

レーザーによる超高品質な極浅構造の作成

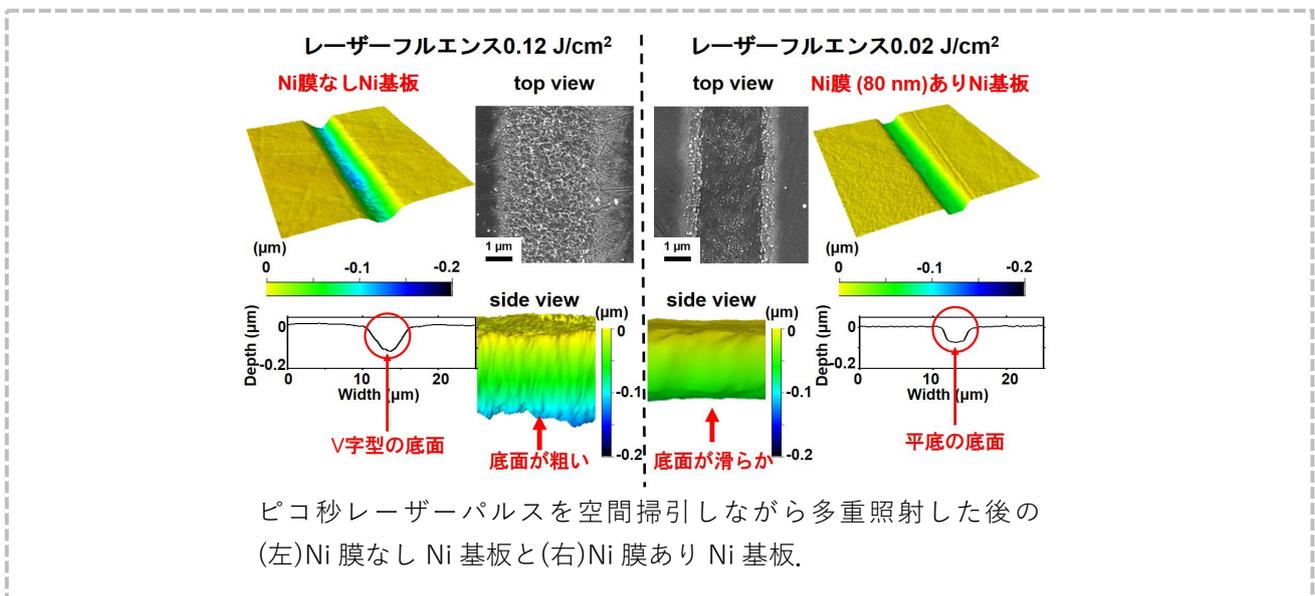
—多層薄膜の構造化へ道—

概要

各種材料のレーザー加工は既に様々な用途でなされていますが、単一のレーザーパルス照射によってレーザー加工痕の周囲にはクレーターまたはリムと呼ばれる盛り上がりが生じ、ナノ秒レーザーの場合には顕著に、また、ピコ秒/フェムト秒レーザーの場合でもごくわずかではありますが発生してしまいます。レーザーパルスを多重照射するとこのわずかな歪みが蓄積しますから、レーザー照射位置を空間的に固定または掃引しながら多数のパルスを照射して穴またはライン状の構造を作成する場合には、本質的に歪み発生が小さいピコ秒/フェムト秒レーザー加工であってもリム発生の問題は無視できなくなります。また、一般的なレーザーパルスには空間的な強度分布があるため、平坦な底面を持つ微細構造をレーザー加工で作成することも容易ではありません。

これらの問題を解決するため、京都大学エネルギー理工学研究所 中嶋隆准教授、曾田圭亮修士課程学生(研究当時)らの研究グループは、バルクの金属ではなく、バルクの金属面にごく薄い金属膜を蒸着したものをターゲットとして使用し、極薄金属膜のみをレーザーで選択的に除去することによって、超高品質な極浅構造を作成しました(下図)。

本研究成果は、2024年3月16日に国際学術誌「Optics and Laser Technology」にオンライン掲載されました。



1. 背景

ある閾値以上のエネルギー密度(フルエンス)を持つレーザーパルスが固体ターゲットに集光照射すると、レーザーアブレーションと呼ばれる現象が起こって表面物質が局所的に除去されます。この現象を利用した材料加工がレーザー加工ですが、レーザー照射に伴うターゲット表面の加熱溶融によって、レーザー加工痕の周囲にはクレーターまたはリムと呼ばれる盛り上がりが発生してしまいます。ナノ秒レーザー加工の場合には熱の影響が大きいため、このリムの発生は特に顕著ですが、パルス幅の短い、ピコ秒/フェムト秒レーザー加工の場合には熱の影響が極めて小さく、リムの発生はほぼ抑えることができます(図1)。

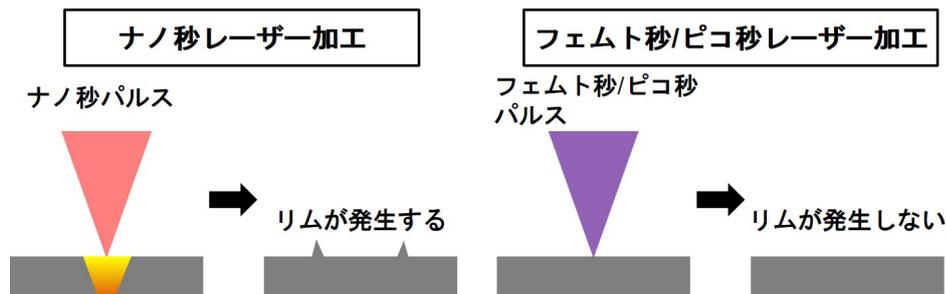


図1. (左)ナノ秒パルスおよび(右)フェムト秒/ピコ秒レーザー加工によるリムの発生。

しかしこれは、単一パルス照射をした場合のことで、同一箇所にもパルスを多重照射して深い穴を作成したり、あるいは、レーザーを空間掃引しながら多重照射してライン状の構造を作成する場合には、ピコ秒/フェムト秒レーザー加工でもリムが発生してしまいます(図2)。また、レーザービームは通常、ビーム断面の中心部が最も強度が高く、周辺にいくにしたがって強度が徐々に低下するというガウス型の空間強度分布を有しているため、加工痕も照射部分の中央が最も深くなります。つまり、ピコ秒/フェムト秒レーザー加工を用いたとしても、特殊な光学系を用いてレーザービームの空間強度分布を平坦化しない限り、平坦な底面を持つ単一の穴を作成することは困難です。

以上をまとめると、高品質のレーザー加工を実現できるピコ秒/フェムト秒レーザーをもってしても、レーザー加工で作成する各種構造の基本単位である穴やラインの加工において、平底構造の作成やリム発生の抑制は解決困難な問題でした。

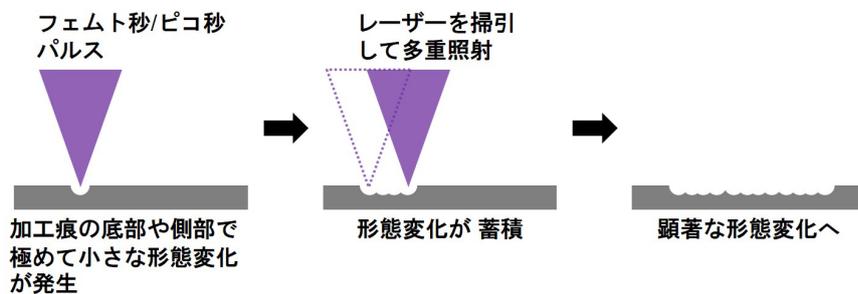


図2. フェムト秒/ピコ秒レーザーを空間掃引しながら多重照射した場合の加工痕。単一パルス照射ではごくわずかな目立たない歪みしか発生しないものの、空間的にオーバーラップしたパルスの多重照射によって歪みが蓄積して顕著な形態変化につながる。

2. 研究手法・成果

レーザーパルスを多重照射すると、照射部位における熱蓄積効果は必ず発生し、これがリムの発生につながります。より低いフルエンスのレーザーパルスで加工をすることができれば熱蓄積効果もわずかとなり、したがって、リムの発生も最小限に抑えられるはずですが。そこで本研究では、ターゲットをバルクの金属ではなく、バルク金属に厚さ数 10 nm の極薄金属膜を蒸着したものを採用し、フルエンスが極めて低いピコ秒レーザーパルスで極薄金属膜のみを選択的に除去することを試みました。予想通り、極薄金属膜のみを除去することができたうえ、ガウス型の空間強度分布を持つレーザービームを用いたにもかかわらず、ほぼ完全に平坦な底面を持つ極浅穴を作成することができました(図 3)。また、レーザーパルスを空間掃引しながら多重照射してライン状の構造を作成したところ、リムがほぼない、表面粗さが 1 nm 以下のほぼ完全に平坦な底面を持つ極浅ライン構造を作成することもできました (図 4)。

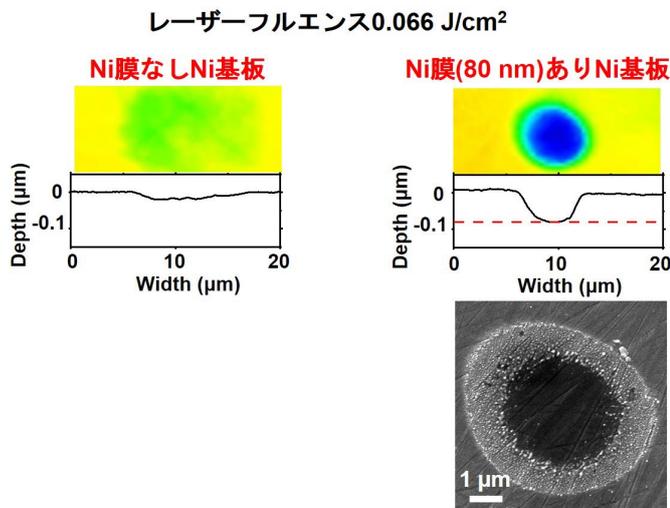


図 3. 極めて低いフルエンスの単一ピコ秒レーザーパルスを照射した後の(左)Ni 膜なし Ni 基板と(右)Ni 膜あり Ni 基板。

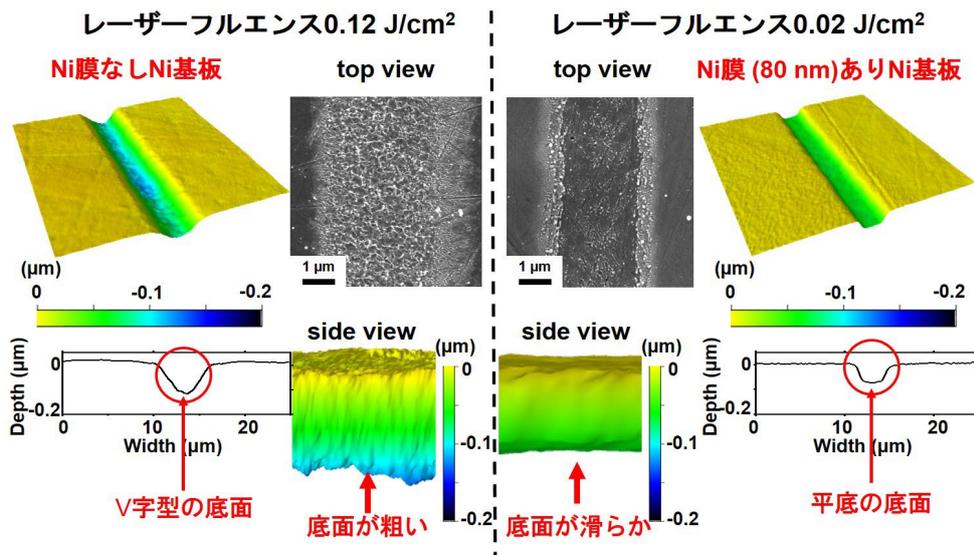


図 4. ピコ秒レーザーパルスを空間掃引しながら多重照射した後の(左)Ni 膜なし Ni 基板と(右)Ni 膜あり Ni 基板。レーザーフルエンスは、それぞれの基板が十分にライン加工される最も低いフルエンスに設定してある。

3. 波及効果、今後の予定

バルク金属をターゲットとしたレーザー加工では、たとえピコ秒やフェムト秒レーザーを用いたとしても、平坦な底面を持ち、かつ、リムのない穴やライン状構造を作成することはできませんでしたが、極薄金属膜を蒸着したバルク金属から金属膜のみをピコ秒レーザーで選択的に除去することによって、前例のないくらい高品質な極浅構造を作成することができました。こうして作成した極浅構造は、多層薄膜の構造化への応用などが期待されます。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Morphological study of depth-controlled high quality holes and lines fabricated on a metal substrate with a thin metal film by picosecond laser pulses（ピコ秒レーザーパルスによって金属膜付金属基板上に作製した高品質な極浅の穴およびライン形状に関する研究）

著者：K. Sota, K. Ando, H. Zen, T. Kii, H. Ohgaki, T. Nakajima

掲載誌：Optics and Laser Technology DOI：https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110853