

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23477

研究課題名（和文）応力波キャンセリングによるガラスの精密フェムト秒レーザ加工技術の開発

研究課題名（英文）Development of precision femtosecond laser processing method of glass by canceling stress wave

研究代表者

伊藤 佑介 (Ito, Yusuke)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：90843227

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ガラスのフェムト秒レーザ加工時のクラック形成の要因となる応力波伝搬を制御するための技術基盤を構築することを見据え、高速で変化する応力分布の計測技術を開発した。高速で変動する圧力分布の実測とシミュレーションを複合することにより、応力分布を実験的に推測した。圧力分布は材料内部の密度変化として観測されることから、マッハツェンダー干渉計を構築した。さらに、マッハツェンダー干渉計と時間分解撮影法を組み合わせることで、超高速で変化する圧力分布を実測した。この実験結果をシミュレーションに反映させることで、シミュレーションのキャリブレーションが実現し、正確な応力分布の推定が実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子機器や光学機器の更なる高性能化のために、ガラス材料に微細精密加工を施す技術が求められている。ガラスの微細加工のための有効なツールとしてフェムト秒レーザが注目されているものの、加工後に多量のクラックが発生し、精密加工が阻害されるという課題が存在している。そこで本研究では、クラック形成の要因となる応力波伝搬を制御するための技術基盤を構築することを見据え、高速で変化する応力分布の計測技術を開発した。その結果、加工時に伝搬する応力波の引張成分の出現する時間スケールとその大きさが定量的に示された。そして明らかとなった応力の時間プロファイルを積極的に活用することによる精密加工技術開発の指針が示された。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a measurement technique for fast-varying stress distribution with the aim of establishing a technological basis for controlling stress wave propagation, which is a factor in crack formation during femtosecond laser processing of glass. The stress distribution was experimentally inferred by a combination of actual measurement and simulation of the rapidly varying pressure distribution. Since the pressure distribution is observed as the density change inside the material, a Mach-Zehnder interferometer was constructed. Furthermore, by combining the Mach-Zehnder interferometer with time-resolved imaging, we measured the ultrafast pressure distribution. By reflecting the experimental results in the simulation, calibration of the simulation was achieved, and accurate estimation of the stress distribution was realized.

研究分野：生産加工学

キーワード：フェムト秒レーザ レーザ加工 ガラス 応力波 超高速イメージング

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ガラス材料は優れた電氣的、化学的、光学的特性を有するため、電子機器、光学機器を始めとする様々な最先端機器において活用される。電子機器、光学機器のさらなる高性能化、低コスト化を実現するために、ガラスへの微細加工を高速かつ精密に施す技術が求められている。たとえば、積層半導体デバイス内で用いられるガラス基板への微細貫通孔の形成や、マイクロ流体チップのための流路の微細加工、光導波路やフォトニック結晶といったように、多岐にわたる応用先において、高能率かつ精密な微細加工が必要となる。従来、ガラスの加工には機械加工、エッチング、レーザ加工が用いられている。中でも、熱的影響が小さく微細加工が可能な技術として、フェムト秒レーザ加工が注目されている。フェムト秒レーザは、集光点付近で著しく強い光強度を示すため、ガラスのような光透過性の高い材料に対しても、多光子吸収過程を経てエネルギーを与えることができ、材料を除去することが可能である[1]。しかしながら、ガラスのフェムト秒レーザ加工後には、加工領域周辺に顕著なダメージが発生し、精密加工が阻害されるという課題が存在している (Fig. 1(a)) [2]。加工中には、Fig. 1(b)に示すように応力波が材料内部に伝搬する[3]。この応力波の作る応力分布をシミュレーションにより解析した先行研究において、応力波伝搬の瞬間に強い引張応力が分布することが示唆されていた (Fig. 2) [4]。このことから、材料除去時の反力によって伝搬する応力波がクラック生成の要因であることが示唆されているものの、シミュレーションでは数々の仮説が用いられていたために、破壊メカニズムが正確には明らかとなっていない。そこで、応力分布をより正確に知るために、実験に基づき応力分布を計測することが求められる。

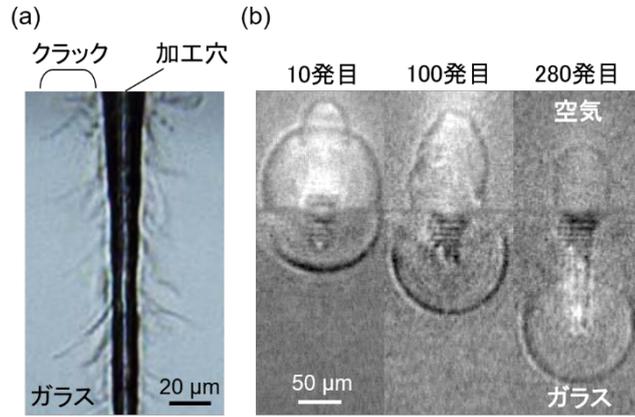


Fig. 1 (a)ガラスのフェムト秒レーザ加工後、加工形状周囲に形成されたクラック。(b)時間分解撮像法によって撮影されたフェムト秒レーザ加工中に伝搬する応力波。

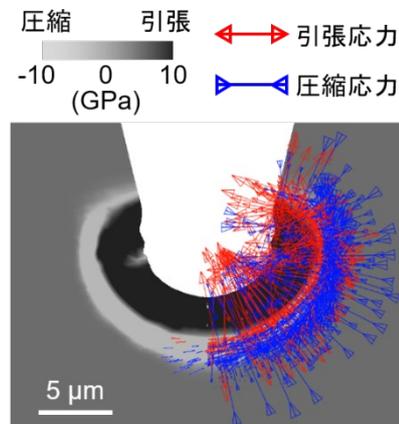


Fig. 2 レーザ照射の直後の加工穴先端における応力分布のシミュレーション結果。

2. 研究の目的

本研究では、フェムト秒レーザ加工時に伝搬する応力波の作る応力分布を、実験に基づいて推定し、クラック形成メカニズムを解明することを目的とする。応力波はガラス中を音速 (約 5.6 km/s) で伝搬する。そのため、応力分布は、マイクロメートルオーダの視野範囲内において、ナノ秒の時間スケールで変化する。このような超高速現象を捉えるために、ポンプ・プローブ撮像法を採用する。そこにマッハ・ツェンダー干渉計を組み込むことで、材料内部の密度変化を干渉縞の歪みから抽出する。上記の手法で計測される超高速変化する密度分布を、有限要素法による密度分布解析および応力分布解析と対応付けることで、フェムト秒レーザ加工時の応力分布を実験に基づき定量的に明らかにする。

3. 研究の方法

波長 1030 nm、パルス幅 180 fs、繰り返し周波数 1 kHz のフェムト秒レーザ光源を用い、加工中のポンプ・プローブ撮像と密度分布計測を同時に実現する (Fig. 3)。まず、ポンプ・プローブ撮像を実現するために、フェムト秒レーザ光を加工用のポンプ光、観察用のプローブ光に分岐する。さらに、密度分布計測を実現するために、プローブ光を 2 本に分岐し、一方を干渉計測用の参照光とした。ポンプ光をガラス試料表面に集光することで穴加工を

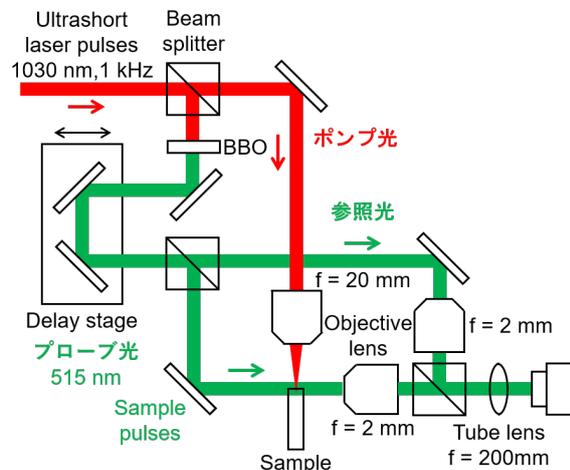


Fig. 3 ポンプ・プローブ撮像法とマッハ・ツェンダー干渉計の複合による超高速密度分布計測。

行い、加工現象をポンプ光と垂直な方向から入射したプローブ光によって撮影した。そして、プローブ光と参照光を重ね合わせることで、密度変化に由来する干渉縞の歪みを写し出した。

4. 研究成果

応力波伝搬時の干渉画像を Fig. 4 に示す。応力波の伝搬位置において、干渉縞の歪みが鮮明に観察されている。この歪みを解析することで密度分布を抽出する。さらに、密度と圧力を対応づけることで圧力分布が得られる。パルスエネルギー 100 μJ のポンプ光を 1 パルス照射した 6 ns 後と 10 ns 後の圧力分布を Fig. 5 に示す[5, 6]。赤で示した圧縮応力の直後に青で示した引張応力が分布している様子が分かる。マツハ・ツェンダー干渉計では、その原理上、厚み方向の密度変化の情報が積算され、正確な密度変化を得られないという課題があるが、本研究では、厚み方向から断面の情報を計算するアルゴリズムの開発により、この課題を解決している。こうして、フェムト秒レーザー加工中の圧力分布をナノ秒の時間スケールで定量的に計測することに成功した。

さらに、実測した密度分布と、有限要素解析で得られる密度分布を対応づけた。従来、有限要素解析を行う際に与える荷重条件が未知であるため、正確な出力を得ることができない。しかし本研究では、解析で得られるべき出力を実測で得ているため、解析で得られる密度分布が実測値と一致するように荷重条件を定めることができる。その結果、正確な荷重条件に基づいた有限要素解析が可能となる。Fig. 6 に、有限要素解析によって得られた最大引張応力の時間変化を示す。ポンプ光照射の 0.3 ns 後に、パルスエネルギー 150 μJ において最大 370 MPa、300 μJ および 600 μJ において最大 570 MPa の引張応力が分布することが示された。ガラスの実用強度は 100 MPa 程度であることから、いずれの条件においても破壊発生に足る引張応力が生じることが示された。本結果から、加工時に伝搬する応力波がダメージを引き起こすことが示された。

本成果により、加工時に伝搬する応力波の引張成分の出現する時間スケールとその大きさが定量的に示された。明らかとなった応力の時間プロファイルを積極的に活用することで精密加工技術開発が実現すると考えられる。

<引用文献>

- [1] M. Malinauskas, A. Zukauskas, S. Hasegawa, *et al.*, “Ultrafast laser processing of materials: from science to industry,” *Light Sci. Appl.* **5**, e16133 (2016).
- [2] R. Shinomoto, Y. Ito, T. Kizaki, *et al.*, “Experimental analysis of glass drilling with ultrashort pulse lasers,” *Int. J. Autom. Technol.* **10**, 863-873 (2016).
- [3] Y. Ito, R. Shinomoto, A. Otsu, *et al.*, “Dynamics of pressure waves during femtosecond laser processing of glass,” *Opt. Express* **27**, 29158-29167 (2019).
- [4] Y. Ito, R. Shinomoto, K. Nagato, *et al.*, “Mechanisms of damage formation in glass in the process of femtosecond laser drilling,” *Appl. Phys. A* **124**, 1-8 (2018).
- [5] 服部隼也, 伊藤佑介, 大園勇也, 杉田直彦, “ガラスのフェムト秒レーザー加工時の超高速応力分布計測,” 精密工学会学術講演会講演論文集 2020 年度秋季大会, 218 (2020).
- [6] 服部隼也, 伊藤佑介, 杉田直彦, “ガラスにおけるフェムト秒レーザー誘起衝撃波の圧力プロファイル計測,” 精密工学会学術講演会講演論文集 2021 年度春季大会, 344 (2021).

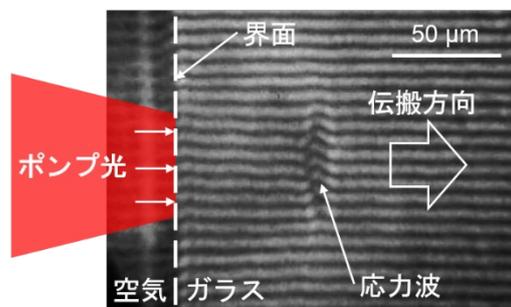


Fig. 4 応力波の作る密度変化が、干渉縞の歪みを引き起こす様子を捉えた。レーザー照射の 6 ns 後を示している。

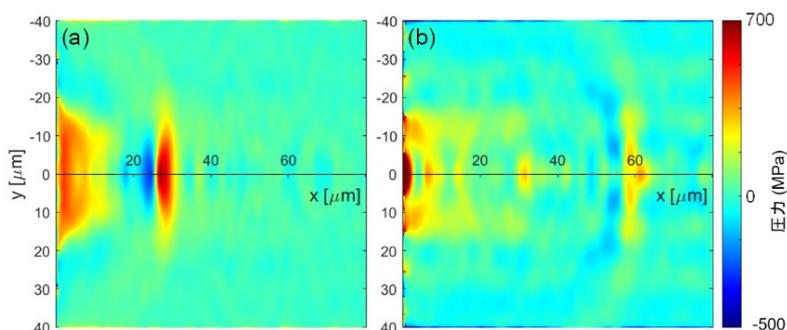


Fig. 5 干渉縞の歪みから抽出された圧力分布。フェムト秒レーザーを 1 パルス照射した(a)6 ns 後、(b)10 ns 後を示している。

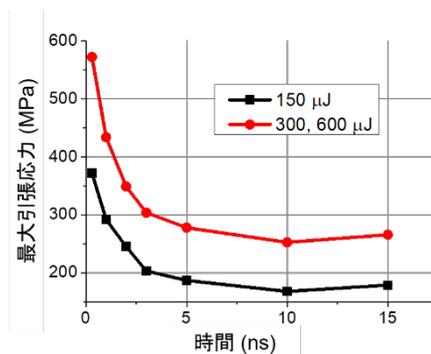


Fig. 6 最大引張応力の時間変化。密度分布の実測値と解析値をもとに校正された正確な入力に基づいた数値解析結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3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 Miyamoto Naoyuki, Ito Yusuke, Wei Chaoran, Yoshizaki Reina, Shibata Akihiro, Nagasawa Ikuo, Nagato Keisuke, Sugita Naohiko	4. 巻 45
2. 論文標題 Ultrafast internal modification of glass by selective absorption of a continuous-wave laser into excited electrons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 3171～3174
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OL.394952	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Wei Chaoran, Ito Yusuke, Shinomoto Rin, Nagato Keisuke, Sugita Naohiko	4. 巻 28
2. 論文標題 Simulation of ultrashort pulse laser drilling of glass considering heat accumulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 15240～15249
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.390289	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 Hattori Junya, Ito Yusuke, Jo Hiroshi, Nagato Keisuke, Sugita Naohiko	4. 巻 126
2. 論文標題 High-speed observation of pulse energy and pulse width dependences of damage generation in SiC during ultrashort pulse laser drilling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics A	6. 最初と最後の頁 861
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00339-020-04018-y	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 伊藤佑介, 杉田直彦	4. 巻 31
2. 論文標題 ガラスのフェムト秒レーザー穴あけ加工におけるダメージ形成メカニズム	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 光アライアンス	6. 最初と最後の頁 5～8
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8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Yusuke Ito, Reina Yoshizaki, Akihiro Shibata, Ikuo Nagasawa, Keisuke Nagato, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 Ultrafast and precision processing of glass by selective absorption of fiber-laser pulse into femtosecond-laser-induced filament
3. 学会等名 SPIE LAMOM (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chaoran Wei, Yusuke Ito, Rin Shinomoto, Keisuke Nagato, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 Simulation of hole drilling in glass using ultrashort pulse laser in consideration of heat accumulation
3. 学会等名 The 27th International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Ito, Reina Yoshizaki, Naoyuki Miyamoto, Akihiro Shibata, Ikuo Nagasawa, Keisuke Nagato, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 Ultrafast and precision drilling of glass by selective absorption of CW laser beam into femtosecond-laser-induced filament
3. 学会等名 15th International Conference on Laser Ablation (COLA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤佑介, 長藤圭介, 杉田直彦
2. 発表標題 ガラスのフェムト秒レーザー穴あけ加工におけるダメージ形成メカニズムの調査
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 魏超然, 伊藤佑介, 吉崎れいな, 柴田章広, 長澤郁夫, 長藤圭介, 杉田直彦
2. 発表標題 ガラスへの選択的光吸収によって形成した高温領域の高速掃引によるレーザ溝加工
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shunya Yoshitake, Yusuke Ito, Naoyuki Miyamoto, Akihiro Shibata, Ikuo Nagasawa, Keisuke Nagato, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 Ultrafast microwelding of glass by selective absorption of a continuous-wave laser into excited electrons
3. 学会等名 SPIE LAMOM (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junya Hattori, Yusuke Ito, Hiroshi Jo, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 High-speed observation of damage generation during ultrashort pulse laser drilling of wide-bandgap materials
3. 学会等名 SPIE LAMOM (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大園勇也, 杉田直彦, 服部隼也, 伊藤佑介
2. 発表標題 ガラスのフェムト秒レーザ加工における応力波のクラック形成に与える影響
3. 学会等名 第27回精密工学会学生会員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020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
---------	---------