

# 高速応力場制御によるガラスの精密フェムト秒レーザー加工

東京大学 工学部機械工学科 ○佐藤俊大 大学院工学系研究科機械工学専攻 伊藤佑介 服部隼也 魏超然 ◎杉田直彦

## 要旨

透明材料を微細に加工する手法として、フェムト秒レーザーが注目されている。しかし、レーザー照射の瞬間に高速で伝搬する応力波が材料内部にクラックを生成するため、精密加工が困難である。本研究では、応力波伝搬時に激しく変動する応力分布をピコ秒オーダーで計測し、制御した。その結果、クラックの原因となる引張応力の約40%低減を実現した。本研究で開発した応力制御技術は、クラックレス加工へとつながると期待される。

## 1. 序論

ガラスを微細に加工する手法として、フェムト秒レーザーが注目されている。しかし、フェムト秒レーザー加工時にはクラックが生成されるため、精密加工が難しいという課題がある (Fig. 1)。先行研究において、フェムト秒レーザー照射の瞬間に高速で伝搬する応力波の引張成分がクラックの原因であると示唆されている[1]。そこで本研究では、応力波伝搬時の密度分布をピコ秒からナノ秒のオーダーで計測し、制御することで、引張応力を抑制することを目的とする。

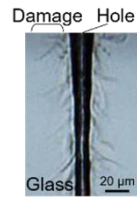


Fig. 1 Crack around drilled hole.

## 2. 提案手法および検証実験

### 2.1 ダブルパルス法

応力波の前方には圧縮応力、後方には引張応力が分布することが知られる[1]。そこで、引張応力の生じるタイミングで第2の応力波を生成し、圧縮応力を付与し、応力を相殺することを提案する。このダブルパルス法では、Fig. 2に示すように、メインパルス (1パルス目) 照射後ピコ秒からナノ秒の時間差でサブパルス (2パルス目) を照射する。

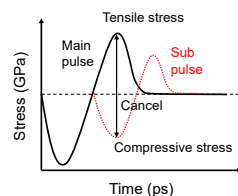


Fig. 2 Strategy of stress cancellation by double pulse method.

### 2.2 実験手法

パルス幅 180 fs、波長 1030 nm のフェムト秒レーザーパルスを分岐し、微小な遅延時間を設けた後に同軸で無アルカリガラス試料に集光した。その際に駆動される密度変化を、ポンプ・プローブ撮像法とマッハ・ツェンダー干渉計を組み合わせた手法により高速に計測することで、提案手法の有効性を評価した。

### 2.3 実験結果および考察

メインパルス、サブパルスのエネルギーをともに 100 μJ とし、照射間隔 1.5 ns で集光した際の密度分布計測結果を Fig. 3(a) に示す。これは、メインパルス照射の 10 ns 後の現象を写している。加工光の伝搬方向に座標軸を取り、座標軸に沿って抽出した密度分布を Fig. 3(b) に示す。メインパルスとサブパルスのエネルギーが等しいにも関わらず、サブパルスで現れる圧縮付与の効果が小さいという結果となった。これはサブパルス照射時に反射率が増大したことが原因であると考えられる。材料の屈折率  $n$  は、電子密度  $\rho$ 、入射光の周波数  $\omega$  および物理定数を用いて  $n = \sqrt{1 - \rho e^2 / \epsilon_0 m \omega^2}$  で表される。つまりメインパルス照射により電子密度が上昇し、過渡的に  $n=0$  に達すると、サブパルスが全反射されることを示している。このため、サブパルスによる光吸収を実現するには、全反射を回避する ( $n > 0$  を実現する) 手法を検討する必要がある。

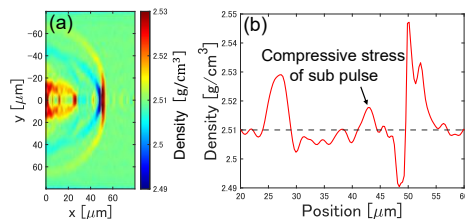


Fig. 3 Density distribution of stress wave along optical axis.

## 3. 2色ダブルパルス法の提案とモデル構築

電子密度を急速に低下させることは困難である。そこで、サブパルスの周波数を増大させることを提案する。サブパルスの波長を半分に変換した 2 色ダブルパルス法により、 $n > 0$  の状態を作り出す (Fig. 4)。サブパルスの反射過程と非線形吸収過程は、電子密度と光強度に依存する。シミュレーションモデルの構築によりこれらの過程を記述することで、圧縮付与に必要な照射条件を導出する。

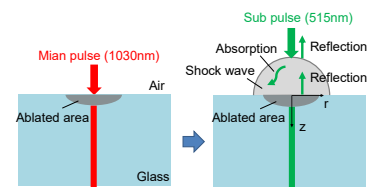


Fig. 4 Conceptual image of double pulse model.

## 4. 応力分布解析

引張応力を低減するためには、適切なタイミングで、適切な強度の圧縮を付与する必要がある。構築したモデルを用い、メインパルスのエネルギーを 50 μJ、サブパルスのエネルギーを 20 μJ、25 μJ とし、照射間隔を 250 ps から 400 ps の範囲で変化させたときの表面における応力の時間変化を解析した。その結果、照射間隔 250 ps でサブパルスを照射した際に、メインパルスの引張応力が最も抑制されること示唆された (Fig. 5)。

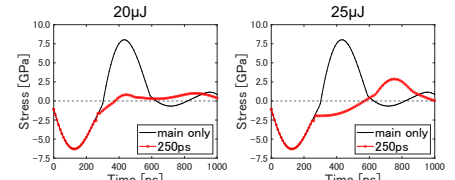


Fig. 5 Time change of stress. Positive value indicates tensile stress.

## 5. 2色ダブルパルス法検証実験

4章の解析結果を受け、メインパルスのエネルギーを 50 μJ、サブパルスのエネルギーを 20 μJ、25 μJ とし、照射間隔を 250 ps、300 ps、350 ps と変化させたときの密度分布を計測した。その結果、サブパルスのエネルギーが 25 μJ、照射間隔 300 ps のとき、Fig. 6に示すように密度の低下量が約40%抑制された。これはこの条件のもとで引張応力が抑制されたことを示している。

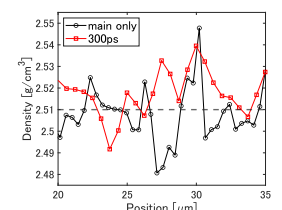


Fig. 6 Density distribution of stress wave along optical axis.

## 6. 結論

ガラスのフェムト秒レーザー加工時に発生するクラックを抑制するため、応力波伝搬時に分布する引張応力を、第2の応力波による圧縮応力で相殺することを提案した。過渡的全反射の影響を回避するために、サブパルスの波長を変化させた 2 色ダブルパルス法を提案し、モデル構築に基づき適切な照射条件を導出することで、引張応力の抑制を実現した。本研究は、今後、精密フェムト秒レーザー加工の実現に貢献すると考えられる。

## 謝辞

実験遂行にあたり日本学術振興会・基盤研究 B (21H01224) の支援を受けた。ここに感謝申し上げる。

## 参考文献

[1] Y. Ito, *et al.*, "Dynamics of pressure waves during femtosecond laser processing of glass," *Opt. Express* 27(20), 29158 (2019).