

令和 5 年 5 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14627

研究課題名（和文）フォトリックナノジェットの強度分布・位置・姿勢制御によるナノ3次元レーザー加工

研究課題名（英文）Nano three-dimensional laser machining by intensity distribution, position, and orientation control of a photonic nanojet

研究代表者

上野原 努 (Uenohara, Tsutomu)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10868920

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、サブマイクロメートルスケールの微細構造を作製するための技術として、分解能および自由度が高いレーザー加工技術の確立を目指し、フォトリックナノジェットという特異な光ビームの強度分布・位置・姿勢を制御する手法について検討した。フォトリックナノジェットの発生メカニズムを明らかにし、そのメカニズムに基づいた制御方法を導入することで、サブマイクロメートルの領域でビーム径を自由度高く制御することができ、位置や姿勢も自由度高く制御することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サブマイクロメートルスケールの光ビームの制御手法の確立により、従来のレーザー加工の分解能や自由度が向上した。また、このビーム制御技術は本研究課題で対象としたレーザー加工だけでなく、精密計測の分野にも応用可能であり、波及効果が大きい。このように、サブマイクロメートルスケールの加工技術を確立することで、従来では作製が非常に困難とされていた機能性構造の作製が可能になり、光エネルギーの効率的な利用に貢献することができる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated a method to control the intensity distribution, position, and orientation of a unique optical beam called a photonic nanojet in order to establish a laser machining method with high resolution and high flexibility for fabricating microstructures on the sub-micrometer scale. By clarifying the generation mechanism of photonic nanojets and introducing a control method based on this mechanism, it is possible to control the beam diameter with a high resolution in the sub-micrometer range and also to control the position and orientation with a high flexibility. The results obtained in this research are expected to be applied to further development of laser machining and precision measurement.

研究分野：生産工学

キーワード：レーザー加工 光強度分布 電磁場シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

環境・エネルギーおよび情報通信の分野において、「光」の選択的かつ効率的な利用に関心が集められている。光の波長(可視光では 400~800 nm)以下の構造を物体の表面に作ることで、特定の波長の光のみを反射させたり、広い波長域における吸収率を向上させたりすることが可能となり、通常のパルク材では得られない付加価値を与えることができる。所望の機能を実現させるためには、その機能に応じた構造が必要とされる。今後、より複雑化する選択的かつ効率的な光のエネルギー利用の要求に応えるためには、ナノスケールかつ曲面などの 3 次元構造を作製する必要があり、その加工法を確立することが求められている。ナノスケールの構造を作製する手法のなかでも、超短パルスレーザーを用いたレーザー加工は、走査によるフレキシブルで高速な加工を実現している。超短パルスレーザー加工における時間的な加工メカニズムに関する知見は数多く見いだされているものの、ナノスケールにおける光強度分布(空間的)の高分解能な制御による加工制御に関しては未解明な点が多く、曲面などの 3 次元加工は困難とされてきた。ナノ 3 次元レーザー加工を実現するためには、ナノスケールにおける超高分解能な光強度分布制御メカニズムの解明、さらにはナノスケールにおける光エネルギーと材料の相互作用による加工メカニズムの解明が重要である。

2. 研究の目的

本研究では、ナノスケールの 3 次元レーザー加工技術の確立を目指す。そこで、この目的を達成するための核となる技術として、フォトニックナノジェット(以降、PNJ: Photonic Nanojet [1])に注目した。PNJ は、誘電体マイクロ球にレーザーを照射することで発生する光ビームである(図 1)。PNJ のビーム径は入射光波長よりも小さく、非常に高い集光性能をもつ対物レンズによる焦点ビーム径と同等あるいはより小さい。また、その小さいビーム径を維持しながら、発散すること無くマイクロスケールの長い距離を伝搬する。この小さいビーム径かつ長いビームというものは、対物レンズを用いた従来の集光光学系では得られない特性である。この PNJ は、入射光、マイクロ球および周囲媒質に関連するパラメータによってその強度分布制御が可能であり、従来の集光光学系の強度分布制御性よりもはるかに高い制御性を有する。そこで本研究では、PNJ を用いた高分解能でフレキシブルなレーザー加工の実現のために、PNJ の強度分布、位置、姿勢を高い分解能かつ自由度で制御可能な方法を確立することを目的とする。

また、ナノスケールで微細構造を高い精度で作製するためには、ナノ空間における加工現象の理解が不可欠である。そこで、高度に制御した PNJ を用いて加工を行い、その際の光のエネルギーと材料の相互作用について明らかにする。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、大きく分けて(1)PNJ の強度分布、位置、姿勢制御に関する課題および、(2)光エネルギーと材料の相互作用に関する課題の 2 つの課題を設定して研究を遂行した。

まず、(1) PNJ の強度分布、位置、姿勢制御に関して遂行した。すでに明らかにされているマイクロ球の集光特性に基づいて、PNJ の(1-a)強度分布を制御する方法、(1-b)位置を制御する方法、(1-c)姿勢を制御する方法についての個別の課題へと展開した。(1-a)から(1-c)のすべての課題で共通して、はじめに、Finite-difference Time-Domain (FDTD)法と呼ばれる電磁場の解析手法を用いて、PNJ の強度分布、位置、姿勢を制御可能なパラメータを明らかにした。その後、シミュレーション結果をもとに、制御すべきパラメータとその分解能や範囲について整理した。必要に応じて、パラメータ制御のための新たな機構を既存の加工装置に導入した。最後に、シミュレーションと比較するために加工実験を行い、高い加工分解能および自由度を有したレーザー加工技術の確立のために重要となる制御方法についてまとめた。

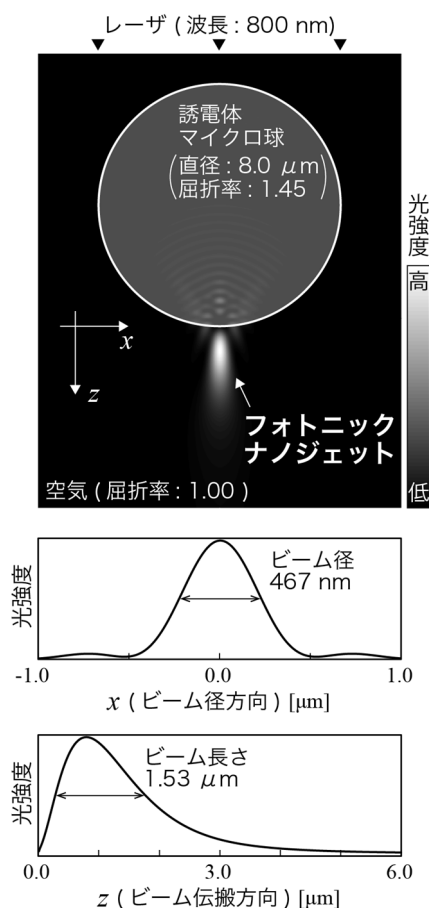


図 1 PNJ の強度分布とプロファイル

(1-a)から(1-c)までの具体的な研究内容について述べる。(1-a)PNJの強度分布制御に関しては、マイクロ球に入射する光の強度分布を変調させる方法を確認した。PNJの強度分布は、マイクロ球に入射する光の強度分布に依存する[2]。そこで、マイクロ球に入射する光の強度分布を高い自由度で制御することでPNJの強度分布を高い自由度で制御することが可能であると考えた。これを実現するために、空間光変調器を導入し、パターン生成系を構築した。(1-b)PNJの位置制御に関しては、マイクロ球に光を照射する際の波面制御およびマイクロ球の周囲の媒質の屈折率を変化させる方法を導入した。まず、マイクロ球に照射する集光ビームの波面について考察を行った。これにより、PNJの位置をサブマイクロメートルといった高い分解能で制御する方法について検討した。次に、マイクロ球の周囲の媒質を変化させることで、マイクロメートルオーダーで大きくPNJの位置を制御する方法について検討を行った。最後に、(1-c)PNJの姿勢制御に関しては、マイクロ球に入射する光の伝搬方向を制御する方法を導入した。ここでも(1-b)と同様に、集光ビームの波面に着目し、マイクロ球に入射する光の伝搬方向を集光ビームのシフトにより実現した。集光ビームのシフト量とPNJの姿勢の関係について検討した。

最後に、大きな2つめの研究課題として、(2)PNJ加工時の光エネルギーと材料の相互作用のリアルタイム計測を行った。具体的には、材料が光を吸収してプラズマ化し、そのプラズマが膨張することで発生する衝撃波の計測を行った。この衝撃波は、材料が光エネルギーを吸収した領域と大きな相関があると考えられる。PNJを用いたレーザ加工では、図1の強度分布からもわかるように、加工材料をマイクロ球の近くに位置決めする必要がある。したがって、PNJが材料に照射されることで発生した衝撃波はマイクロ球まで到達する。本研究ではPNJの位置決めのためにマイクロ球をピペットで保持する。ピペットで保持したマイクロ球は片持ちはりとなってしまうため、マイクロ球に衝撃波の圧力が及ぼされるとマイクロ球には復元力が働いたため振動する。この振動は衝撃波の圧力に依存するため、マイクロ球の振動を計測することは、衝撃波の物理特性すなわち光エネルギーと材料の相互作用を解明する第一歩に相当する。本研究では、共焦点光学系を用いて、加工と同時にマイクロ球の変位を計測し、加工時に発生する衝撃波の計測を行った。

4. 研究成果

研究の方法の番号と対応させて、得られた成果をまとめる。

(1-a) PNJの強度分布制御

入射光の強度分布を高い自由度で制御するために、既存の加工装置に空間光変調器を導入し、マイクロ球に入射する光の強度分布を制御可能な装置を構築した。図2の左側に示すように、中心に近いほど強度が高いガウシアンビームおよび、中心の強度が低く円環状に高い強度をもつドーナツビームの2つの異なる強度分布を有するビームを生成した。直径 $8\mu\text{m}$ のガラスマイクロ球を用いて、シリコンに加工実験を行ったところ、図2の右側に示すように、マイクロ球に照射したパターンに応じて、加工痕(断面プロファイル)が異なることがわかった。これは、マイクロ球に入射する光の強度分布を制御することで、発生するPNJの強度分布が制御可能であり、加工量を制御可能であることを示している。さらにその加工痕の大きさはサブマイクロメートルスケールであることから、この提案手法はサブマイクロメートルの加工分解能を有してかつ、フレキシブルに制御可能な方法であるといえる。

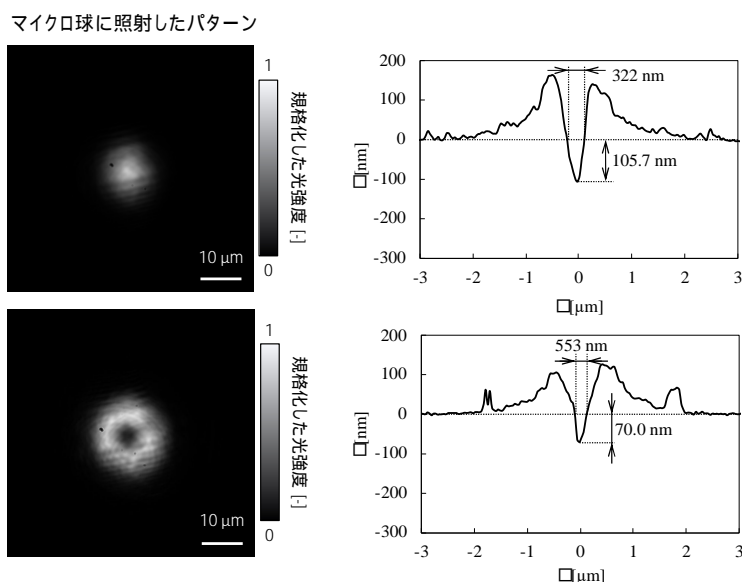


図2 マイクロ球に入射する強度分布制御によるPNJの強度分布制御と加工結果

(1-b) PNJ の位置制御

PNJ の位置を制御するために、マイクロ球に照射する光の波面について考えた。あらかじめ入射光の強度を高めるために集光ビームをマイクロ球に照射していたが、その集光ビームの波面について深く検討した。集光ビームは一度集光し、焦点で最も小さいビームになった後、発散して伝搬していく。このときの波面は球面波として考えられるが、焦点からの距離に応じて波面の曲率半径が異なることに注目した。つまり、マイクロ球と集光ビームの位置関係を制御することはマイクロ球に入射する光の波面を制御することに相当する。開口数 0.5 の集光ビームの焦点から z_{fs} の位置に直径 $8 \mu\text{m}$ のマイクロ球を設置したときの PNJ の強度分布のシミュレーション結果を図 3 に示す。マイクロ球を焦点からより遠い位置に設置するとことで、PNJ がマイクロ球のより近い位置に生成されることが明らかとなった。この知見により、より高い光強度で PNJ を材料に照射するための条件が明らかとなり、高精度高効率な加工の実現が可能であることが明らかとなった。

また、PNJ の位置を大きく変化させる手法として、マイクロ球の周囲の媒質についても検討した。マイクロ球の周囲の媒質を空気から水に変えることで、図 4 の(a)に示すように、著しく長い PNJ を生成することが可能である。これはマイクロ球との屈折率の差が小さくなったことにより、マイクロ球によって光が屈折する効果が小さくなるためである。高い強度が保たれている領域である焦点深度についても数マイクロメートルと非常に長くなっている様子が見られる。これを加工に用いた結果が図 4(b)である。周囲の媒質が空気の場合には、マイクロ球を加工試料から $1 \mu\text{m}$ 程度の位置に位置決めしなければならなかったのに比べて、水中では $2 \sim 4.5 \mu\text{m}$ と大きく離れた状態でもサブマイクロメートルスケールの径で加工が実現できた。

以上から、所望の加工に応じて、PNJ の位置を大きく変化させたい場合はマイクロ球の周囲の媒質を、PNJ の位置を精密に制御したいときはマイクロ球と集光ビームの相対位置を制御すべきであることが明らかとなった。

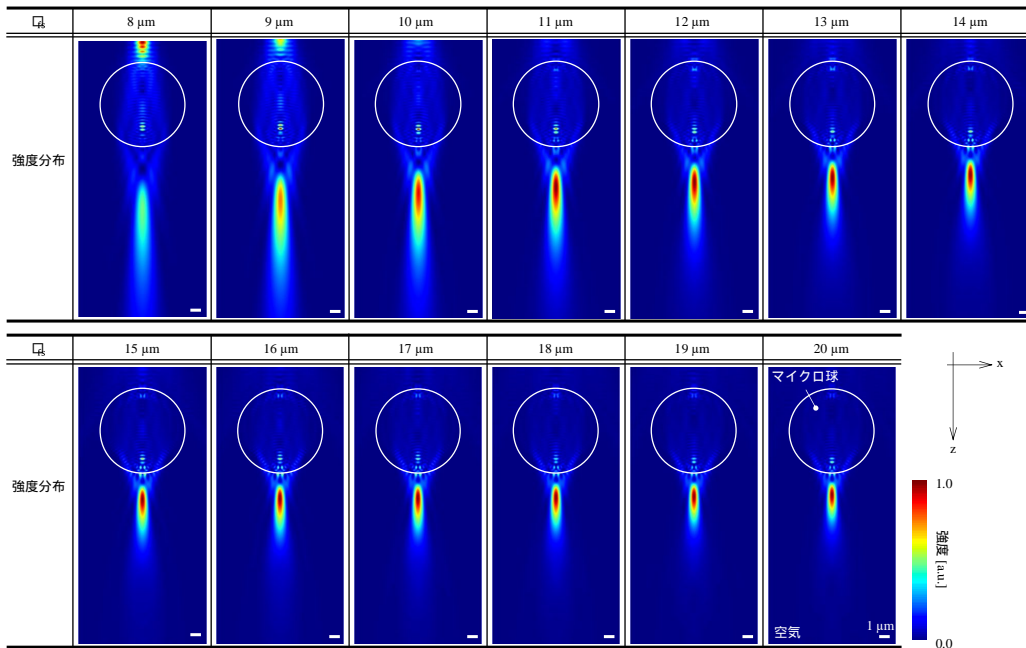


図 3 集光ビームの焦点位置制御による PNJ の位置制御

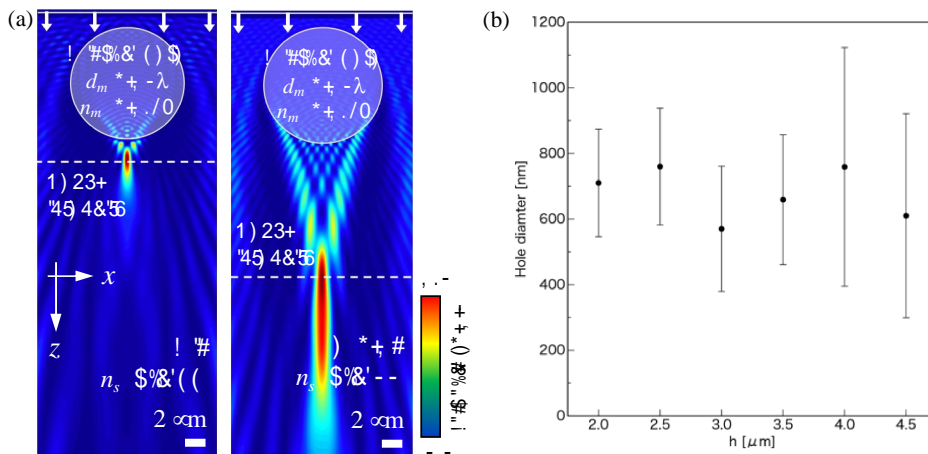


図 4 水中の PNJ 強度分布と長い焦点深度による加工結果

(1-c) PNJの姿勢制御

PNJの姿勢に関しては、(1-b)の集光ビームのデフォーカスに加えて横方向のシフトにより実現した。図5(a)に示すように、マイクロ球に集光ビームを照射する際に、デフォーカスしてかつシフトすることでマイクロ球に入射する光の波面は角度を持つようになる。したがって、発生するPNJは斜めに伝搬することになり、すなわちPNJの姿勢が制御可能である。図5(b)に、シフト量を変化させて加工を行ったときのSEM像を示す。左の大きな加工痕は参照用として集光ビームで加工したもので、右の加工痕が斜めに発生したPNJによるものである。上から下へとシフト量を大きくした結果であるが、マイクロ球の中心と加工痕の位置がズレていることから、確かにPNJの姿勢が制御できたことが実験的に確かめられた。

(1-a)から(1-c)で示したように、ナノ空間で光の強度分布を制御し、材料の除去加工実験によってその制御性を実証した例は国内外に例は無く、世界に先駆ける研究である。この成果は、レーザー加工のみならず、精密計測における空間分解能の向上にも貢献することが期待される。

(2) PNJ加工時の衝撃波検出

図6(a)に示すように、ピペットで保持したマイクロ球でPNJを発生させると、材料が光エネルギーを吸収し、やがて衝撃波が発生し、マイクロ球は振動する。共焦点光学系を用いてマイクロ球の上端の位置を加工と同時に計測した結果を図6(b)に示す。レーザー照射してからマイクロ球がおよそ $\pm 0.4 \mu\text{m}$ の振幅で振動している様子が捉えられた。これにより、レーザー加工時に衝撃波が発生していることがリアルタイムに計測可能であることを示した。本研究によるレーザー加工現象のリアルタイム計測は、今後より詳細に物理現象をリアルタイムで計測するための基盤技術として位置づけることができる。物理現象のリアルタイム計測で得た情報をもとに、所望の加工形状に応じて光強度分布をフィードバック制御することで、より高い加工分解能および精度を有したレーザー加工技術の確立が期待される。

参考文献

- [1] Z. Chen, et al., *Optics Express*, Vol. 12, No. 7, pp. 1214–1220, (2004).
- [2] T. Uenohara, et al., *Precision Engineering*, Vol. 60, pp. 274-279, (2019).

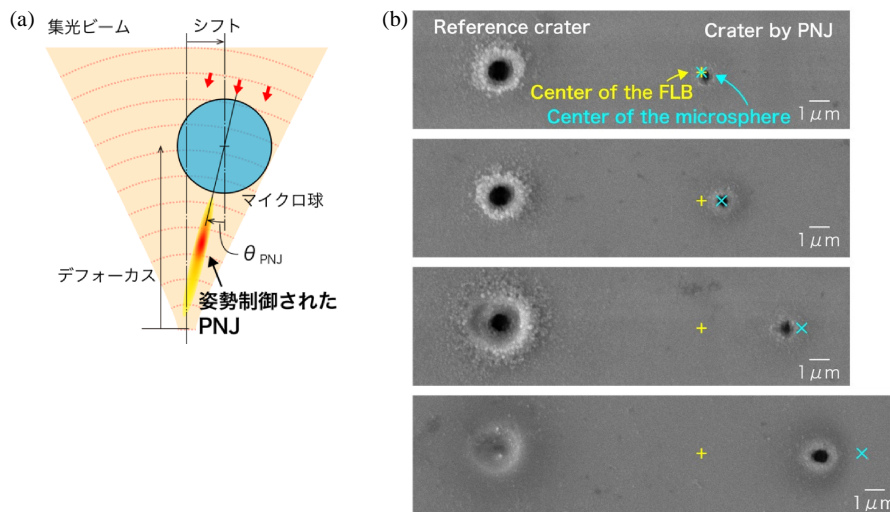


図5 集光ビームのシフト照射によるPNJの姿勢制御と加工結果

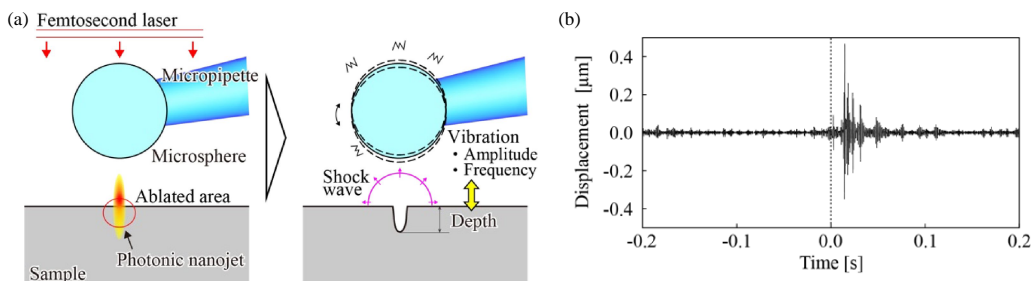


図6 PNJ加工における衝撃波の発生とマイクロ球の振動検出

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 0件）

1. 著者名 Reza Aulia Rahman, Tsutomu Uenohara, Yasuhiro Mizutani, and Yasuhiro Takaya	4. 巻 15
2. 論文標題 First Step Toward Laser Micromachining Realization by Photonic Nanojet in Water Medium	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Int. J. Automation Technol.	6. 最初と最後の頁 492-502
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2021.p0492	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16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Tsutomu Uenohara, Makoto Yasuda, Kosei Yamamoto, Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya
2. 発表標題 LASER MICRO MACHINING USING AN OBLIQUE PHOTONIC NANOJET WITH FOCUSED LASER BEAM IRRADIATION
3. 学会等名 ASME 2022 17th International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Yasuda, T. Uenohara, Y. Mizutani, Y. Takaya
2. 発表標題 In-process measurement of processing depth in laser ablation using a photonic nanojet
3. 学会等名 The 19th International Conference on Precision Engineering (ICPE 2022 in Nara) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安田諒, 上野原努, 水谷康弘, 高谷裕浩
2. 発表標題 フォトニックナノジェットを用いたアブレーション加工における加工深さのインプロセス計測に関する研究
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 上野原努, 水谷康弘, 高谷裕浩
2. 発表標題 フォトリソグラフィによるレーザー微細加工に関する研究
3. 学会等名 型技術ワークショップ2022inぎふ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安田諒, 上野原努, 水谷康弘, 高谷裕浩
2. 発表標題 フォトリソグラフィを用いたアブレーション加工における衝撃波を利用した加工深さのインプロセス計測に関する研究
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野口功太郎, 上野原努, 水谷康弘, 高谷裕浩
2. 発表標題 ホログラフィックフォトリソグラフィを用いた微細加工に関する研究
3. 学会等名 関西学生会2022年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tsutomu Uenohara, Reza Aulia Rahman, Yasuhiro Mizutani, and Yasuhiro Takaya
2. 発表標題 LASER MICRO MACHINING USING A PHOTONIC NANOJET IN WATER MEDIUM
3. 学会等名 ASME 2021 16th International Manufacturing Science and Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tsutomu Uenohara, Makoto Yasuda, Yasuhiro Mizutani, and Yasuhiro Takaya
2. 発表標題 DETECTION OF SHOCK WAVE IN LASER ABLATION USING A PHOTONIC NANOJET
3. 学会等名 XXIII IMEKO World Congress (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上野原 努, 高田 泰成, 水谷 康弘, 高谷 裕浩
2. 発表標題 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9報) 入射光の振幅分布と位相分布による強度分布の制御
3. 学会等名 2021 年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本 航生, 上野原 努, 水谷 康弘, 高谷 裕浩
2. 発表標題 ホログラフィックフォトニックナノジェットの姿勢制御によるレーザアブレーション加工に関する研究
3. 学会等名 2021年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤原 勇太, 上野原 努, 水谷 康弘, 高谷 裕浩
2. 発表標題 フォトニックナノジェットによる水中アブレーション加工の特性解明に関する研究
3. 学会等名 2021年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高田泰成, 上野原努, 水谷康弘, 高谷裕浩
2. 発表標題 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9報) 空間光変調器を用いたフォトニックナノジェットの強度分布制御
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsutomu Uenohara, Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya
2. 発表標題 SUB-MICROMETER SCALE LASER MACHINING USING POSITION CONTROLLED PHOTONIC NANOJET
3. 学会等名 Leading Edge Manufacturing/Materials&Processing 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Reza Aulia Rahman, Tsutomu Uenohara, Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya
2. 発表標題 IN-LIQUID LASER NANOMACHINING BY PHOTONIC NANOJET IN LASER TRAPPING SYSTEM
3. 学会等名 Leading Edge Manufacturing/Materials&Processing 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上野原努, レザアウリアラーマン, 水谷康弘, 高谷裕浩
2. 発表標題 フォトニックナノジェットを利用した液中レーザナノ加工に関する研究(第3報) 長焦点深度特性による加工特性
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安田諒, 上野原努, 水谷康弘, 高谷裕浩
2. 発表標題 フォトニックナノジェットを用いたレーザアブレーション加工のリアルタイムモニタリングに関する研究
3. 学会等名 関西学生会2020年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021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
---------	---------