OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	高強度パルスレーザ加工における表面電界強度分布に依存した超解像微細構造形成に関する研究
Author(s)	竹中, 啓輔
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/91928
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　（竹　中　啓　輔）	
論文題名	高強度パルスレーザ加工における表面電界強度分布に依存した 超解像微細構造形成に関する研究

論文内容の要旨

材料表面にナノオーダースケールの微細構造を形成することで表面の光学的特性や固体流体との接触特性を変化させ，新機能を材料表面に付与できることが知られており，当構造を形成する加工技術が求められている．表面微細加工に有用な加工技術の一つとしてフェムト秒レーザ加工があるが，光の回折限界によりレーザ波長以下のナノオーダースケールの微細加工である超解像微細構造形成は難しい．超解像微細構造としてはアブレーションクレータ底面に自己組織的に形成されるナノ周期構造がある．しかしながら，その構造の周期と位相の制御方法は確立されていない．また，任意のパターンを有する超解像微細加工が実現されればレーザ加工の応用先がさらに広がるが，波長の異なる複数パルスを組み合わせた二波長ダブルパルス照射方式を用いたアブレーション特性はわかっておらず加工特性の評価と物理機構の解明が必要である．本研究では，超解像微細構造形成機構解明のために高強度パルスレーザであるフェムト秒レーザ照射時に材料表面に生じる電界強度分布に着目し，電界強度分布を制御可能なレーザ照射方式の考案と電界強度分布がアブレーション加工現象に与える影響を明らかにすることを目的とした．

第1章では，本研究の背景および目的を述べ，表面新機能創製のためのフェムト秒レーザを用いたアブレーション加工の有用性について述べた．また，材料の表面誘電率がナノ周期構造の周期に寄与する可能性があること，ダブルパルス照射方式が表面波の位相に影響を与える可能性があると推察した．加えて，二波長ダブルパルス照射方式を用いることでアブレーション抑制メカニズムの解明につながる可能性について述べた．

第2章では，フェムト秒レーザ照射によって形成されるナノ周期構造の周期を制御するためポリマーを用いてチタン表面の誘電率を変化させ，表面誘電率がナノ周期構造の周期に与える影響を実験結果に基づき解析した．その結果として，誘電率がナノ周期構造の周期に与える影響が明らかになり，波長変換では得られない周期を有するナノ周期構造を誘電率制御によって形成できる可能性を示した．

第3章では，フェムト秒レーザ照射によって形成されるナノ周期構造の位相を制御するため，二波長ダブルパルス照射方式を用いてチタン基板へ集光照射しフルーエンスや遅延時間によるナノ周期構造の構造変化を実験結果に基づき解析した．二波長ダブルパルス照射方式で形成されたナノ周期構造の周期と位相の安定性を定量評価するための方法(Perpendicular Period and Phase method; P^3S法)を提案し，P^3S法を用いて二波長ダブルパルス照射の実験結果と3次元電磁粒子解析コードを用いたシミュレーション結果との比較を行い，均一な周期と位相を有するナノ周期構造形成がフェムト秒レーザのフィラメンテーションによって誘起される電界強度分布と関係があることが示唆された．

第4章では，任意のパターンを有する超解像微細構造実現のため，二波長ダブルパルス照射時のフェムト秒レーザアブレーション特性について述べた．アブレーション深さに着目し，第一パルスにより発生するプラズマと第二パルスの相互作用の影響を実験結果に基づき明らかにした．波長の組み合わせ，フルーエンスおよび遅延時間がアブレーション深さに与える影響を解析し，最もアブレーションが抑制される条件を明らかにした．加えて，アブレーション抑制がレーザパルスの臨界密度とアブレーションプラズマ密度に関係があることを明らかにした．

第5章では，非金属材料であるポリマー表面にナノ周期構造を形成する方法を考案し，フェムト秒レーザを用いた表層加工適用先のさらなる拡大を目指した．ポリメチルメタクリレート(PMMA)フィルムとチタン基板を密着させ，PMMAフィルムを透過させてチタン基板にフェムト秒レーザを集光照射することでPMMA表面にナノ周期構造を形成し，押さえつける圧力とナノ周期構造の形成効率の関係を解析してナノ周期構造がPMMAフィルムに形成されるメカニズムについて考察を行った．ナノ周期構造を形成したPMMAフィルム表面において細胞培養試験を行い，PMMAフィルム表面に形成したナノ周期構造が細胞伸展と密着性に与える影響を実験結果に基づき明らかにした．

第6章は本論文の結論であり，研究で得られた成果を総括した．本研究ではフェムト秒レーザアブレーションによる超解像微細構造形成機構解明のため，電界強度分布を制御可能なレーザ照射方式を考案し電界強度分布が超解像微細構造形成に与える影響を明らかにした．

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（　竹中　啓輔　）

	（職）	氏　名
論文審査担当者	主 査　教授	塚本　雅裕
	副 査　教授	赤松　史光
	副 査　教授	高谷　裕浩
	副 査　教授	津島　将司

論文審査の結果の要旨

本論文は、高強度パルスレーザであるフェムト秒レーザを材料表面に照射することによって創製される超解像微細構造の形成機構を明らかにすることを目的としている。材料表面にナノオーダースケールの微細構造を形成することで表面の光学的特性および固体流体との接触特性を変化させ、新機能を材料表面に付与出来ることが知られており、当構造を形成する加工技術が求められている。表面微細構造形成に有用な加工技術の一つとして、フェムト秒レーザ加工があるが、光の回折限界によりレーザ波長以下のナノオーダースケールの微細構造である超解像微細構造形成は難しい。超解像微細構造としてはフェムト秒レーザアブレーションによって作られる穴（クレータ）底面に自己組織的に形成されるナノ周期構造がある。しかしながら、その構造の周期と位相の制御方法は確立しておらず、確立するためには形成機構の解明が必須である。また，任意のパターンを有する超解像微細構造形成が実現されればレーザ加工の応用先がさらに広がる。これを実現するためには、波長の異なる複数パルスを組み合わせた二波長ダブルパルス照射方式を用いたフェムト秒レーザアブレーション特性が未解明なので、特性の評価とともに当アブレーションの物理機構の解明が必要である。本研究では、超解像微細構造形成機構解明のために、フェムト秒レーザ照射時に材料表面に生じる電界強度分布に着目している。フェムト秒レーザアブレーションおよび波長の異なる複数パルスを組み合わせた二波長ダブルパルス照射方式を用いたフェムト秒レーザアブレーションとともに、それぞれのアブレーションによる超解像微細構造形成の材料表面に生じる電解強度分布依存性について実験的に調べている。

第1章では，本研究の背景および目的を述べており、表面新機能創製のためのフェムト秒レーザを用いたアブレーション加工の有用性について述べている。また、材料の表面誘電率がナノ周期構造の周期に寄与する可能性があること、ダブルパルス照射方式が表面波の位相に影響を与える可能性があることを示している。さらに、二波長ダブルパルス照射方式を用いることでフェムト秒レーザアブレーション抑制メカニズムの解明につながる可能性について述べている。

第2章では，フェムト秒レーザアブレーションによって形成されるナノ周期構造の周期を制御するためポリマーを用いてチタン表面の誘電率を変化させ，表面誘電率がナノ周期構造の周期に与える影響を実験結果に基づき解析している。その結果として，表面誘電率がナノ周期構造の周期に与える影響が明らかになり，波長変換では得られない周期を有するナノ周期構造を誘電率制御によって形成できる可能性を示している。

第3章では，フェムト秒レーザアブレーションによって形成されるナノ周期構造の位相を制御するため，二波長ダブルパルス照射方式を用いてチタン基板へ集光照射しフルーエンスや遅延時間によるナノ周期構造の構造変化を実験結果に基づき解析している。二波長ダブルパルス照射方式で形成されたナノ周期構造の周期と位相の安定性を定量評価するための方法(Perpendicular Period and Phase method; P^3S法)を提案し，P^3S法を用いて二波長ダブルパルス照射の実験結果と3次元電磁粒子解析コードを用いたシミュレーション結果との比較を行い，均一な周期と位相を有するナノ周期構造形成がフェムト秒レーザのフィラメンテーションによって誘起される電解強度分布と関係があることが示唆されている。

第4章では，任意のパターンを有する超解像微細構造形成を実現するため、二波長ダブルパルス照射時のフェムト秒レーザアブレーション特性について述べている。アブレーションの深さに着目し、第一パルスにより発生するプラズマと第二パルスの相互作用の影響を実験結果に基づき明らかにしている。第一パルスと第二パルスの波長の組み合

わせ、フルーエンスおよび遅延時間の照射パラメータがアブレーション深さに与える影響を解析し、最もアブレーションが抑制される条件を明らかにしている。加えて、アブレーション抑制がレーザパルスの臨界密度とアブレーションプラズマ密度に関係があることを明らかにしている。

第5章では、非金属材料であるポリマー表面にナノ周期構造を形成する方法を考案し、フェムト秒レーザを用いた表層加工適用のさらなる拡大を目指している。フェムト秒レーザをポリメチルメタクリレート(PMMA)フィルムを透過させてチタン基板に集光照射することでPMMA表面にナノ周期構造を形成している。PMMAフィルムをチタン基板に押さえつける圧力（密着強度）を変化させ、密着強度とナノ周期構造形成の関係を解析している。その結果に基づき、チタン基板表面で生じるフェムト秒レーザアブレーションによるPMMAフィルム表面におけるナノ周期構造形成メカニズムについて考察を行っている。ナノ周期構造を形成したPMMAフィルム表面において細胞培養試験を行い、PMMAフィルム表面に形成したナノ周期構造が細胞伸展と密着性に与える影響について明らかにしている。

第 6 章は本論文の結論であり、研究で得られた成果を総括している。本研究ではフェムト秒レーザアブレーションによる超解像微細構造形成機構解明のため、電界強度分布を制御可能なレーザ照射方式を考案し、電界強度分布が超解像微細構造形成に与える影響を明らかにしている。

以上のように、本論文は高強度パルスレーザ加工における表面電界強度分布に依存した超解像微細構造の形成機構を明らかにしており、今後の生体親和性の高い表面機能性材料の創製に寄与するだけでなく、表面に種々の新機能を有する材料創製に大きな貢献が期待される。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。