

補助事業番号 2024M-465

補助事業名 2024年度超短パルスレーザーを用いたダブルパルス照射によるマルチスケール構造の創成と制御の補助事業

補助事業者名 東京都市大学 小玉脩平

1 研究の概要

本事業は、超短パルスレーザーを用いたダブルパルス照射により、幅広い材料表面に高速で任意のマイクロ・ナノ複合構造を創成・制御する加工法を確立することを目的としている。目的を達成するため、①任意のマイクロ溝を創成すること、②ナノ構造の創成過程を観測し、マイクロ溝によるナノ構造の制御ダイナミクスを明らかにすること、③直線だけでなく自由度の高いマルチスケール構造を創成すること、④ダブルパルス照射により単一工程でマイクロ・ナノ複合構造を創成・制御することが必要である。そこで、レーザープロファイルを制御して材料表面へマイクロ溝を造形し、創成される断面を明らかにした。次に任意のマイクロ・ナノ構造の創出に向けて、インプロセス観察により表面プラズモン伝搬過程を観測して、電場の制御に適したマイクロ形状を調査し、電磁場解析の結果との考察により制御ダイナミクスを明らかにした。これらを基にフェムト秒レーザー光を分岐し、光路長を制御して時間差を制御可能なダブルパルス照射システムを構築し、同一システム上でダブルパルス照射およびマイクロ・ナノ複合構造を創成できる照射システムを確立した。以上より単一工程でのマルチスケール構造創成・制御技術を確立し、微細加工技術のブレークスルーを実現した。

2 研究の目的と背景

半導体産業やその他の微細加工技術において重要な役割を果たすリソグラフィ技術は、微細なパターンや構造を製造できるが、複雑な加工工程や有害な化学物質の使用による環境負荷、レジスト材料やマスクが必要であることや加工対象に制限があること、コストが高く、高度な専門知識が必要であることなど、使用へのハードルが非常に高い技術である。そこで、材料表面への微細構造創成における加工時間の短縮や加工形状の微細化に抜本的な打開策が不可欠であり、ものづくり現場からブレークスルーが求められている。そこで、加工速度が速く、しかも工具消耗や環境負荷がないレーザー加工法の利用が望まれる。しかし、致命的な欠点である構造の制御が困難であることが最大の障害となっている。そこで、本事業は、超短パルスレーザーを用いたダブルパルス照射により、造形したマイクロ形状でナノ周期構造を制御し、高速で任意のマルチスケール構造を創成・制御する加工法を確立することを目的とする。

3 研究内容 <https://www.comm.tcu.ac.jp/surfeng/kodama.html>

(1) マイクロ溝創成方法の確立

本課題の初期段階では、マイクロスケールの溝構造を安定して創成するための加工プロセスを確立することを目的とした。フェムト秒レーザー加工に適した光学系の設計を行い、

ビーム集光条件や照射パス設計を検討した。続いて、設計した光学系を用いて実際にマイクロ溝の形成実験を行い、加工の再現性や寸法精度の確認を行った（図1）。さらに、パルスエネルギー、走査速度、集光位置といった主要な加工パラメータとマイクロ溝の寸法形状との関係性を詳細に調査した。

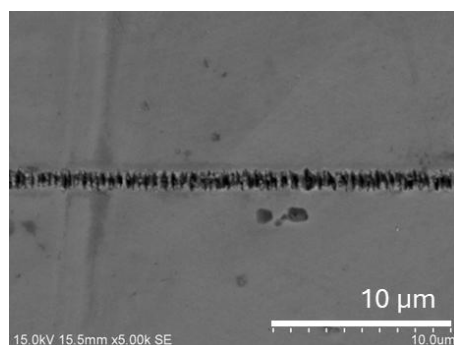


図1 フェムト秒レーザーによるマイクロ溝の創成

(2) 制御ダイナミクスの解明

構造創成の制御メカニズムを解明するため、マイクロ溝と形成されるナノ周期構造（LIPSS）との関係性を調査した。加工中の構造形成プロセスをリアルタイムで観察可能とするインプロセス観察用の光学系を設計し、現象の可視化を図った（図2）。さらに電磁場解析によりレーザー照射領域における電場分布の数値シミュレーションを行い、構造形成に寄与する場の分布を明らかにした。最終的に、実験観察結果とシミュレーション結果を統合的に考察し、構造形成の支配因子について理解を深めた。

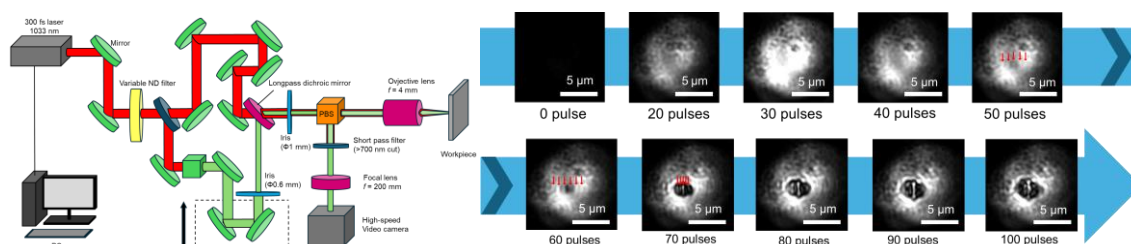


図2 インプロセス観察光学系とリアルタイム観察結果

(3) マルチスケール構造の創成・制御

マイクロ溝の方向性、レーザーの偏光方向、ナノ周期構造の配列方向との関係性を詳細に調査した（図3）。走査経路の工夫により格子状やジグザグ状といった複雑なマルチスケール構造の創成を試み、加工プロセスの柔軟性を検証した。さらに、観察された構造と過

去の電磁場解析結果を照らし合わせながら、その形成原理について総合的な考察を行った。

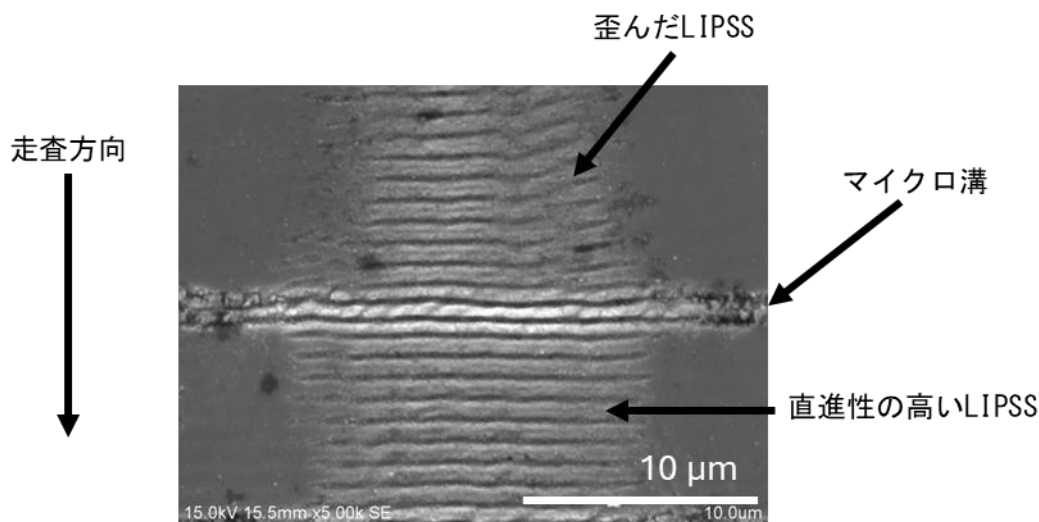


図3 マイクロ溝によるLIPSSの制御結果

(4) ダブルパルス照射によるマルチスケール構造創成システムの確立

時間間隔を制御可能なダブルパルス照射のための光学系を新たに設計・構築し、ビームの空間的・時間的重なりを高精度に制御できるシステムを実現した。パルス間の時間差とそれぞれの焦点位置を調整し、構造形成に最適なパラメータ領域を明確にした。各照射条件で得られた構造を観察・評価し、マルチスケール構造形成に対するダブルパルス照射の有効性を検証した。

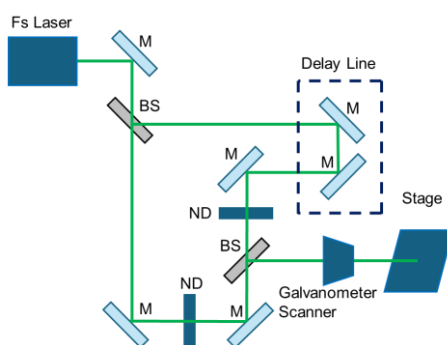


図4 ダブルパルス照射システム

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究で開発された超短パルスレーザーによるマルチスケール構造制御技術は、次世代の高機能表面加工技術として、幅広い産業分野への応用が期待される。とくに、構造のマイクロ・ナノ複

合化により、表面の濡れ性、摩擦特性、光学特性、接着性、細胞応答性などを自在に制御できるため、自動車・航空機産業、医療分野、電子・光学デバイス分野、環境・エネルギー分野など実社会への展開が見込まれる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

実施責任者の小玉 脩平は、超短パルスレーザーによる機能性インターフェースの創成の研究で、博士(工学)号を取得した後、東京農工大学で4年間、レーザーを含めた特殊加工に関する研究活動に取り組み、2023年4月より東京都市大学にて、超短パルスレーザーや電解加工の研究活動に取り組んでいる。これまでの研究活動より、レーザー微細加工技術のブレイクスルーとなる機械加工援用短パルスレーザーによるマイクロ・ナノ複合構造の創成を提案している。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- ①山本航太, 小玉脩平, 佐藤秀明, 亀山雄高: フェムト秒レーザー加工現象のインプロセス観察, 電気加工学会全国大会2024, 2024.
- ②Shuhei Kodama, Kosuke Oike, Riku Kosugi, Keiichi Nakamoto: Fabrication of Micro/Nano Multiscale Structures on Aluminum Alloy with Control of Laser-Induced Periodic Surface Structure, NAMRC MSEC 2025, USA, June 23-27, 2025. (査読済, 発表予定)

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

成果の公表をしているURL : <https://www.comm.tcu.ac.jp/surfeng/kodama.html>

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 東京都市大学(トウキョウトシダイガク)

住 所: 〒158-8557

東京都世田谷区玉堤1-28-1

担 当 者: 准教授 小玉 脩平(コダマ シュウヘイ)

担 当 部 署: 理工学部機械工学科(リコウガクブキカイコウガクカ)

E - m a i l: skodama@tcu.ac.jp

U R L: <https://www.comm.tcu.ac.jp/surfeng/index.html>