

# 超短パルスレーザーによるフィラメントの多数同時生成を活用したガラスの高能率微細精密加工法

東京大学機械工学科 ○小笠原教馬ジョー 東京大学大学院機械工学専攻 ©杉田直彦  
東京大学大学院機械工学専攻 吉崎れいな, 伊藤佑介, 魏超然

## 要旨

マイクロ流体チップやインターポーザにおいて、ガラスへの微細かつ高速な穴加工が要求される。超短パルスレーザーで励起した領域に連続波レーザーを集光することで高速微細加工が実現することが知られるが、本研究では更なる高速化を目指した。空間光変調により2本の励起領域を生成し、それらに連続波レーザーを吸収させることで、2点同時穴加工に成功した。今後3点以上の同時加工を実現することで、更なる超高速化が期待される。

## 1. 序論

ガラスの微細精密加工は、マイクロ流体チップ、積層半導体、光ファイバや導波路など様々な分野において必要とされている。これらの用途において微細性と高い加工能率が要求されるが、その両立は困難である。例えば超短パルスレーザーによるガラスの微細加工では、熱影響の少ない微細加工が可能である一方で、加工能率が低いという課題がある。近年、超短パルスレーザーによって形成されたフィラメント状の高電子密度領域 (Fig. 1 (a)) に連続波 (CW) レーザを吸収させる誘起加工法 (TSL) (Fig. 1 (b)) が開発され、微細加工の高速化が実現された[1]。本研究では、誘起加工法のさらなる高速化の実現を目指す。

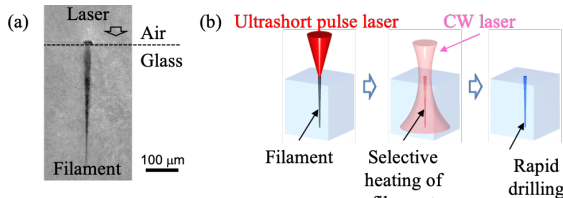


Fig. 1 (a) The filament with ultrashort pulse laser, (b) Schematic of TSL.

## 2. 同時多数誘起加工法の提案

本研究では SLM (Spatial Light Modulator) による光位相変調を活用して (Fig. 2), 超短パルスレーザーと CW レーザを多点集光することで、同時に多点で誘起加工法を実現することを提案する。そのためにまず多点に分岐された超短パルスレーザーによるフィラメントの生成条件を明らかにし、その上で2種のレーザーを精密に重ね合わせることで高能率加工を実現する。

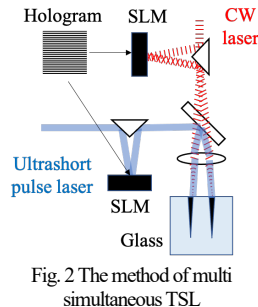


Fig. 2 The method of multi simultaneous TSL

## 3. フィラメント多数同時生成条件の解明

### 3.1 実験概要

同時多数誘起加工法の実現のためには、まずフィラメントの同時生成条件を明らかにすることが必要である。そこで、フィラメントの超短パルスレーザーの焦点位置とパルスエネルギーの依存性を調査するため、波長 800 nm の超短パルスレーザーを SLM で2点に分岐してガラスに照射した後の現象を Pump-Probe 法で高速観察し、各条件におけるフィラメントの長さを比較する。

### 3.2 実験結果及び考察

得られた結果を Fig. 3 に示す。まず焦点位置とフィラメントの関係について、 $z$  が小さくなる、つまり焦点位置がガラス試料の内側にあるほどフィラメントが長くなることがわかった。これは、超短パルスレーザーの焦点位置がガラスの外側に近いほど、ビームが拡散してしまい、自己収束の効果が薄れることが原因であると考えられる。次に超短パルスレーザーのパルスエネルギーについて、パルスエネルギーが増加するとフィラメントの長さは増大するが、パルスエネルギーが 135  $\mu\text{J}$  ではフィラメントが短くなることわかる。これは 135  $\mu\text{J}$  ではプラズマの発光によるレーザー光の散乱の影響が大きく出たことが原因と考えられる。

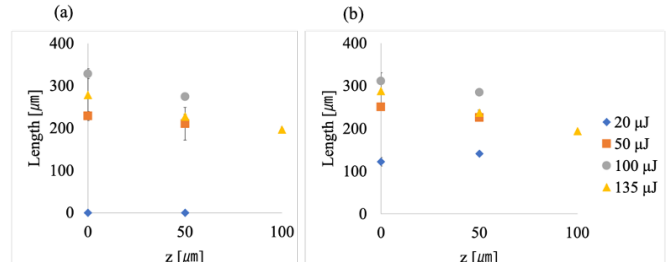


Fig. 3 Relationship between  $z$  and length of filament on (a) left side and (b) right side.

## 4. 同時多数誘起加工法評価実験

### 4.1 実験概要

同時多数誘起加工法の実現可能性とメカニズムを解明するために、波長 800 nm の超短パルスレーザーを1パルス照射した2点に、波長 1070 nm の CW レーザを照射し、その様子を高速カメラで観察した。

### 4.2 実験結果及び考察

Fig. 4 にレーザー照射の 1  $\mu\text{s}$ , 6  $\mu\text{s}$ , 16  $\mu\text{s}$ , 31  $\mu\text{s}$  後の現象を時系列順に並べた結果を示す。31  $\mu\text{s}$  という極めて短い時間で、100  $\mu\text{m}$  以上の穴あけ加工が2点同時に実現し、提案手法の有効性が実証された。この高速現象観察結果は、1  $\mu\text{s}$  時点で生成している電子励起領域に、CW レーザが選択的に吸収され加工が進行する様子を写し出している。CW レーザの吸収はガラスの深部から始まり、表面に向かって進行する。6  $\mu\text{s}$  後に注目すると、右側の加工が先に進行し、16  $\mu\text{s}$  後には、加工穴が先に完成している。それに続いて左側の加工が進行する。加工速度に左右の穴で違いがあるが、最終的には31  $\mu\text{s}$  という極短時間で加工が完了する。CW レーザと超短パルスレーザーの光軸のずれや CW レーザの出力の左右差を改良することで、さらなる高速化が可能となると考えられる。

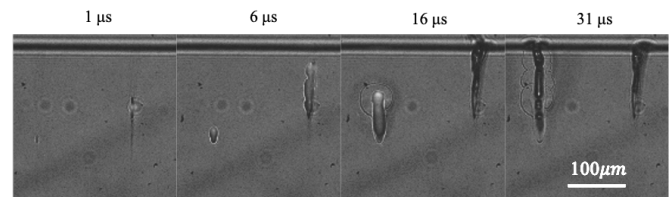


Fig. 4 High-speed imaging of proposed method

## 5. 結論

ガラスの超高速微細加工法である誘起加工法のさらなる高能率化を目指し、同時多数誘起加工法を提案した。提案手法の実現に向けて、フィラメントの生成条件に超短パルスレーザーのパルスエネルギーと焦点位置が重要であることを明らかにしたことで、SLM による2本のフィラメントの同時生成に成功した。それらのフィラメントに CW レーザを照射することで、同時多数誘起加工に成功し、従来の超高速加工法の2倍の加工能率を実現した。今後、レーザーの多数分岐によって加工能率のさらなる向上が期待される。

## 参考文献

- [1] Y. Ito, et al., "Ultrafast and precision drilling of glass by selective absorption of fiber-laser pulse into femtosecond-laser-induced filament," *Appl. Phys. Lett.* 113(6), 061101 (2018).