

ガラスの局所的電子励起による超高速レーザ加工メカニズムの解明

東京大学機械工学科 ○吉武俊哉 東京大学大学院工学系研究科機械工学科専攻 ◎杉田直彦

東京大学大学院工学系研究科機械工学科専攻 伊藤佑介, 吉崎れいな, 宮本直之

要旨

ガラスに対する微細精密加工手段としてフェムト秒レーザ加工が注目されているが、加工能率に課題が存在している。そこでフェムト秒レーザ照射により形成した局所的な高電子密度領域に連続波レーザを選択的に吸収させた。これにより、従来手法の微細精密加工特性を維持したまま超高速加工を実現した。さらに、高速現象観察とシミュレーションにより超高速加工のメカニズムを明らかにした。

1. 序論

マイクロ流体チップ、積層半導体、光導波路など、ガラスへの高性能微細加工は医療や通信を含む様々な分野において必要不可欠な技術となってきた。ガラスに対する微細加工手法として超短パルスレーザ加工が注目を集めているが、この手法では加工能率の低さが致命的な課題となっている[1]。近年、超短パルスレーザによって形成された高電子密度領域を活用した超短パルスレーザ誘起加工法（以下、誘起加工法または TSL）が開発され、微細加工の高速化が実現された[2]。しかしながら、高速加工のメカニズムは依然明らかとなっていないのが現状である。そこで本研究では、高速現象観察とシミュレーションにより、誘起加工法の加工メカニズムを明らかにした。

2. 超短パルスレーザ誘起加工法

超短パルスレーザをガラスに照射すると、電子の励起された領域が光軸に沿って材料深部まで形成される（Fig. 1(a)）[3]。この領域に連続波レーザを選択的に吸収させることで誘起加工法が実現された（Fig. 1(b)）。しかし、超短パルスレーザによる励起や連続波レーザによる加熱が材料除去に及ぼす影響が示されていないため、高速な材料除去を駆動するメカニズムが明らかとなっていない。

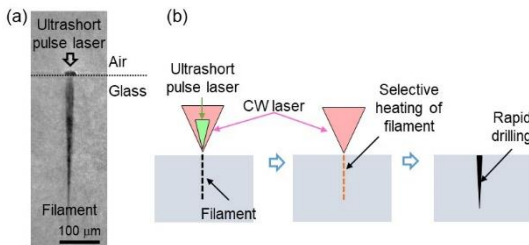


Fig. 1 (a) Filamentary excitation of electrons, (b) schematic of TSL [2].

3. 加工メカニズムの調査

3.1 目的及び方法

超短パルスレーザによる励起及び連続波レーザによる加熱が誘起加工法の実現に与える影響を評価するために、加工条件依存性評価実験を行った。Fig. 2 のような光学系を組み、波長 515 nm の超短パルスレーザ 1 パルスの照射後、波長 1070 nm の連続波レーザを 50 μ s 照射した。超短パルスレーザのパルス幅及びパルスエネルギーと、連続波レーザの出力を変化させ、加工現象を高速カメラで観察した。また、温度分布シミュレーションを構築し、ガラス内部における温度上昇の初期過程について考察した。

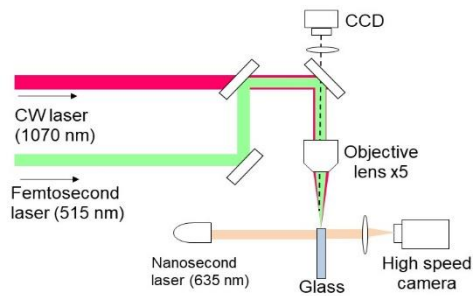


Fig. 2 Optical setup.

3.2 結果及び考察

得られた結果を Fig. 3 示す。Fig. 3(a)に示すように、超短パルスレーザのパルス幅に依存して、加工の起こる閾値となるパルスエネルギーが変化することが明らかとなった。パルス幅が短いほど、光強度が大きいため電子励起が生じやすい。即ち本結果は、電子励起を効率的に生じさせることによって誘起加工法が実現しやすくなることを示している。また、Fig. 3(b)の結果は、連続波レーザの出力に依存し、加工深さが変化することを示している。出力 30 W 以下では、加工が生じなかった。このときの試料表面温度の時間変化を計算した結果を Fig. 3(c)に示す。出力が 40 W 以上の場合、熱拡散よりも早い時間スケールで連続波レーザの吸収が起こり、材料の沸点である 3000 $^{\circ}$ C を上回り、加工が進行することを示している。30 W 以下では、熱拡散の影響が大きく、温度が一旦減少することにより、材料の吸収率が減少し、光吸収が起こらず、加工が進行しなかったのだと考えられる。

以上より、超短パルスレーザで十分に電子を励起させた上で、材料を継続的に加熱させることで、高い光吸収率が持続し、加工が高速に進行するのだと考えられる。

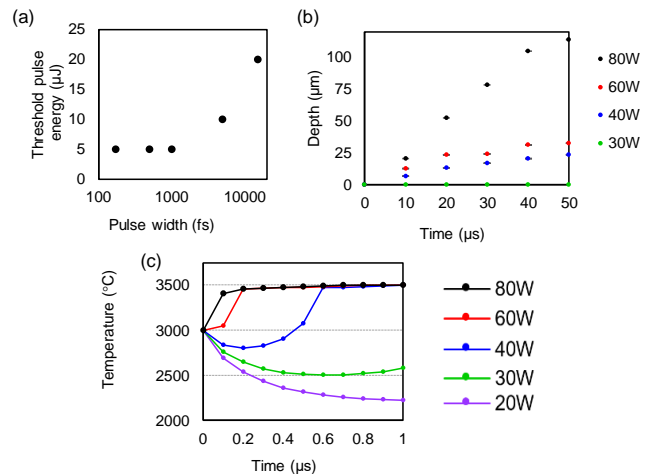


Fig. 3 Relations between (a) pulse width and threshold pulse energy, and (b) hole depth and power. (c) Temperature simulation.

4. 結論及び今後の展望

超短パルスレーザ誘起加工法における高速加工は、超短パルスレーザにより電子を十分に励起させた上で、継続的に連続波レーザで材料を加熱し、高い光吸収率を持続させることで実現することが明らかになった。

参考文献

- [1] R. Shinomoto, et al., "Experimental analysis of glass drilling with ultrashort pulse lasers," *Int. J. Autom. Technol.* 10(6), 863 (2016).
- [2] 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).
- [3] X. Mao, et al., "Imaging femtosecond laser-induced electronic excitation in glass," *Appl. Phys. Lett.* 82(5), 697 (2003).