

令和 5 年 5 月 11 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14052

研究課題名（和文）ガラスのレーザスライシング技術による非球面レンズの一発成形

研究課題名（英文）Raped forming of aspherical lenses by laser slicing technology

研究代表者

山田 洋平（Yamada, Yohei）

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：60756899

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：ガラスのレーザスライシング技術は、き裂伝播を制御できず加工精度に課題を抱えていた。そこで、き裂伝播メカニズムの解明を目的として研究を行った。FEMと複屈折応力評価装置を用いた応力状態の可視化を行った結果、材料内部には引張応力を主とした残留応力層が形成され、最大の引張応力となるレーザ焦点付近でき裂が伝播することが明らかとなった。また、き裂伝播中にガラスが互いに反り合うことにより、き裂先端部に応力集中が形成されることで、自然にき裂伝播が生じることも明らかとなった。このメカニズムを基に、レーザ照射条件を同定し非球面レンズ成形を試みた結果、成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超短パルスレーザを透明材料内部に集光し、改質により微細なフォトニックデバイスを形成するという研究は国内外問わず盛んに行われているが、材料内部の応力に着目した研究は限られており、この応力を利用して割断加工に応用する研究は、本研究のみである。今回提案したのガラス内部の応力蓄積メカニズムは、学術研究において価値のあるものであると考えている。また、非球面レンズは、AI技術や電気自動車のセンシングに欠かせないものである。熟練の技術を必要とせず、迅速かつ簡便に非球面レンズ成形が可能になる本技術は、社会に貢献できる可能性が大である。

研究成果の概要（英文）：Laser slicing technology for glass has been facing a problem of processing accuracy due to the lack of control the crack propagation. The visualization of the stress inside glass using FEM and a birefringent stress evaluation system revealed that a residual stress layer, mainly tensile stress, is formed inside the material and that the crack propagates near the laser focus point, where the maximum tensile stress occurs. It was also found that the crack propagation was caused by the formation of a stress concentration at the crack front due to the warping of the glass during crack propagation. Based on this mechanism, laser irradiation conditions were identified and aspherical lens forming was successful.

研究分野：レーザ加工

キーワード：レーザスライシング 非球面レンズ 硬脆材料 レーザ割断 精密微細加工

1. 研究開始当初の背景

非球面ガラスレンズは 1 枚のレンズで収差のない理想的な光学系を構築することが可能であり、製品の小型軽量化、高機能化を実現できることから、適用先は半導体、車載センサ、光通信、理化学用途など多岐にわたる。しかしながら、理想的な非球面レンズ作成のためには複雑な 3 次元面を成形する必要があるが、製造が非常に困難である。現在の代表的な製造方法として、研削・研磨加工、ガラスモールドが挙げられるが、工具・金型の摩耗、形状自由度の制限、硝材の制限など熟練の技術を必要としている。これらの課題を解決する手段として、非接触で工具摩耗がなく、微細加工を得意とするレーザ加工に着目した。しかし、材料表面を熱で熔融・蒸発または、衝撃力によってき裂を伸展させて加工する従来のレーザ加工技術では、深さ方向の制御が難しく、表面粗さが数 nmRa の高品質な表面かつ複雑な 3 次元曲面を持つ非球面レンズを加工することは困難である。そこで、従来のように材料表面に対するレーザの直接的な熱や衝撃力で材料を除去するのではなく、材料内部に応力層を形成し、それによってき裂を 3 次元的に誘導することができれば、切断技術のように鏡面かつ自由度の高い非球面レンズ加工技術が創出できると考えた。加工原理を図 1 に示す。

- 1) 微小出力の超短パルスレーザを材料内部に集光させ、集光点での多光子吸収によって材料内部に長さ 100 μm 以下の微小改質部を間欠的に形成する。
- 2) 改質部は体積膨張するため、薄い残留応力層がガラス内部に形成される。
- 3) 応力層内部には強い引張応力層が形成されるため、外部から導入されたき裂が応力層内部を伝播する。
- 4) 応力層に沿ったき裂伝播により自然に剥離し、ガラスレンズがレーザ加工のみの 1 工程で成形できる。

本加工技術はき裂の伝播による加工、つまり切断加工となる。したがって、剥離後のガラス表面は透明性を失わず、研磨レスで表面粗さが 5nmRa 以下の鏡面となる。また、材料内部にレーザ照射することにより応力層を形成し、き裂の伝播を高精度にガイドすることによって、3 次元形状の剥離を達成している。しかし、加工精度は 10~50 μmPV 程度と高品質ガラスレンズに求められる 1 μmPV 以内に対して大きく劣っており、き裂の伝播を完全に制御できていないことを示していた。

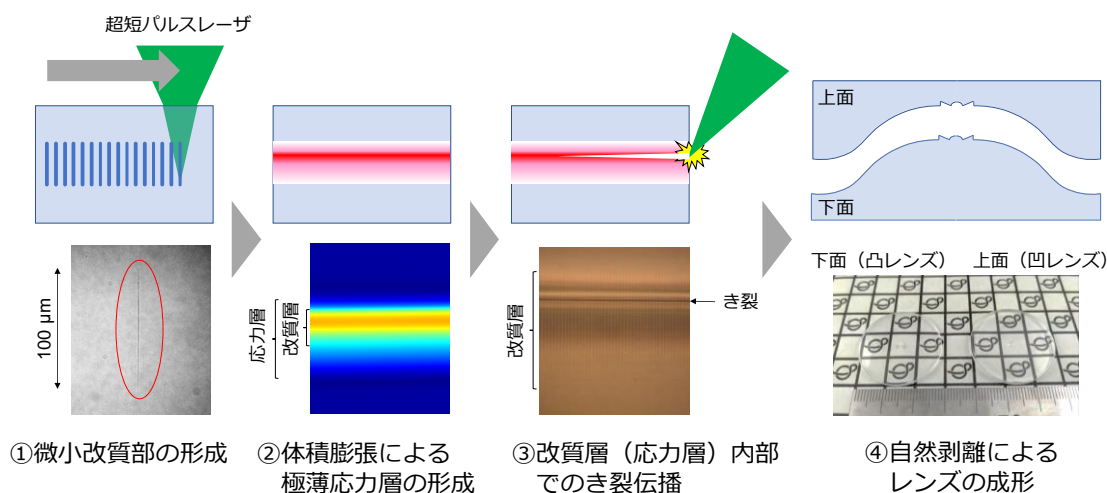


図 1 ガラスのレーザスライシングの概要

2. 研究の目的

これまでの研究によってき裂の伝播は必ず応力層内部で発生することがわかっている。したがって、き裂の駆動力となる引張残留応力が応力層内部に存在し、これによってき裂が誘導され

していると推測されていた。図2に示すように、応力層が厚く引張応力が弱い場合、き裂は幅のある応力層内部を自由に進むため、蛇行し加工精度が低くなる。一方で、応力層が薄く引張応力が集中している場合、き裂は応力層に誘導され精度高く伝播すると考えた。本研究は、レーザスライシング技術を用いて、ガラスの非球面レンズ発成形技術の確立を目的として、ガラス内部の改質メカニズムおよび応力発生メカニズムを明らかにし、き裂伝播による非球面レンズ成形の高精度制御を達成する。

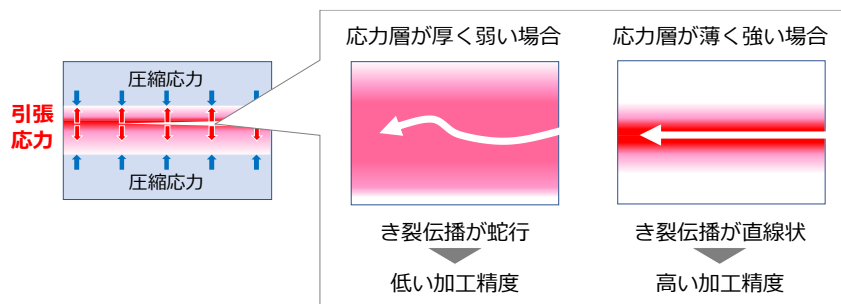


図2 高精度化を達成するための応力分布

3. 研究の方法

本加工技術は、材料内部の応力状態が重要であると考えられる。そのためには、応力状態の可視化が必要となる。そこで、様々な加工条件における、応力状態を複屈折応力評価装置によって可視化することにより、き裂伝播メカニズムを推定し、応力層と加工精度の影響を明らかにする。その際、FEM解析による非定常熱伝導と構造解析シミュレーションを合わせていくことにより、研究を加速させた。ここから得られた知見を元に、 $\phi 30\text{mm}$ の非球面レンズの加工を行った。

4. 研究成果

はじめに、改質層の基礎的な応力分布を評価するために、ガラス内部に1ラインの改質層を形成し、その断面からリタデーションを測定した。レーザ照射条件は従来研究によって、剥離に成功したパルスエネルギー $0.75 \mu\text{J}$ 、パルスの照射間隔 $1 \mu\text{m}$ 、発振周波数 200 kHz (レーザ走査速度: 200 mm/s) とした。結果を図3に示す。長さ $100 \mu\text{m}$ 、幅 $200 \sim 300 \text{ nm}$ 程度の光軸方向に沿った縦長の改質層の周囲に残留応力が生じていることがわかった。特に縦長の改質層の上部で局所的な残留応力が生じており、改質層を中心にして左右対称の羽のように周囲に広がっていることがわかった。この局所的な残留応力が発生する位置は、設定したレーザ焦点位置とほぼ一致しており、エネルギー密度が高い領域において改質が進んだ結果と考えられる。改質層周囲における遅相軸の軸方位を見てみると、羽のように広がる応力は、図の上下方向に改質部が膨張しようとする力の方向に対して、平行に分布しており、改質層の周囲には主として引張応力が生じていることがわかった。ガラス材料は、ガラス転移点を超える温度が加わると急激に体積膨張し、そこから急冷することにより、体積膨張を維持したまま固化する性質がある。したがって、改質層内部は体積膨張が外部から拘束されるため圧縮残留応力が働き、その周囲に引張残留応力が働くと考えられる。

次に、複数の改質層を形成した際の応力分布を、改質層の間隔 (LP) を変化させることにより評価した。LPを $140 \mu\text{m}$ から $8 \mu\text{m}$ まで変化させ応力分布を調査した。リタデーション測定結果を図4に示す。LPが $140 \mu\text{m}$ と大きい条件では、羽状に広がる引張応力は改質層ごとに独立しているように分布しており、改質層間の応力が低下する傾向となったが、LP $80 \mu\text{m}$ 付近から改質層間の応力が連結し始め、LP $20 \mu\text{m}$ では一様な帯状に分布することがわかった。LPが小さくなるにつれ、引張応力がガラス内に強く蓄積されていくことがわかった。ここから、更にLPを小

さくしていくと、LP2 μm でき裂の伝播が確認された。改質層上部の引張応力が最も強いレーザー焦点付近で、一直線状にき裂伝播が起こった。したがって、改質層を面状に並べていくことによって、改質層間の引張応力が帯状に連結するとともに、蓄積していき、最大の引張応力となるレーザー焦点付近に沿ってき裂が伝播していくことが明らかとなった。

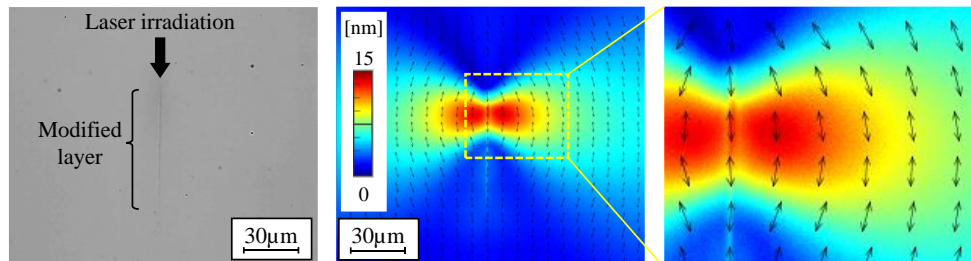


図3 改質層周囲の応力状態の可視化

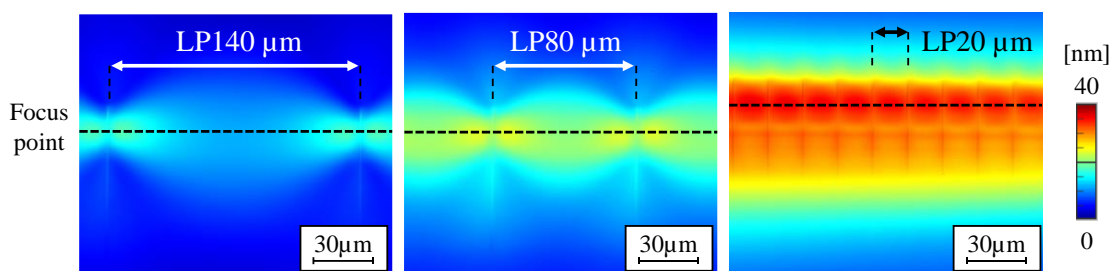


図4 複数の改質層を並べた際の応力分布

ガラス全面に改質層を形成した後に、自然とき裂が緩やかに伝播していくメカニズムを調査するべく、き裂伝播中のリタデーション測定を行った。結果を図5に示す。き裂伝播前は、試料側面部での応力集中が見られるのみであったが、き裂伝播にともないき裂先端に応力集中が発生していた。この応力集中部はき裂の伝播とともに中心に向かって移動していくことがわかった。この自然なき裂の伝播は、試料形状が影響していると考え、き裂伝播が途中で停止した試料の表面と裏面を非接触三次元形状測定装置によって測定した。測定結果を図6に示す。き裂の伝播にともない、お椀状に両面で反りあうような形状に変形していることがわかった。き裂は改質層内を進むため、剥離面上面と下面の最表面には改質層(体積膨張層)が残存する。したがって、き裂伝播による解放によって、剥離面と平行方向の力が生じガラスに反りが生じる。上面、下面ともに互いに反りあうように変形することによって、き裂先端を開口させる方向に応力集中が働き、き裂伝播が駆動されたと考えられた。

これまでの結果より、ガラスのレーザーライシングにおけるき裂伝播メカニズムを図7のように推定した。図7(a) 超短パルスレーザー照射による改質によって、レーザー集光点では体積膨張が生じ、改質層内には圧縮応力、その周囲に引張応力が生じる。図7(b) 改質層をレーザー走査によってガラス内部に面状に並べていくことにより、改質層間の光軸方向の引張応力が帯状に連結・蓄積していく。図7(c) 帯状の改質層内の最大引張応力となる付近でき裂伝播が開始する。図7(d) き裂伝播にともなう応力の解放によって、表面に残存した改質層の剥離面と平行方向の体積膨張によってガラスに反りが生じる。この反りによってき裂を開口させる方向に応力集中が生じ、き裂伝播を駆動・継続させる。

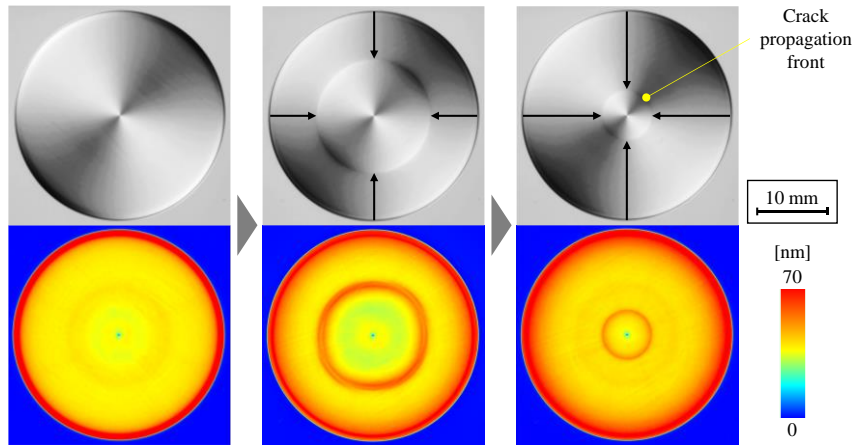


図5 き裂伝播中のガラス内部応力

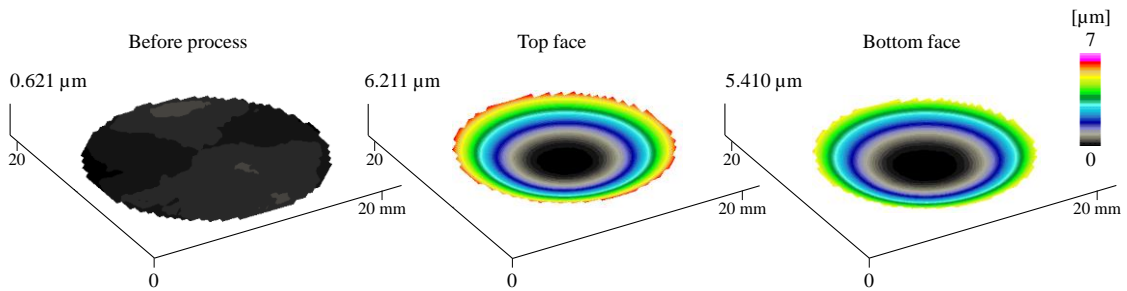


図6 き裂伝播後の試料形状

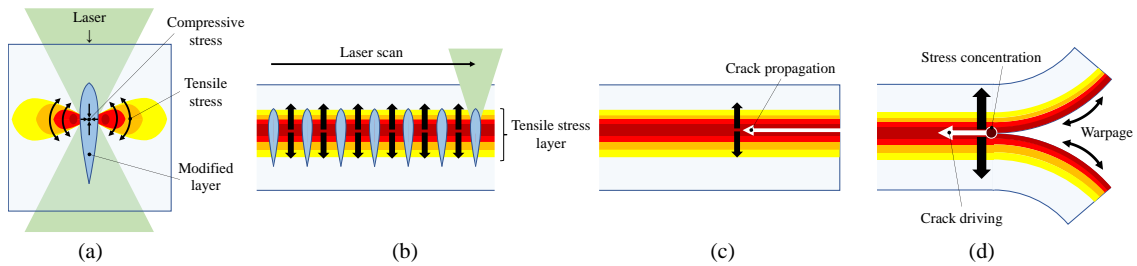


図7 ガラスのレーザスライシングによるき裂伝播メカニズム

このメカニズムを基に、レーザ照射条件を同定し実際のカメラレンズに使用される非球面レンズを模擬して加工を試みた。その結果、非球面レンズ成形に初めて成功した。図8に示すように剥離後のレンズは十分な透過性を有しており、10nmRa以下の鏡面状態となったが、形状精度は約50 μ mPVとなり、目標とする1 μ mPVには及ばなかった。これは、剥離時の強制的な引張力による、外周部の割れによる段差が主原因であると考えられ、剥離手法を確立することにより解決できる目処が立った。

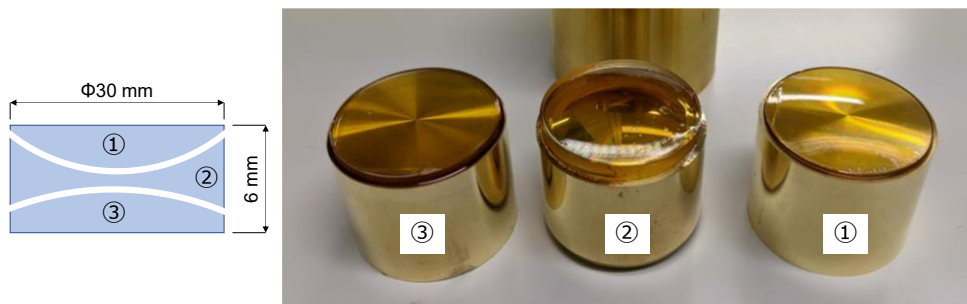


図8 非球面レンズ加工

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 山田洋平, 高塚望史, 池野順一, 酒井一樹, 高田宏樹	4. 巻 89
2. 論文標題 ガラスのレーザライシング技術による光学レンズの成形（レーザ内部加工における応力形成とき裂伝播）	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.23-00015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 山田洋平, 池野順一	4. 巻 34
2. 論文標題 結晶・非晶質材料に対するレーザライシング技術の適用	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 光アライアンス	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 齋藤雅文, 高橋脩斗, 山田洋平, 池野順一
2. 発表標題 レーザ照射によってガラス内部で生じる現象について
3. 学会等名 2021年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高塚望史, 小室凌, 山田洋平, 池野順一, 酒井一樹
2. 発表標題 レーザライシングによるガラスレンズ製造の試み
3. 学会等名 2021年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高塚望史, 小室凌, 山田洋平, 池野順一, 酒井一樹
2. 発表標題 レーザーライシング法を用いたガラスの球面レンズ加工
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田洋平, 池野順一
2. 発表標題 ガラスおよびSiにおけるレーザーライシング技術の適用
3. 学会等名 第96回レーザー加工学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田洋平, 高塚望史, 池田俊太, 池野順一
2. 発表標題 レーザーライシング法を用いたガラスレンズ創成
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------