OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	A study on laser submicrometer machining by photonic nanojet utilizing water medium
Author(s)	Rahman, Reza Aulia
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105442
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name （REZA AULIA RAHMAN）	
Title	A study on laser submicrometer machining by photonic nanojet utilizing water medium （水媒質中フォトニックナノジェットを利用したレーザサブマイクロメートル加工に関する研究）

Abstract of Thesis

Since Feynman's 1959 groundbreaking vision of nanoscale technology, miniaturized products and their fabrication methods have become central in current engineering practice. This thesis investigates a novel laser-assisted machining method that employs photonic nanojet (PNJ) effects in a water medium. While ultrafast laser machining offers excellent spatial precision, it is constrained by the diffraction limit. The PNJ, formed by light interacting with dielectric microsphere, overcome this limitation by enabling sub-diffraction focusing. Although PNJ machining was first demonstrated in air, it suffered from debris redeposition and limited working distance and depth of focus. To address these challenges, this research develops PNJ machining in water, achieving submicrometer resolution and improved machining quality. Numerical simulations and experiments provide a comprehensive understanding of PNJ behavior in water. Finite-difference time-domain (FDTD) simulations showed that water medium increases the PNJ working distance and depth of focus while maintaining submicrometer beam diameters. Experiments confirmed ablation diameters as small as 0.57 ± 0.19 μm in the x- direction and sub-0.8 μm in the y-direction, with smoother surfaces compared from processing in air medium. Compared with conventional laser machining under identical parameters, 1.08 ± 0.07 μm hole diameter in the x-direction was obtained. PNJ machining in water provides an extended working distance, deeper depth of focus, reduced redeposition, and cleaner features relative to air-based PNJ and conventional methods. Further enhancement was achieved using second-harmonic generation (SHG) illumination, which reduced the PNJ beam diameter to 0.43 μm and increased the working distance to 4.18 μm. Experimental results showed sub-600 nm, deeper ablation marks and an extended machining distance of up to 8 μm. Combining SHG with controlled defocusing further improved uniformity and depth control, enabling high-quality 3D microfabrication. In summary, this work establishes PNJ machining in water as a high-precision, environmentally friendly approach for submicrometer fabrication, integrating ultrafast lasers, PNJ effects, and water immersion to improve feature size control, surface quality, and process versatility. The method shows strong potential for MEMS/NEMS, optoelectronics, and next-generation semiconductor manufacturing.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　　名（　REZA AULIA RAHMAN　）		
	（職）	氏　　名
論文審査担当者	主 査　教授	高谷　裕浩
	副 査　教授	井野　秀一
	副 査　教授	榎本　俊之
	副 査　准教授	水谷　康弘

論文審査の結果の要旨

本論文は、水媒質中におけるフォトニックナノジェット（Photonic Nanojet: PNJ）を利用した新規なレーザーアブレーション加工法を提案している。従来の超短パルス集光レーザーによるアブレーション加工では、高速な加工を実現する一方で加工分解能は回折限界によってマイクロメートルオーダに制限されていた。そこで本研究では、直径数マイクロメートルの誘電体マイクロ球とレーザー光との相互作用によって形成される PNJ を利用し、回折限界以下の集光を可能とすることによって、この制限を克服している。一方、PNJ 加工はこれまで空気中で実証されてきたが、PNJ の作動距離（Working distance: WD）および焦点深度（Depth of focus: DOF）が短いために加工試料をマイクロ球の近傍に位置決めする必要があった。そのため、アブレーションで生じたプルームがマイクロ球に衝突することで、プルーム内のアブレーションされた除去材料が加工領域付近に再堆積することで加工品質が低下するという課題が存在していた。これらの課題を解決するため、本研究では水媒質中における PNJ 加工を提案し、サブマイクロメートルの加工分解能を有してかつ加工品質の向上を実現している。主な成果を要約すると以下の通りである。

1. 有限差分時間領域法（Finite-difference time-domain: FDTD）を用いた電磁場解析により、水中における PNJ は、空気中における PNJ よりも数倍長い WD および DOF を有することを明らかにしている。長い WD により、水媒質中における PNJ 加工では加工試料をマイクロ球から離れた位置に位置決めすることが可能となる。これにより、アブレーションで生じたプルームがマイクロ球に衝突することなく周囲の水媒質によって効果的に排除され、加工品質の向上が期待される。
2. 加工試料として単結晶シリコン基板を用いて、穴加工実験によって水中における PNJ の加工特性を明らかにしている。シリコン基板とマイクロ球の間の距離を h とすると、空気中の PNJ 加工では $h = 2$ μm にマイクロ球を位置決めする必要があるのに対し、水中の PNJ 加工では $h = 5$ μm の位置で加工が可能となる。加工実験によって、最小加工径が 0.57 μm、最大でも 0.76 μm の加工を実現し、$h = 2$ ～5μm の全域でサブマイクロメートルオーダの加工を実現している。また、加工痕周囲の電子顕微鏡観察から、水中での PNJ 加工では空気中と比較してデブリの堆積が抑制されていることが検証されている。これにより、水中における PNJ 加工ではプルームの効果的な排除が可能となることで加工品質が向上することが実証されている。
3. さらなる加工分解能の向上のために、フェムト秒レーザの第二高調波を用いた加工実験を遂行している。その結果、$h = 3$ ～8μm においてサブマイクロメートルの穴加工径が得られている。さらに、加工痕の EDS 解析により、空気中の PNJ 加工では加工領域が酸化していたのに対して、水中の PNJ 加工では水の冷却効果によって酸化を抑制していることを明らかにしている。

以上のように、本論文は、アブレーション加工の分解能および品質を決定する要因を精査し、水媒質中における PNJ 加工作用による高分解能、高品質な加工法を提案し、その有効性を電磁場解析と実験によって実証している。さらに、本手法の産業分野への適用範囲が拡がるとともに、加工対象がサブマイクロスケールへと拡張されることにより、MEMS／NEMS、光電子工学、ならびに次世代半導体製造分野への適用が期待される。これらの成果は、マイクロ機械構造部材や光学および電子デバイス製造における微細加工技術の発展およびそれに基づく機能の高度化に大きく寄与する。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。