ⑫ Shin-ichi Ueda, Terutake Hayashi, Masaki Michihata, Yasuhiro Takaya, Measurement of axial position of a microsphere using chromatic confocal system for probe system based on the laser trapping with the standing wave scale, ISOT' 14(International Symposium on Optomechatronic Technologies), 2014年11月5日-7日, University of Washington (Seattle, USA)
- ⑬ 上田真一, 高谷裕浩, 道畑正岐, 光放射圧プローブによる定在場スケールを用いた三次元形状のスキヤニング測定(第5報)-定在場スケール内挿によるスキヤニング測定-, 2015年度精密工学会学術講演会春季大会, 2015年3月17日-19日, 東洋大学(東京都)
- ⑭ Tsutomu Uenohara, Yasuhiro Takaya, Masaki Michihata, Laser micro machining using photonic nanojets, Manufacturing Automation and systems Technology Applications Design Organization and management Research, 2015年3月28日-30日, Huwei(Taiwan)
- ⑮ Jonggang Kim, Masaki Michihata, Yasuhiro Takaya, Experimental study on measurement the surface topography by laser trapping probe, Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 2015年8月15日-20日, Harbin(China)
- ⑯ Yasuhiro Takaya, Masaki Michihata, Shinichi Ueda, Optically trapped microprobe for nano-profile measurement based on interpolation method of standing wave scale using chromatic system, XXII MEKO World Congress, 2015年8月30日-9月4日, Prague(Czech Republic)
- ⑰ 上野原努, 高谷裕浩, 水谷康弘, フォトニックナノジェットを利用した微細加工に関する研究(第1報)-ビームの位置制御技術の検討-, 2015年度精密工学会学術講演会秋季大会, 2015年9月4日-6日, 東北大学(宮城県・仙台市)
- ⑱ 上野原努, 高谷裕浩, 水谷康弘, フォトニックナノジェットを利用した微細加工に関する研究(第2報)-ビームの位置制御による加工特性の解明-, 2016年度精密工学会学術講演会春季大会, 2016年3月15日-17日, 東京理科大学 野田キャンパス(千葉県・野田市)
- ⑲ 金鐘剛, 道畑正岐, 高谷裕浩, 水谷康弘, 光放射圧プローブを用いた表面微細形状の評価技術に関する研究(第2報)-レーザトラッピングされたマイクロ球によるイメージング-, 2016年度精密工学会学術講演会春季大会, 2016年3月15日-17日, 東京理科大学(千葉県・野田市)
- ⑳ 山口悠希, 道畑正岐, 高谷裕浩, 水谷康弘, 光放射圧プローブを用いた表面微細形状の評価技術に関する研究(第3報)-レーザ捕捉微小球レンズの試料面近傍における位置制御-, 2016年度精密工学会学術講演会春季大会, 2016年3月15日-17日, 東京理科大学(千葉県・野田市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高谷 裕浩 (Takaya, Yasuhiro)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：70243178

(2) 研究分担者

林 照剛 (Hayashi, Terutake)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00334011

道畑 正岐 (Michihata, Masaki)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：70588855

水谷 康弘 (Mzutani, Yasuhiro)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：40374152