

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 4 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04900

研究課題名(和文) 光放射圧ポテンシャルによる局所化を用いたサブ100nm分解能金属3次元構造創成

研究課題名(英文) Fabrication of 3-dimensional metal structure with sub-100 nm resolution using optical potential

研究代表者

道畑 正岐 (Michihata, Masaki)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：70588855

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電場強度勾配によって形成される光放射圧ポテンシャルに着目した新規のマイクロナノスケールの付加工技術を提案する。本研究課題では、その加工原理の検証を行なった。マイクロ粒子を直径10 $\mu\text{m}$ 程度の水滴内に混入させ、その水滴群を光放射圧によって引き寄せ、集積加工を行う。ベッセルビームを用いてその実験を行なった結果、直径1 $\mu\text{m}$ のシリカ微粒子を縦一列に構造化することができ、本研究で提案する手法の原理を検証することができた。ただし、集積過程を観察した結果、液滴の供給方法に課題が残り、今後は液滴供給についての新たな手法について検討する必要があることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光放射圧を用いた集積加工技術はこれまでに提案されておらず、このような空気中でマイクロ/ナノスケールの複雑構造を加工できる技術が構築されれば、これまでにない機能を持った製品製造が期待できる。本研究では、その加工原理の検証を行うことができ、今後の新しい加工技術の発展に向け貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we proposed a novel micro-scale additive manufacturing method based on the optical potential. The basic principle of the proposed method involves accumulating and stacking particles dispersed in air by using optical radiation pressure. In this project, the water droplet of several  $\mu\text{m}$  in diameter containing particles suspended in space were successfully trapped in the optical potential of Bessel beam and then the only particles were deposited on the substrate. As a result of processing experiment, the silica particles with a diameter of 1  $\mu\text{m}$  could be three dimensionally structured on the axis of the Bessel beam. The trajectory of the accumulated particles was numerically estimated and experimentally observed. The numerical and experimental results agreed well; specifically, the background flow carried the particles to the optical axis of the Bessel beam, and then the particles were localized at the bottom of the optical potential valley on the substrate.

研究分野：加工計測学

キーワード：光圧 付加製造 インプロセス ベッセルビーム

1. 研究開始当初の背景

製品設計を劇的に変化させる次世代機能部品には、金属 3 次元微細構造の創成技術が不可欠である。例えば、赤外/可視光メタマテリアルは数 10 nm の 2 次元/3 次元の金属構造で人工誘電体を構成する。このような、100 nm を超える“サブ 100 nm”分解能の金属 3 次元構造創成技術が新たな機能を持つ製品開発のキーテクノロジーとなっている。

ナノメートルオーダーの微細構造は、機械加工や放電加工では加工困難であり、また電子線ビームリソグラフィや光リソグラフィは数 10 nm の構造創成は可能であるが、3 次元構造が難しい。そのような背景の基、これまでも、金属 3 次元微細構造創成技術が提案されてきたが、サブ 100 nm の達成できる技術は僅かしかない。また、より汎用的には、サブ 100 nm 以下の金属 3 次元構造を、空气中環境で加工する、という厳しい要求を満足する加工原理が必要とされている。本研究課題で提案する手法は、この要求を達成する従来にない新規な加工原理を目指すものである。

2. 研究の目的

従来加工法は、集光レーザービームウェスト近傍の高強度光エネルギーによる光還元/析出が主であるが、回折限界による加工分解能の限界があった。本研究では、電場強度勾配によって形成される光放射圧ポテンシャルに着目した新規技術を提案する。光放射圧による微小物体の捕捉は回折限界に制限を受けず、集光ビームのビームウェスト(光放射圧ポテンシャルの谷)に位置変動 10 nm 以下で局所化ができる。局所化した金属ナノ粒子を 3 次元的に集積することで、従来困難な 100 nm 以下の分解能を持つ加工法の確立を目指す。本研究課題では、マイクロ粒子を用いた加工原理の検証を目的とした。

3. 研究の方法

提案手法の基礎原理は、光放射圧による粒子の集積である。今、高い NA の対物レンズによって収束したビームの焦点面内に粒子が侵入した場合を考えると、光軸に垂直な方向では、勾配力によって粒子はビームスポット中心に引き寄せられる力を受ける。つまり、光放射圧ポテンシャルの安定な中心に捕捉される。外乱や揺らぎのない理想条件において、粒子は常にビームの中心で安定するため、高精度に粒子を位置決めできる。現実には、ビームの揺らぎやブラウン運動などの要因でビームスポット中心からやや幅を持つ範囲に局在する。このように粒子をビームスポットに局在させ、それを積み上げることで 3 次元の構造を創成する。

次に、提案手法では、空気環境下で加工を行うため、被加工材料を集光ビーム近傍に導入する必要がある。そこで図 1 に示すように、被加工材となる粒子を水などの溶媒に混ぜ、ミスト化する。その粒子を含んだミストを集光ビームによってビームスポットに局在させる。ミストは、粒子のキャリアとしての機能を果たすため、広範囲に分布する粒子を集めることができる。液滴サイズは 10 μm 程度であるため、媒質は気化し、含有していた粒子のみが集積され、ビームウェストを走査することで 3 次元構造を加工できる。加工の分解能を上げるためには、サブマイクロからナノスケールすることで行える。

本加工手法は、粒子/液滴に対する光圧力作用を利用するため熱影響がほとんど存在せず、熱影響による加工範囲の拡大が起きない。また、従来の光強度をベースとした加工法では加工閾値の調整によって加工分解能が大きく影響するが、本手法では粒子の局在範囲は光放射圧ポテンシャルで決定されるため、加工閾値の精密調整は不要である。

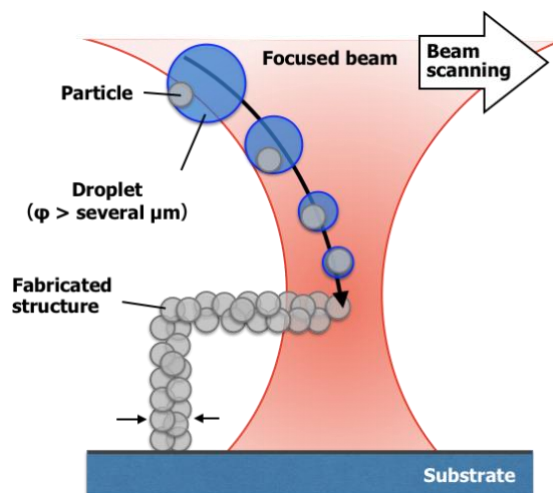


図 1 加工原理のコンセプト

#### 4. 研究成果

本研究課題では、提案手法の原理検証を目的としている。つまり、粒子を含む液滴を空間に散布し、液滴がキャリアとして粒子を光放射圧ポテンシャルに導入し、最終的にビームスポットで粒子のみが構造化するという原理の基礎検証を行う。そこで、原理検証を容易にするためベッセルビームを用いた（図 2）。ベッセルビームは光軸垂直面内の強度分布がほぼ等しいまま伝搬するビームであり、光軸中心の 0 次光のビーム幅は集光ビームに近い数  $\mu\text{m}$  を持ちながら、集光ビームの焦点深度の数  $\mu\text{m}$  より遥かに長い数  $100 \mu\text{m}$  の伝搬距離を持たせることができる。0 次光の光放射圧ポテンシャルを利用することで液滴はビームの中心に捕捉され、散乱力の駆動により光軸に沿って移動する。つまり、ビーム走査なしに垂直 3 次元構造が創成できる（図 2）。そのため、側方観察により液滴の挙動観察も容易であり、本提案技術の原理検証に適している。本論文では、このベッセルビームを用いた加工原理の検証を目的とした。

ミストを供給し、その後、ミスト供給の流れを停止させた状態で、加工を行った。まず、レーザーパワーは約  $6 \text{ W}$  とした。その結果を図 3 に示す。基板のほぼ水平方向から走査型電子顕微鏡で観察した結果である。図に示すように粒子が高さ方向に 10 数個積み上がっていることが確認でき、液滴速度を低下させることで高い精度で粒子を集積することが可能であった。繰り返し実験を実施した結果、図 3 同様の構造が得られた。以上より、本研究で提案する光放射圧ポテンシャルによってマイクロスケールの 3 次元付加加工が実現可能であることが確認できた。構造が傾斜しているのは、加工後に傾いたかあるいは光軸が基板に対して元々傾いていた可能性がある。また、部分的に凝集が見られる箇所については液滴に複数粒子が含まれていた可能性が考えられるが、今後詳細な検討は必要である。

次に、その集積過程において、マイクロ粒子がどのような軌跡を経て集積されるのかを、高速度カメラを用いて直接観察を行った。一般的な集光ビームを用いたマイクロスケール付加加工は液中や真空中で行われるが、本研究の提案手法は空気中で行うため、適切に集積材料をビーム領域に供給する必要がある。

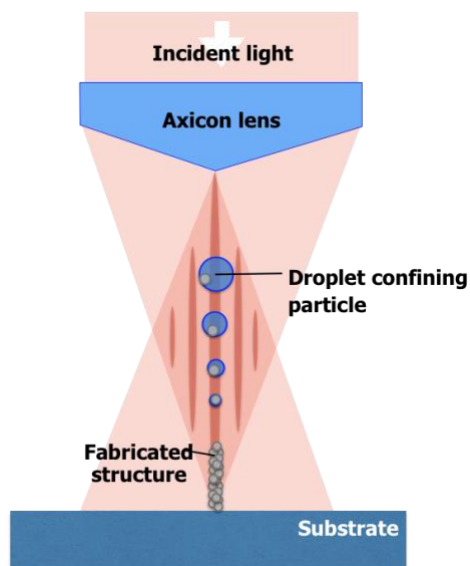


図 2 ベッセルビームによる加工イメージ

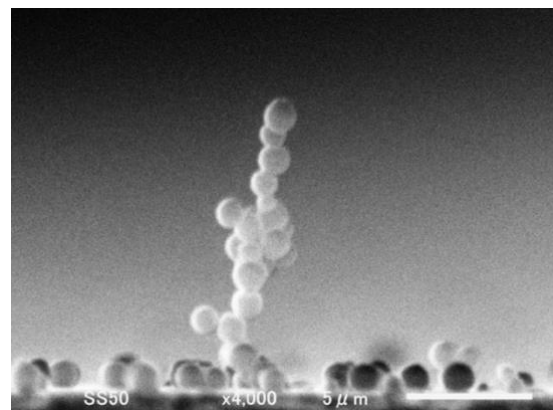


図 3 提案手法を用いたマイクロ粒子の積層加工結果

そこで現状、ナノ/マイクロ粒子を水溶液中に分散させ、その粒子を含んだ溶液をミスト状にした液滴を加工ビーム付近に供給しているが、どのように粒子がビーム内に侵入しているのかを確認することは、今後の供給方法最適化において重要となる。

実験では、粒子の軌跡観察を容易にするため、ベッセルビームを用いた。1  $\mu\text{m}$  のポリスチレン粒子を純水に分散させ、超音波加湿器を用いてミスト状にした液滴を、ベッセルビーム照射部に供給した。レーザーは上方から照射し、基板上に構造を創成する。レーザーパワーは  $1 \text{ W}$  程度とした。集積する粒子を、フレームレート  $5000 \text{ fps}$  で側面観察した。観察結果を図 1 に示す。浮遊している粒子が、中央近傍に照射されている 0 次ベッセルビーム領域に侵入した後、基板上に集積されている様子が観察できた。浮遊時の移動速度は  $2 \text{ mm/s}$ 、ビームで加速された時の移動速度は  $50 \text{ mm/s}$  以上であった。このように、集積粒子は、周囲流体の流れや集光ビームの放射圧を受け 0 次ベッセルビームに引き付けられ、ビーム内侵入後に光放射圧によって強く駆動され基板上に集積されている。これより、より効率的に液滴をビーム領域に供給するためのチャンバーなどが必要であることがわかった。今後は、粒子供給方法の最適化と集光ビーム走査を用いたより複雑な構造創成を目指す。

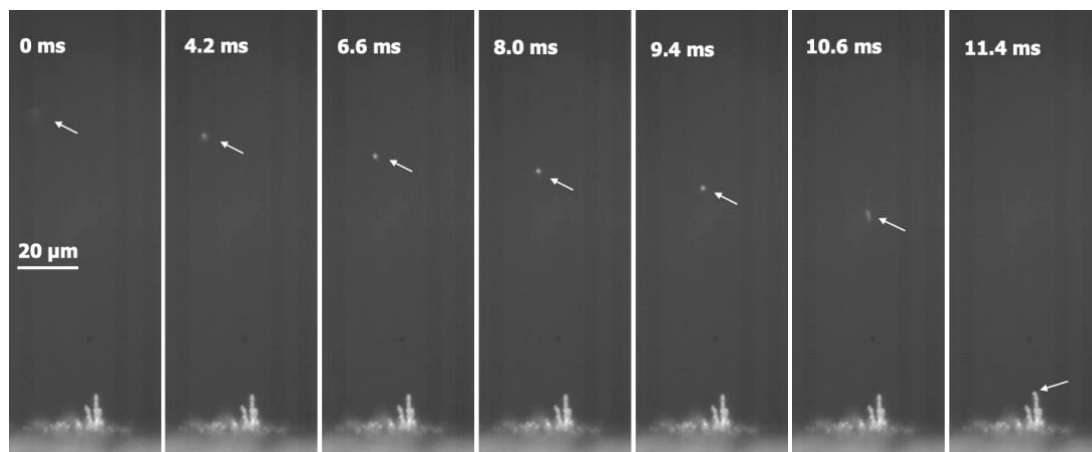


図4 マイクロ粒子の集積過程の観察結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Michihata Masaki, Kim Jonggang, Takahashi Satoru, Takamasu Kiyoshi, Mizutani Yasuhiro, Takaya Yasuhiro	4. 巻 1
2. 論文標題 Surface Imaging Technique by an Optically Trapped Microsphere in Air Condition	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nanomanufacturing and Metrology	6. 最初と最後の頁 32 ~ 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41871-018-0004-0	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 Michihata Masaki, Yokei Makoto, Kadoya Shotaro, Takahashi Satoru	4. 巻 3
2. 論文標題 Micro-scale Additive Manufacturing Using the Optical Potential Generated by a Bessel Beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanomanufacturing and Metrology	6. 最初と最後の頁 292 ~ 298
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41871-020-00079-y	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 MICHIHATA Masaki, HAYASHI Masahiro, YOKEI Makoto, TAKAMASU Kiyoshi, TAKAHASHI Satoru	4. 巻 85
2. 論文標題 Fundamental study on micro-scaled additive manufacturing using optical potential induced by optical radiation pressure by Bessel beam	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 19-00244
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00244	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Masahiro Hayashi, Masaki Michihata, Kiyoshi Takamasu, Satoru Takahashi
2. 発表標題 Basic study on laser additive processing for nanostructures based on optical trapping potential
3. 学会等名 ICPE2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林 政洋, 道畑正岐, 高増 潔, 高橋 哲
2. 発表標題 光放射圧ポテンシャルに基づく3次元微細構造加工に関する基礎的研究 - ナノ粒子の2次元局所化性能の評価 -
3. 学会等名 第12回日本機械学会生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 代慶 真, 林 政洋, 道畑正岐, 高増 潔, 高橋 哲
2. 発表標題 光放射圧ポテンシャルに基づく3次元微細構造加工に関する基礎的研究(第2報) -ラジアル偏光ビームを用いた空气中ミスト粒子の光トラップ効率の向上-
3. 学会等名 2019年度精密工学会学術講演会春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林 政洋, 林 晃平, 道畑正岐, 高増 潔, 高橋 哲
2. 発表標題 光放射圧ポテンシャルに基づく3次元微細構造加工に関する基礎的研究 (第1報) -ベッセルビームによる加工原理検討に向けた装置開発-
3. 学会等名 2018年度精密工学会学術講演会春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林 晃平, 林 政洋, 道畑正岐, 高増 潔, 高橋 哲
2. 発表標題 光放射圧ポテンシャルによる局所化を用いた金属三次元微細構造創成 - 金属ナノ粒子局所化の確率解析 -
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yohei Makoto, Masahiro Hayashi, Masaki Michihata, Kiyoshi Takamasu, Satoru Takahashi
2. 発表標題 Optical trapping of airborne droplet for laser fabrication of 3-dimensional structure based on optical trapping potential using radially polarized beam
3. 学会等名 OPTM (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yohei Makoto, Masahiro Hayashi, Masaki Michihata, Kiyoshi Takamasu, Satoru Takahashi
2. 発表標題 Experimental investigation on laser additive processing method for nanostructures based on optical trapping potential
3. 学会等名 ASPEN2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 代慶 真, 林 政洋, 道畑正岐, 高増 潔, 高橋 哲
2. 発表標題 光放射圧ポテンシャルに基づく3次元微細構造加工に関する基礎的研究(第2報) -ラジアル偏光ビームを用いた空气中ミスト粒子の光トラップ効率の向上-
3. 学会等名 2019年度精密工学会学術講演会春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 代慶 真, 林 政洋, 道畑正岐, 高増 潔, 高橋 哲
2. 発表標題 光放射圧ポテンシャルに基づく3次元微細構造加工に関する基礎的研究(第3報) -液滴を用いた構造化原理の実験的検討-
3. 学会等名 2019年度精密工学会学術講演会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 代慶 真, 道畑正岐, 高増 潔, 高橋 哲
2. 発表標題 光放射圧ポテンシャルに基づく3次元微細構造加工に関する基礎的研究(第4報) -ハイスピードカメラによる加工原理の検討-
3. 学会等名 2020年度精密工学会学術講演会春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 道畑正岐, 代慶 真, 門屋祥太郎, 高増 潔, 高橋 哲
2. 発表標題 光放射圧ポテンシャルに基づく3次元微細構造加工に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本機械学会 2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="https://masakimichihata.weebly.com">https://masakimichihata.weebly.com</a>
---

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
---------	---------