

フッ化カルシウムの3次元レーザスライシング

3D laser slicing of calcium fluoride

埼玉大学 ○松山優斗, 都田海斗, 山田洋平, 池野順一

Saitama University ○Yuto Matsuyama, Kito Miyakoda, Yohei Yamada, Junichi, Ikono

1. 緒言

近年、半導体回路の微細化・複雑化に伴い、半導体製造装置に搭載される投影レンズの高性能化が求められている。とくに、フッ化カルシウム (CaF₂) は、他の単結晶材料と比較して紫外線透過性やレーザ耐久性に優れることから注目を集めている。しかし、従来のワイヤーソーや研削加工などの加工方法においては、レンズに適したサイズへ加工する過程で多くの材料ロスが生じるという課題がある。

この課題を解決するために、本研究ではレーザスライシング法の適用を試みた。本手法は、レーザを材料内部に集光し、微小なへき開をレーザの走査によって連結させていくことで、材料ロスの少ない精密切断を実現するものである。また、へき開を精密に制御することによって、3次元形状での切断も期待されている。先行研究では、試料全面にへき開を形成することで、試料を剥離することに成功しているが、本材料の強いへき開性に起因したへき開の過度な伸展が発生し加工精度に課題を抱えていた。一方で、小さい出力で緻密にレーザを照射すれば、加工時間に課題を残すことになる。

そこで本研究では、新しいレーザ照射方法によるへき開制御手法を提案し、CaF₂のレンズ成形を可能とする3次元レーザスライシングを試みた。

2 2種類のレーザを併用した加工方法の提案

図1に示すような、ピコ秒レーザで形成された加工痕の上からナノ秒レーザを照射するという加工方法を提案する。ピコ秒レーザはパルス幅が短いことから、高いエネルギー強度をもち、熱の影響を抑えて精度良く加工ができる。試料に照射すると、加工痕は安定して形成されるが、へき開には至らなかった。一方でナノ秒レーザはパルス幅が長いことから、高い熱エネルギーを与えることができる。しかし、試料に照射すると、へき開は発生するが、加工痕の発生は不安定だった。したがって、この2種類のレーザを重ねて照射することによって、安定かつ確実なへき開伸展が可能になるとともに、へき開を緻密に連結できることから、3次元加工にも適用できると考えた。

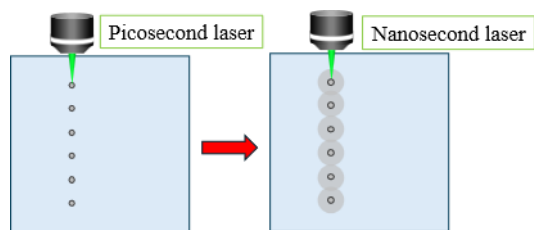


図1. 加工方法の提案

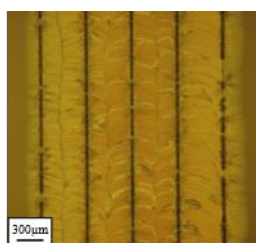


図2. LP3405Line加工

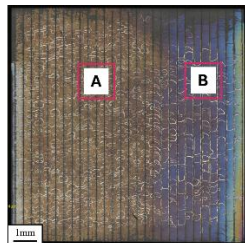


図3. 全面加工

3. 平面加工

3.1. 基礎実験

試料には(111) CaF₂ 試料(10 mm × 10 mm × 2 mm)を用いた。レーザにはピコ秒レーザ(波長 532 nm, パルス幅 10 ps, 発振周波数 10 kHz)と、ナノ秒レーザ(波長 515 nm, パルス幅 20 ns, 発振周波数 10 kHz)を用いた。CaF₂表面より 500 μm 内部の位置に対物レンズ (MPlan.Apo.NIR.HR.100×

/0.70) を用いてレーザを集光させ、2つのレーザが重なるように加工を行った。

本手法の効果を確かめるため、加工ラインを5本にし、パルスエネルギーとレーザ照射間隔をピコ秒レーザはそれぞれ 20 μJ, 50 μm, ナノ秒レーザはそれぞれ 30 μJ, 30 μm に設定した。また、照射ライン間隔 (以降ラインピッチ, LP と表記) をともに 340 μm に定め、ピコ秒レーザ、ナノ秒レーザの順に照射した。結果を図2に示す。黒い線状に見えるレーザ照射ラインの両側からへき開が伸展し、加工痕の間でへき開が正確に連結していることが分かる。この加工によって、5本の加工痕から約 13 mm の範囲にへき開を伸ばすことができた。先行研究では 1 mm の範囲にラインピッチ 1 μm で 100 本の加工を要していたため、大幅に照射回数を減らすことができた。

3.2. 本実験

前節と同条件で試料全面に加工を行った。その結果を図3に示す。試料全面にへき開を発生させることに成功したが、試料の左右で、へき開による干涉縞が変化していることがわかる。図3中の干涉縞が一樣な箇所を A、干涉縞が変化した箇所を B とし、A の拡大図を図4(左図)、B の拡大図を図4(右図)に示す。A の箇所ではへき開が加工痕の中央で繋がっているが、B の箇所では加工痕から発生したへき開が次の加工痕まで伸展していた。これは、照射本数が増えることによって試料内部に応力が蓄積したためであり、先行研究より、試料への照射本数が増えるにつれ、1本の加工から伸びるへき開の長さは大きくなる傾向にあり、今回にも同様のことが発生していると考えられる。

3.3. 剥離実験

図3の試料を引張試験機にかけたところ、105 N の力で剥離に成功した。図5に剥離面下面の形状測定結果を示す。最大高さ粗さは 16 μmRz となり、先行研究と比較して最大高さ粗さを 27 % に改善することができた。また、図の赤枠で囲われた部分は、前節で述べたへき開の繋がりが方により形状の特徴が途中から変化している箇所である。赤枠の箇所は図4(右図)部でへき開が加工痕の片側のみから伸展しているため、段差の間隔は大きくなったものの、粗さは大きく変わることはなかった。

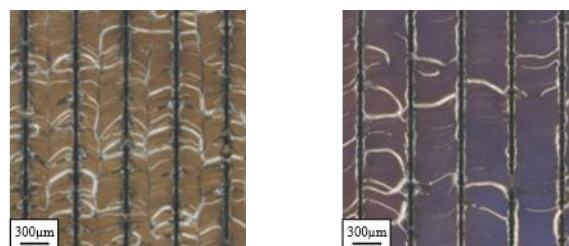


図4. へき開伸展の違い、(左図) 拡大図A (右図) 拡大図B

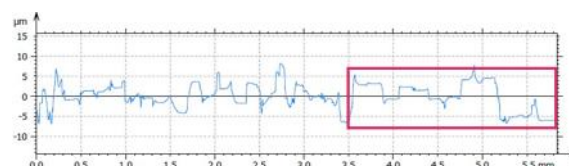


図5. 剥離面下面の断面プロファイル

4. 斜面加工

4.1. 基礎実験

提案手法でのへき開の形成が可能と分かったため、次に目標である3次元の加工を試みた。加工方法としては図6のように、1Line照射にて細かなへき開面を段々に積み重ね、外力での剥離によって段差間を繋

げる加工方法を取った。ここで、段差がある加工痕と加工痕との間の距離を「段の X 方向間隔」、段差の高さを「段の Z 方向間隔」と定義する。

まず、1Line を 1 段とする 20 段の斜面加工を行った。実験条件としては、X 方向間隔 180 μm 、Z 方向間隔 40 μm として、最下段を試料の 1mm 内部に照射した。そのほかの条件は 3.1. と同様である。剥離前の試料表面から観察した結果を図 7 に、試料側面から観察した結果を図 8 に示す。右のぼりの斜面を形成できたが、4 段目以降でへき開が次の加工痕の真下まで伸びている様子が見られた。同一平面上でなくとも応力の影響によって、想定よりも強くへき開が伸びる結果となった。

4.2. 剥離実験

次に、試料の剥離を行うため、試料側面にへき開が到達している状態になるまで研磨を行った。引張試験機で剥離を行った結果、約 23 N で剥離に成功した。そして、図 9 に剥離面下面の形状測定結果を示す。大きくむしられるような箇所もなく、1 段 1 段が明瞭に観察できた。しかし、赤枠で囲った箇所に関しては、応力が蓄積してくる 20 段目付近であることから、本来 2 段ある箇所が 1 段で繋がっていた。X 方向間隔に最適なきい値があると考え、今後解決策を検討する。

また、X 方向間隔 180 μm を底辺、Z 方向間隔 40 μm を高さとする直角三角形からアークタンジェントを用いて斜面の角度を計算すると、1Line 20 段加工において、125°の斜面を形成できたこととなった。

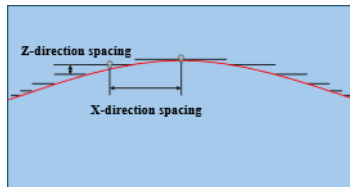


図 6. 3次元加工方法



図 7. 斜面加工



図 8. 斜面加工（側面観察）

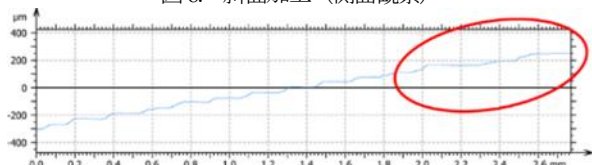


図 9. 剥離面下面の断面プロファイル

5. 台形加工

5.1. 本実験

5.2

最後に台形加工を試みた。理想はレンズ形状の曲面の加工を行うことだが、それに近い形状として台形の加工を行った。実験条件は前章と同様であるが、加工手順としてまず、図 10 のように左側の斜面を 1Line 10 段で形成したのちに、先に右側斜面を同様に作り、最後に中央の表面をつなげる手順とした。台形の上辺にあたる部分は、平面加工のときに用いていた LP340 μm で 4Line の加工を行った。実験結果を図 11、

12 に示す。これまでは、右上りの斜面のみであったが、反対側の左のぼりの斜面も同様に形成でき、全体で台形の形にへき開を連結させることに成功した。

5.2. 剥離実験

試料を研磨した後に剥離を行うと、約 75 N で剥離に成功した。図 13 に 3 次元形状測定を行った結果を示す。狙い通りシリンドリカルレンズのような台形状となっていた。しかし、赤枠のように試料中央の下部で非常に広範囲にむしられたような領域が存在し、きれいな剥離とはならなかった。さらに、図 14 の断面形状を見ると、台形の上辺である平面加工の箇所では、剥離時にへき開の高さの違いから約 30 μm の粗さが生じてしまった。今回は、平面加工のときと同様の LP を用いたため、より最適な加工条件があると考え今後探っていく。

6. 結言

本研究において、ピコ秒とナノ秒のレーザを併用することによって、へき開を安定して発生させ、試料全面に加工を行うことができた。提案手法により、1 本の加工痕からより長くへき開を伸ばすことができ、照射回数を削減することができた。また、へき開を立体的につなげてフッ化カルシウムを台形型に加工することに成功した。

今後は、照射回数の削減のため、LP を途中から変化させる可変ラインピッチの検討や、3 次元の加工の最適な照射条件を模索する。

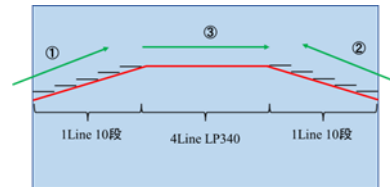


図 10. 台形加工方法



図 11. 台形加工

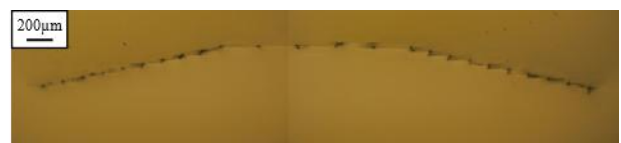


図 12. 台形加工（側面観察）

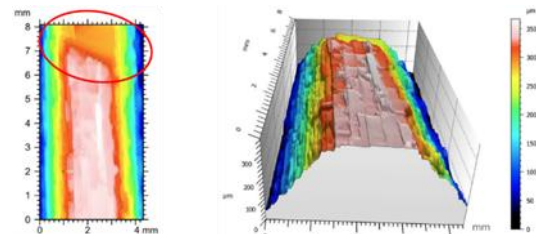


図 13. 凸面の3次元形状測定

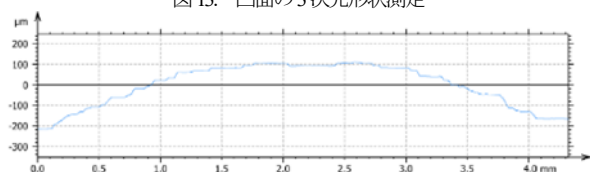


図 14. 凸面の断面プロファイル