## 高繰り返し超短光パルスによるガラス内部加工中のラマン温度測定

Measurement of temperature dynamics by time-resolved micro-Raman spectroscopy during high repetition rate ultrafast laser microprocessing

阪大院工<sup>1</sup>, <sup>○</sup>橋本文也<sup>1</sup>, S. Richter<sup>2</sup>, S. Nolte<sup>2</sup>, 小関泰之<sup>1</sup>, 伊東一良<sup>1</sup> Osaka Univ.<sup>1</sup>, Friedrich Schiller Univ.<sup>2</sup>, <sup>○</sup>F. Hashimoto<sup>1</sup>, S. Richter<sup>2</sup>, S. Nolte<sup>2</sup>, Y. Ozeki<sup>1</sup>, K. Itoh<sup>1</sup> E-mail: hashimoto@photonics.mls.eng.osaka-u.ac.jp

我々は、時間分解マイクロラマン温度測定法を用いて、超短光パルスによるガラス内部加工中の温度解析を行ってきた。これまでに、シングルショット照射による集光点付近での局所的で急峻な温度上昇を報告した[1]。一方で、高繰り返し超短光パルスによるガラス内部加工は、シングルショット照射と比較し、加工領域がなめらかで高速な加工が可能であるという利点を有している[2,3]。このとき、熱蓄積効果により、加工領域に与える熱の影響が大きいため、熱プロセスの解明は重要であると考えられる。今回、高繰り返し超短光パルスによるガラス内部加工中のラマン温度測定を行ったので報告する。

加工用フェムト秒レーザーパルス(中心波長:1044 nm, パルス幅:~600 fs, 繰り返し周波数:1 MHz, パルスエネルギー:1.1 μJ/pulse)と,ラマン励起用パルス(中心波長:532 nm, パルス幅:<10 ns, 繰り返し周波数:10 kHz, パルスエネルギー:0.3 μJ/pulse)を電気的に同期させ,対物レンズ(20 倍,NA0.46)により試料表面下 200 μm へ集光照射した.試料として B33 を用いた.自動ステージを用いて,走査速度 1 mm/s で試料走査を行った.集光点近傍で発生した後方ラマン散乱信号は共焦点系を通りゲート付き ICCD により検出した.ICCD のゲート時間は 10 ns,積算回数は 20000 回とした.集光点での温度は,測定したスペクトルのストークス散乱光強度とアンチストークス散乱光強度の比から算出した[1].加工用パルスの集光位置を加工用パルスの走査方向に垂直に変化させ,温度の空間分布を時間分解取得した.

測定した時間分解温度分布を図1に示す.加工用パルスの集光点から±3 μm 程度の範囲では、強い迷光が発生したため温度測定が困難であった.一方で、加工用パルスの集光点から十分遠方においては、温度測定を行うことに成功した.また、図1に示すように、加工用パルスの集光点からの距離に応じた温度減少を確認した.得られた温度分布は、シングルショット照射時に得られるガウシアンの温度分布とは異なる分布を示す.この要因として、測定前に照射されたパルスによる熱の影響である熱蓄積効果が挙げられる[2]. 熱蓄積効果を考慮し、以下の式(1)で与えられる曲線によりフィッティングを行った.

$$T(x,t) = A \sum_{r=0}^{150} \left\{ (w_{th} / 2)^2 + 4D_{th} (t + n / f_{rep}) \right\}^{-3/2} \exp \left[ -(x - B)^2 / \left\{ (w_{th} / 2)^2 + 4D_{th} (t + n / f_{rep}) \right\} \right], \quad (1)$$

ここで、 $w_{\rm th}$ は初期熱源の 1/e 幅、 $D_{\rm th}$ は熱拡散率、xは加工パルスの位置、 $f_{\rm req}$ は加工用レーザーの繰り返し数、nは測定するパルスの照射までに照射された n 番前のパルスを示している。A、B は任意定数である。n>150 においてフィッティング関数の変化が小さかったため、n=150 とした。フィッティング曲線は球状の熱源を仮定している。また、熱拡散率の温度依存性を無視した。すべての遅延時間 t において、 $w_{\rm th}$ 、 $D_{\rm th}$ 、A、B が等しいとしてフィッティングを行った。フィッティング結果を図 1 に示す。温度分布の裾に

おいて、フィッティング曲線と測定値は良く一致している. 一方、中心付近では、遅延時間が短い場合にフィッティング曲線の幅が狭く、長い遅延時間において幅が広いため、測定値とのずれが見られる. この一因として、上述の仮定が成り立っていない可能性が考えられる. 得られた温度分布とフィッティング曲線のより詳細な議論は講演にて発表する.

参考文献 [1] T. Yoshino *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **51-**10, 102403 (2012). [2] M. Shimizu *et al.*, J. Appl. Phys., **108**, 073533 (2010). [3] S. M. Eaton *et al.*, Opt. Express, **13-**12, 4708 (2005).

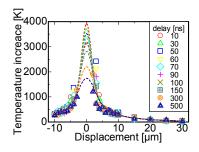


図1時間分解温度分布.