The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	フォトニックナノジェットを用いた多軸レーザアブレーション加工に関する研究
Author(s)	上野原, 努
Citation	大阪大学, 2019, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/73560
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　　上野原　努　　）	
論文題名	フォトニックナノジェットを用いた多軸レーザアブレーション加工に関する研究

論文内容の要旨

マイクロメートルあるいはサブマイクロメートルスケールの微細構造は，反射防止や構造色など，光学的に特異な機能を発揮することが知られている．このような構造を作製するために要求される加工分解能は，数百ナノメートルあるいはそれ以下である．また，近年では局所的に構造を変化させることや，曲面を持った構造の要求が高まり，加工分解能が高く，自由度が高い加工法が求められる．本研究では，レーザアブレーション加工にフォトニックナノジェット(Photonic nanojet: PNJ)と呼ばれる光ビームを応用することで，加工分解能の向上と加工自由度の向上を目指した．PNJは誘電体のマイクロ球にレーザを照射した際に発生するビームである．PNJは，入射光の波長よりも小さいビーム径を維持しながら，波長の2倍程度の距離をほとんど発散せずに伝搬する．すなわち，従来の集光光学系では得られなかった，サブマイクロメートルスケールのビーム径かつ長い焦点深度が得られる．この特性によって，PNJの位置や姿勢を制御した際にも，サブマイクロメートルスケールの加工分解能を維持可能であり，自由度の高い加工を実現可能であると考えられる．本論文では，PNJを用いたサブマイクロメートルスケールの多軸レーザアブレーション加工技術の確立を目指し，PNJの強度分布，姿勢および位置の制御による加工特性を明らかにした．マイクロ球に入射するビームの入射角を制御することで，PNJの姿勢制御を実現した．また，マイクロ球をマイクロピペットで保持し，加工試料から離した状態で球の位置制御を行うことで，PNJの位置制御を実現した．共焦点光学系による加工試料表面およびマイクロ球上端の位置検出系の実装によって，位置検出の繰り返し精度が0.006 μmといった精密な位置決めを実現した．マイクロ球に対する入射光の角度制御による加工実験から，レーザ入射角によってPNJの姿勢が制御可能であることを明らかにした．また，その姿勢制御されたPNJによって，シリコン基板に対して加工径0.47 μmを実現し，PNJがサブマイクロメートルスケールの加工に有効であることを示した．さらに，PNJの姿勢を制御した際にも，長い焦点深度特性によって，加工分解能を著しく低下させることなく，加工自由度の向上が可能であることを電磁場シミュレーションによって明らかにした．次に，PNJの位置制御による加工実験において，マイクロ球表面から2 μm離れた位置で加工試料にPNJを照射することで加工径0.61 μmを実現した．また，その状態からさらにマイクロ球を加工試料に1 μm近づけた状態でも，加工径1.14 μmが実現された．PNJをデフォーカスした場合でも，PNJの長い焦点深度特性によって，マイクロメートルおよびサブマイクロメートルの加工分解能を維持可能であることが明らかとなった．これらの加工結果は，電磁場シミュレーションによる定量的な加工径の推定結果と良い一致を示した．PNJの位置制御による加工実験および電磁場シミュレーションから，サブマイクロメートルスケールのPNJビーム径かつ長い焦点深度特性によって，加工分解能を維持したままの位置制御および姿勢制御が，多軸レーザアブレーション加工において有効であることを示した．以上より，PNJのサブマイクロメートルスケールのビーム径によって，レーザアブレーション加工の加工分解能は向上し，さらに，長い焦点深度特性によって，位置制御および姿勢制御による加工が可能であることが明らかとなり，レーザアブレーション加工の自由度が向上した．

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　上野原　努　）	
論文審査担当者	（職）　氏　名 主 査　教 授　高谷 裕浩 副 査　教 授　山村 和也 副 査　教 授　芝原 正彦 副 査　准教授　水谷 康弘

論文審査の結果の要旨

物体表面に作製したサブマイクロメートルスケールの 3 次元構造が、光の反射防止や撥水など様々な機能を発現することが知られている。近年では，効率的なエネルギ利用の観点から微細な自由曲面形状も求められており、高分解能および高自由度な加工法の開発が求められている。そこで本論文は、サブマイクロメートルスケールの自由曲面形状加工法としてフォトニックナノジェット(Photonic nanojet: PNJ)を用いた多軸レーザアブレーション加工法を提案している。PNJ は誘電体マイクロ球にレーザ光を照射することで発生し、1 μm 以下のビーム径がほとんど発散することなく 1 μm 以上の距離を伝搬するといった、小さいビーム径かつ長い焦点深度をもつ光ビームである。従来の集光系では得られない PNJ の特性を応用することで、サブマイクロメートルスケールの加工分解能かつ多軸加工による自由度の向上が実現できる。PNJ を用いた多軸レーザアブレーション加工法の確立に向けて、PNJ の「強度分布制御」による加工領域の制御、「姿勢制御」による加工自由度の向上、「位置制御」による長い焦点深度特性の応用、といった 3 つの制御に基づいた加工制御方法を考案し、その加工の特性を単結晶シリコンに対する加工実験によって明らかにしている。また、電磁場解析に基づいて加工領域を推定する加工シミュレータを構築することで、PNJ の加工特性を解析的にも検討している。主な成果を要約すると以下の通りである。

1. 加工径や深さは、照射した PNJ の強度分布と試料の加工しきい値の関係によって決まるものである。PNJ の強度分布を入射パワーによって制御して行った加工実験から、PNJ の強度分布制御によって加工径および深さの精密な制御が可能であることを明らかにしている。
2. マイクロ球に照射するレーザの入射角度を制御することによって PNJ の姿勢を制御する方法を考案し、加工自由度の向上に関して検討している。マイクロ球へのレーザ入射角に応じて PNJ の姿勢が制御可能であることを加工実験によって明らかにすることで、PNJ の姿勢制御による多軸加工の実現可能性、すなわち自由曲面形状加工の実現可能性を示している。
3. PNJ の位置制御による加工実験から、PNJ を加工試料からデフォーカスした場合でも 1 μm 程度あるいはそれ以下の加工径を実現可能であることを明らかにしている。この加工結果は、電磁場解析に基づく加工シミュレーションによる加工径の推定結果とよく一致している。したがって、PNJ の長い焦点深度特性を応用することで、サブマイクロメートルスケールの加工分解能を持つロバストな加工が実現可能であることを実験的および解析的に明らかにした。

以上のように、本論文は PNJ を用いた多軸レーザアブレーション加工の実現のために、強度分布、姿勢および位置の制御による加工実験によって、PNJ を用いた加工の特性を明らかにしている。集光ビームを用いた従来のレーザ加工よりも高い分解能を実現し、また、多軸化による加工自由度の向上も期待される。さらに、電磁場解析に基づいて加工径を推定する加工シミュレーションによって、本加工手法の有効性を解析的にも示している。これらの成果は、サブマイクロメートルスケールの微細加工技術の発展に大きく寄与する。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。