

フェムト秒レーザー加工中のビーム照射領域とその周辺領域の温度分布測定技術

レーザー計測制御プロジェクトスタッフ 太田幸宏*

Temperature Distribution Measurement Technique
of Beam Irradiation Area and Its Peripheral Area while Femtosecond Laser Processing

Yukihiro Ohta

Femtosecond laser is called a beam source for non-thermal processing. Then, the temperature distribution of the beam irradiation area and the peripheral area while femtosecond laser processing was measured by using the thermography. In that study on the relation between the irradiation energy of the laser and the temperature change of a target, the target is melted by large energy irradiation and atmospheric plasma generation was found to affect the target temperature significantly.

1. はじめに

フェムト秒レーザーは、被加工物の吸収率に影響されることなく加工が可能で、さらに、非熱的な加工ができるといわれている¹⁾。そのため、フェムト秒レーザーを利用して、難加工材である透明体や脆性材、あるいは、加工中の熱の影響を避けたい材料の加工に関する研究が盛んに行われている^{2,3)}。しかし、フェムト秒レーザーは一度の照射で加工できる領域が小さく、加工効率が悪いのが欠点である。加工効率を上げる方法として、レーザー光を複数に分岐して一度に複数の対象を加工するマルチビーム化や、照射エネルギーを保ちながら繰り返し周波数を高速化することでタスク時間を短縮することが考えられている。一方、照射エネルギーを増加して加工される領域を大きくする方法も考えられる。しかし、大きな照射エネルギーによるフェムト秒レーザー加工の結果を観察すると、溶融した痕跡が確認できる。そのため、過度に大きな照射エネルギーによるフェムト秒レーザー加工では、その特長である非熱的な加工ができなくなる。

本報告では、フェムト秒レーザー加工のタスク時間を短縮する手段として照射エネルギーを増加させる場合、被加工物を溶融させないで、どの程度まで照射エネルギーを上げることが可能か調べるため、フェムト秒レーザー照射中の被加工物の温度分布の測定を行った⁴⁾。さらに、フェムト秒レーザー光を

大気中に集光したときにプラズマが発生するが、それが被加工物の温度上昇の間接的な原因と考えられるため、大気プラズマと被加工物の距離を変化させて温度分布の測定を行った。

2. 方法

2.1 実験装置

実験装置を図1に示す。実験で使用したフェムト秒レーザーは、中心波長約800nm、波長半値幅40nm、パルス幅80fs (f: フェムトとは 10^{-15} を表す接頭語である) と非常に短い時間だけ強いビームを照射するパルス光源である。繰り返し周波数は1kHzで、照射エネルギーはNDフィルターで調整した。集光レンズは焦点距離20mm、開口数0.26、作動距離30.5mmの対物レンズを、結像レンズは焦点距離200mmのアクロマティックレンズを使用した。観察用照明にはハロゲン光源を用いて、ビームスプリッタ (BS) で観察光軸上に導光した。被加工物や集光レンズからレーザー光が反射して観察用カメラに入射することを防ぐため、バンドパスフィルタ (BPF) 550nm \pm 40nmを通して観察した。また、被加工物は自動XYステージ上に固定することで照射位置が走査できるようになっている。ただし、Z方向は手動ステージで調整した。

*) 現 光科

【報告】

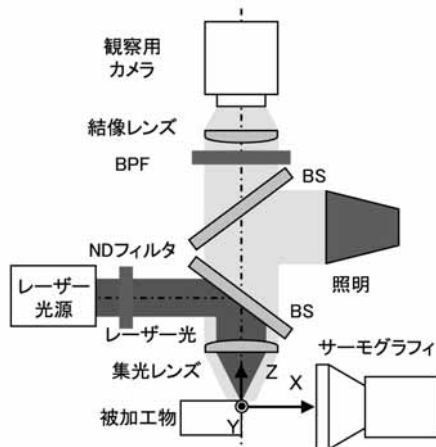


図1 実験装置

2. 2 温度分布の測定

温度分布の測定は、非接触で測定できるサーモグラフィを使用した。熱電対のような接触式の測定方法では面測定ができず、しかも、レーザー照射によりセンサー部が損傷し正確に温度測定ができなくなるため、レーザー照射中の被加工物の温度測定には非接触で測定できるサーモグラフィが適している。使用した顕微レンズ装着サーモグラフィの仕様を表1、外観写真を図2に示す。

表1 顕微レンズ装着サーモグラフィの仕様

感度波長	7.5~14 μm
解像度	640×480 (VGA)
作動距離	50mm
分解能	25 μm



図2 顕微レンズ装着サーモグラフィの外観

なお、実験で使用したフェムト秒レーザーの中心波長はサーモグラフィの感度波長から大きく外れているため、レーザー照射中の温度の測定結果に影響はしない。

サーモグラフィによる温度分布測定は、図1に示すようにレーザー光軸の法線方向から被加工物の側面を測定対象にして行う。開口率の大きな集光レンズを使用する場合、結像レンズと観察用カメラを図1のように配置することで、高分解能の画像として観察することができる。そのため、観察用カメラの位置にサーモグラフィを配置して温度を測定できれば、高分解能な温度分布画像が取得することが可能になる。しかし、フェムト秒レーザーの集光に用いたレンズは、サーモグラフィの感度波長の光を透過しないため、上記の測定手法は適応できない。そこで、被加工物の側面にサーモグラフィを配置して、レーザー照射中の被加工物の温度分布測定を行った。レーザー照射領域の温度分布を被加工物の側面から測定するため、レーザー照射位置は図3(b)のようにして実験を行った。サーモグラフィは物体表面の温度分布を測定する装置である。そのため、図3(a)のようにレーザーを照射すると、加工部から側面に熱伝導した温度分布を測定することになる。そこで、図3(b)のように被加工物の縁を削り取るようにレーザーを照射することで、レーザー照射領域を高分解能な温度分布を測定することが可能になる。

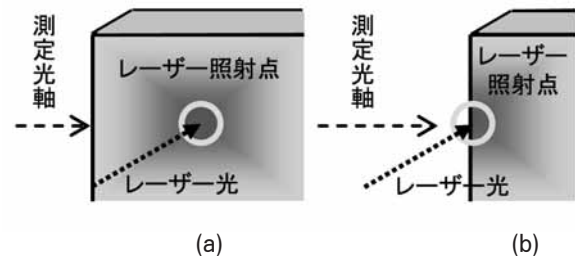


図3 側面からの温度分布測定

2. 3 測定対象の放射率

サーモグラフィで物体の温度を正確に測定するためには、測定対象の放射率が必要となる。測定対象として、フェムト秒レーザー加工の特長のひとつである、透明体を加工することができることを活かす

【報告】

ため、透明なスライドガラス、アクリル樹脂、および、ポリカーボネート樹脂を選択した。アクリルとポリカーボネートは有機ガラスといわれるように、非常に透明度が高い樹脂である。

放射率の計測方法は、図4のように測定対象の半分を放射率が既知の塗料で覆い、サーモグラフィで温度を測定し、塗料で覆っている領域と覆っていない領域の測定温度が同じになるように、覆っていない領域の放射率を調整することで求める。今回、塗料として放射率0.94の黒体スプレーを用いて、各被加工物の放射率を求めた結果、それぞれの放射率は表2の値となった。



図4 放射率の計測

表2 被加工物の放射率

被加工物	放射率
スライドガラス	0.87
アクリル樹脂	0.95
ポリカーボネート樹脂	0.94

3. 結果

3.1 照射エネルギーによる被加工物の温度変化

図5は照射エネルギーが100 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ のときの温度分布測定画像で、図6は横軸に照射エネルギー、縦軸に被加工物の最大温度をプロットしたグラフである。温度測定後に確認した加工痕は、図5の画像で2ピクセルに相当することから、温度上昇している範囲が1000 μm 以上の大きさである。図6のグラフから、ポリカーボネート樹脂が他のものと比較し

て温度が上昇しやすいことが分かる。また、照射エネルギーが40 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 以上になると、アクリル樹脂とポリカーボネート樹脂の測定温度は、軟化温度以上になることが確認できる。

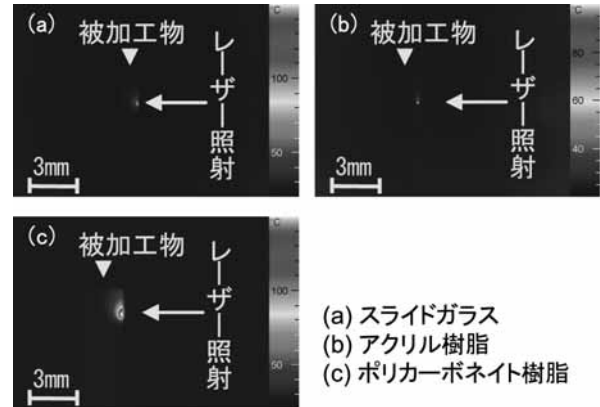


図5 温度分布測定画像

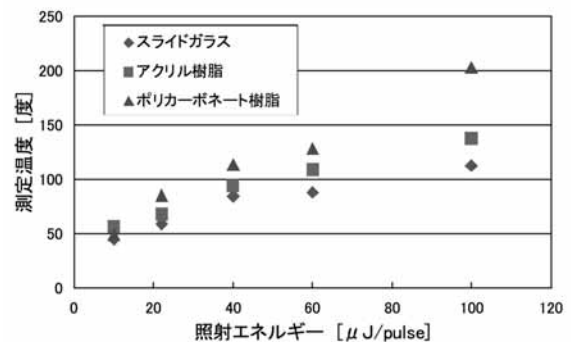


図6 温度分布測定結果

3.2 大気プラズマによる被加工物の温度変化

フェムト秒レーザー光を大気中で集光すると、大気のブレイクダウンによるプラズマの発光が視認できる。大気プラズマが被加工物の温度上昇の一因となるのかを調べた。

図7(a)は観察用カメラで大気プラズマを撮影した画像で、図7(b)は同じ大気プラズマをサーモグラフィで温度測定した画像である。図7(b)から、サーモグラフィは大気プラズマによる大気の温度変化を測定できないことが分かる。その原因は大気の放射率が極めて小さいためである。このことから、大気プラズマ越しに被加工物の温度分布を測定できることが分かる。

大気プラズマが被加工物の温度上昇に与える影響

を調べるため、大気プラズマと被加工物との距離をパラメータにして実験を行った。大気プラズマと被加工物との距離は図1のX軸方向への移動距離とした。また、レーザー加工による温度上昇を排除して、プラズマによる温度上昇のみを測定するため、レーザー照射による形状変化が行われなくなった後に温度測定を行った。

図8は照射エネルギーが $100\mu\text{J}/\text{pulse}$ で大気プラズマと被加工物の距離が0、50、 $100\mu\text{m}$ のときの観察画像と温度分布測定画像である。図9は大気プラズマと被加工物の距離を変数にして、5種の照射エネルギーの実験結果をプロットしたグラフである。ただし、被加工物は透明なポリカーボネート樹脂を用いた。この結果から、大気プラズマの発生が被加工物の温度上昇に大きく影響していることが確認できた。

4. まとめ

フェムト秒レーザー照射中の被加工物の温度分布をサーモグラフィで測定し、以下のことが確認できた。

- レーザー光の照射エネルギーが大きくなると、被加工物は照射部を中心として広範囲に温度が上昇した。
- 照射エネルギーが $40\mu\text{J}/\text{pulse}$ 以上になると、アクリル樹脂とポリカーボネート樹脂が固体から軟化する温度以上となり、被加工物が溶けていることが確認できた。
- フェムト秒レーザーによる大気プラズマの発生は、被加工物の温度上昇に大きく作用していることを確認できた。
- プラズマが発生しない環境下であれば、加工効率の改善として照射エネルギーを増加させる方法が適応できる可能性を確認できた。

参考文献

- 1) 藤田雅之、橋田昌樹：フェムト秒レーザー加工、J. Plasma Fusion Res. Vol.81, Suppl. 195-201, 2005
- 2) 沢田博司：フェムト秒レーザーによる周期構造

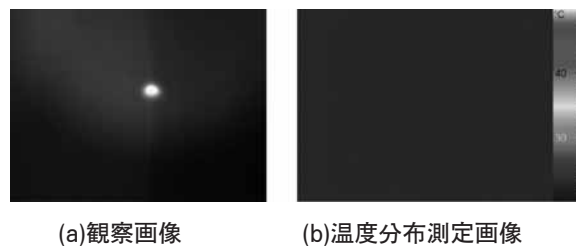


図7 フェムト秒レーザーによる大気プラズマ

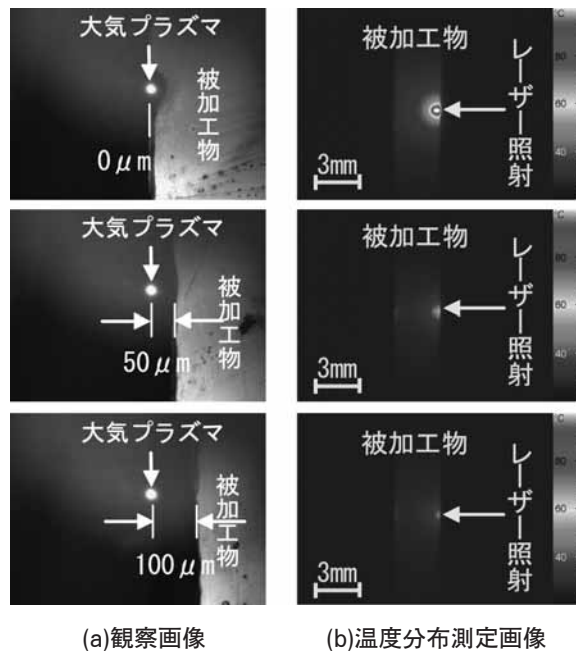


図8 大気プラズマの位置と温度変化

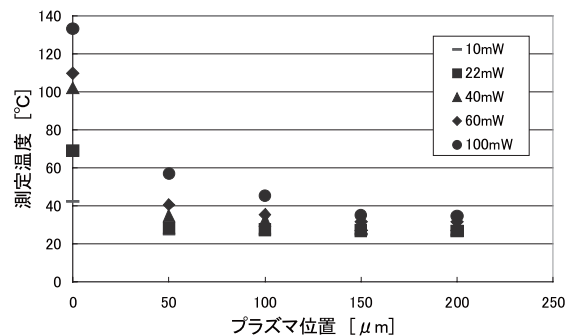


図9 プラズマ位置と測定温度のグラフ

と機能表面形成, OPTRONICS, No.4, 176-179, 2006

- 3) 玉木隆幸：超短パルスマイクロプロセッシングとマイクロ接合法に関する研究, レーザ加工学会誌 Vol.15 No.2, 106-112, 2008
- 4) 太田幸宏：静岡県工業技術研究所 研究報告 第2号, 200-201, 2009