

金属・複合材料と透明材料との気密性レーザー接合

立命館大学 理工学部 電気電子工学科

教授 渡邊 歴

(平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013206)

キーワード：フェムト秒レーザー，接合

1. はじめに

近年、様々な産業分野でフェムト秒レーザーでの加工が注目を集めている¹⁻⁴⁾。フェムト秒レーザー加工は、非接触、微細な加工が可能などの特徴をもつ。

光学部品、電子部品、MEMS (Micro Electro Mechanical System) においてさまざまな環境条件から保護し、耐候性に優れた、金属と透明材料との気密性パッケージングの開発がのぞまれている。しかし、従来の接合法では、接合点以外に損傷が生じるという問題点がある。本問題を解決するために、超短光パルスの加工技術により透明材料の直接接合方法を提案している⁶⁻⁹⁾。超短光パルスを2枚の透明材料の内接面に集光照射すると、集光領域では局所的に温度が上昇し、集光近傍にのみ局所的な熔融と再凝固が生じ、精密な接合が可能となる¹⁰⁻¹⁸⁾。本研究では、ギャップのある金属材料、複合材料とガラス材料間の接合を可能にすることを目的として、超短光パルスレーザー接合のための加工因子の抽出を行い、レーザー接合を実施した。レーザーパルスの繰り返し周波数、ビーム形状整形により、構造変化の制御、レーザー接合を試みた。

2. フェムト秒レーザー接合

レーザー接合法は、微細領域の接合が可能である。例えば、図1(a)に示すように透明材料と(線形)吸収材料が重ね合わせられているとき、レーザー光は透明材料を透過後、吸収材料にて線形吸収される。このため、レーザー光が照射される吸収材料の全領域にわたり線形吸収が生じ、熱が発生する。そして、被接合材料の熔融が生じることで、2つの材料を接合することができる。または、図1(b)のように、透明材料間に吸収媒質が中間層として介在している場合、中間層において線形吸収による熱発生が生じることにより、材料が熔融し、2つの材料を接合すること

ができる。

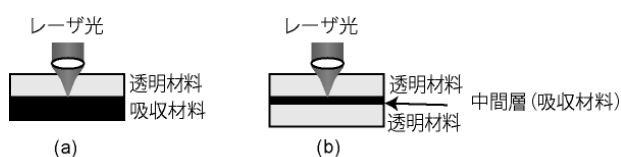


図1 レーザー微細接合

フェムト秒レーザーパルスを透明材料中に集光照射することにより、多光子吸収や自己集束など高いピークパワーをもつ場合のみに起こる非線形光学現象が生じ、プラズマが生成され、透明材料を熔融し、再凝固し、接合が可能になる。フェムト秒レーザーパルスを透明材料内部に集光すると材料を非接触でかつ局所的に内部加工ができることから、図2に示すように、超短光パルスを2つの基板の境界面に集光することにより、局所的な熔融が生じ、2つの基板を接合することができる。この接合法は、高精度、中間層が不要、微細領域の接合が可能という利点をもつ。この超短光フェムト秒レーザー接合では、基板間の隙間が大きくなれば基板間でアブレーションが生じ、接合が不安定になるため、圧力をかけることにより基板間の隙間を低減し、レーザーパルスを照射する必要がある。

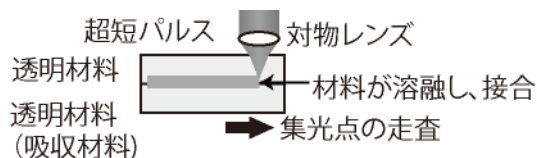


図2 フェムト秒レーザーを用いた接合概念図

3. 実験光学系

図 3 (a)に、本研究で用いた実験光学系を示す。

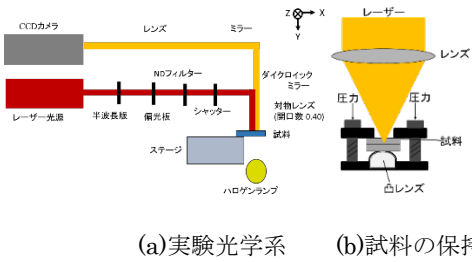


図 3 実験光学系

レーザー光源として、チタンサファイアレーザー(中心波長 800 nm, パルス幅 100 fs, 繰り返し周波数 1 kHz)とファイバーレーザー(中心波長 1064 nm, パルス幅 250 fs, 繰り返し周波数 1 MHz)を用いた。レーザー光源から出たレーザーパルスのエネルギーを半波長板, 偏光子, ND(Neutral Density)フィルターで調節した。レーザーパルスは, ダイクロイックミラーで反射され, 開口数 0.40 の対物レンズを用いて試料内部に集光照射した。試料には, 厚さ 1 mm の PMMA を使用し, コンピューター制御の 3 軸精密ステージに設置した。さらに, 図 3 (b)に試料間の隙間を狭くするために凸レンズを備えた治具を示す。

4. チタンサファイアレーザーによる PMMA 接合

PMMA 間の接合実験の結果を図 4 (a), (b)に示す。チタンサファイアレーザーのパルスエネルギーを 4.2 $\mu\text{J}/\text{pulse}$, 速度 0.1 mm/s, ステージの走査パターンは四角形の中心から外に向かう螺旋状のようなパターンを加工し, 接合領域は 1 mm², ステップ間隔は 10 μm として接合した。図 4 (a)は, 接合した PMMA の一枚を持ち上げ, 接合できているか確認した観察結果である。図 4 (b)は, 接合後の接合面の透過顕微鏡像である。次に, 接合可能範囲を探索するため速度 0.1 mm/s は固定し, パルスエネルギーを変化させ実験を行った。速度を 0.1 mm/s として接合を行う場合, 3.5 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 以上のパルスエネルギーが必要であった。

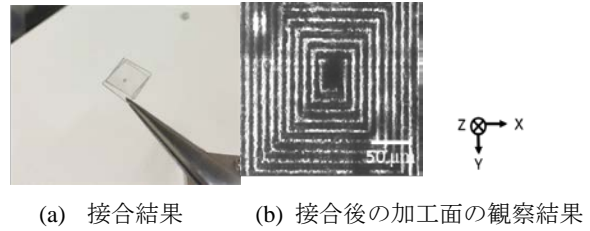


図 4 接合後の観察結果

5. ファイバーレーザーによる PMMA 接合

ファイバーレーザーを用いて PMMA の接合を行った。速度 1 mm/s の場合, パルスエネルギーが 0.6 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 以上で接合することができた。ファイバーレーザーの繰り返し周波数が高いことから, 熱蓄積しやすく, パルスエネルギーが小さく, 速度が速くても接合できたと考えられる。

6. アキシコンレンズを用いた PMMA 内部のフェムト秒レーザー加工

レーザーパルスをガウスビームで集光する場合, フィラメント状構造変化が誘起されるが, さらに, 光軸方向に長い範囲で集光する特徴を持つアキシコンレンズを用いることによる, フェムト秒レーザー加工領域の拡張を試みた。アキシコンレンズとは片面が平面, もう片面が円錐型のレンズである。アキシコンレンズにガウス型の強度分布を持つ光が入射すると, ベッセル型の透過光を得ることができ。この透過光はベッセルビームと呼ばれる¹⁹⁾。

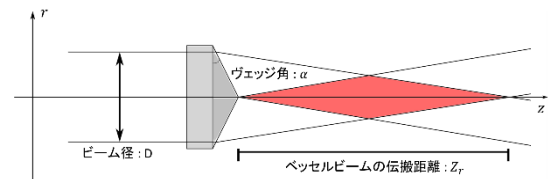


図 5 アキシコンレンズによるベッセルビームの伝搬距離

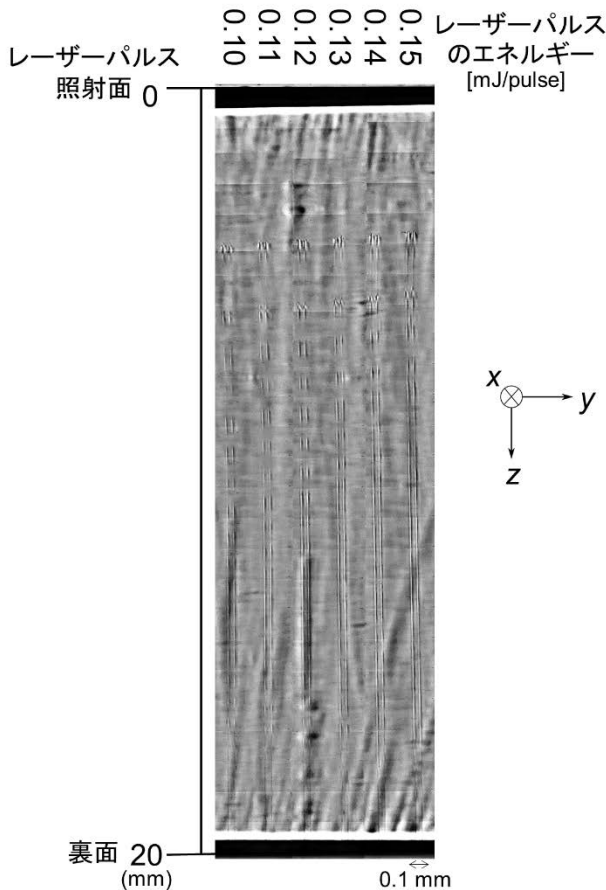


図6 アキシコンレンズとフェムト秒レーザーパルスによるPMMA内部の構造変化

レーザー光源には増幅チタンサファイアレーザー(中心波長:800 nm パルス幅:100 fs 繰り返し周波数:1 kHz)を用いた。光源から出たフェムト秒レーザーパルスをアキシコンレンズによりPMMA内部に集光した。PMMA試料の厚さは2mmである。アキシコンレンズの頂角は170°である。

レーザーのエネルギーが0.15 mJ/pulse, レンズと試料の距離が15 mm, ステージの速度が0.5 mm/sの条件で, 光軸に垂直方向へステージを2 mm動かした。構造変化の側面の透過顕微鏡図を図6に示す。構造変化が入射面から17~18 mm付近まで誘起されていることが確認できる。また, レンズと試料の距離, レーザーのエネルギーなどを変化させることにより, 構造変化の位置, 長さを変化した²⁰⁾。

7. 金属と透明材料の接合

チタンサファイアレーザーならびにファイバーレーザーを用いて, 銅とPMMA, 銅とガラスの接合が可能であった。金属の表面形状, 金属と透明材料との密着度により接合状況が変わることがわかった。フェムト秒レーザーを集光し, 金属とガラスを治具なしで接合できることが報告されている²¹⁾。金属と透明材料のレーザー接合では, 金属のアブレーションと透明材料の熔融のため, 接合が可能であると考えられる。図7に銅とガラスの接合結果を示す。

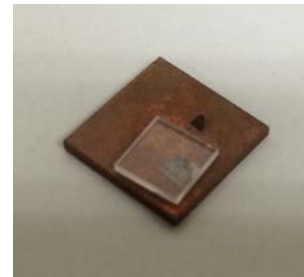


図7 銅とガラスの接合

8. まとめと今後の展開

本研究では, フェムト秒レーザーとして, チタンサファイアレーザーとファイバーレーザーを用いて接合を行った。繰り返し周波数が高い場合, 熱が蓄積し, 速い速度で接合でき, レーザー接合に向いていると考えられる。また, 接合領域の拡大を目指し, アキシコンレンズを用いた加工領域の拡張を行った。集光領域の空間形状を制御したレーザー加工により, 透明材料や金属の加工が可能となると考えられる。

謝辞

本研究の実施にあたり, 公益財団法人天田財団より一般研究開発助成(AF-2013206)を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- (1) 渡邊 歴 他: フォトニクス産業応用に向けた超短パルスレーザーマイクロプロセッシング, **41**, 780-784 (2013).
- (2) 渡邊 歴, 玉木 隆幸: フェムト秒レーザーを用いた透明材料の接合技術, 精密工学会誌 **81**, 731-734 (2015).
- (3) W. Watanabe, Y. Li, and K. Itoh: Ultrafast laser micro-processing of transparent material, *Optics & Laser*

Technology **78**, Part A, (2016) 52.

- (4) W. Watanabe, T. Tamaki, and K. Itoh: Ultrashort laser welding and joining, in Femtosecond laser micromachining: photonic and microfluidic devices in transparent materials, Eds, R. Osellame, G. Cerullo, R. Ramponi (Topics in Applied Physics, Springer, 2012) p. 467.
- (5) I. Miyamoto, K. Cvecek, Y. Okamoto, M. Schmidt: Internal modification of glass by ultrashort laser pulse and its application to microwelding, Appl. Phys. A, **114** (2014) 187.
- (6) T. Tamaki, W. Watanabe, J. Nishii, and K. Itoh: Welding of transparent materials using femtosecond laser pulses, Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) L687.
- (7) W. Watanabe, S. Onda, T. Tamaki, K. Itoh, and J. Nishii, Space-selective laser joining of dissimilar transparent materials using femtosecond laser pulses, Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 021106.
- (8) W. Watanabe, S. Onda, T. Tamaki, and K. Itoh: Direct joining of silica glass substrates by 1 kHz femtosecond laser pulses, Appl. Phys. B **87** (2007) 85.
- (9) T. Tamaki, W. Watanabe, and K. Itoh: Laser micro-welding of transparent materials by a localized heat accumulation effect using a femtosecond fiber laser at 1558 nm, Opt. Express **14** (2006) 10460.
- (10) J. Bovatsek, A. Arai, and C. B. Schaffer: Three-dimensional micromachining inside transparent materials using femtosecond laser pulses: new applications, in CLEO/QELS and PhAST 2006 (California, USA, 2006).
- (11) S. Richter, S. Döring, A. Tünnemann, and S. Nolte: Bonding of glass with femtosecond laser pulses at high repetition rates, Appl. Phys. A, **103** (2011) 257.
- (12) F. Zimmermann, S. Richter, S. Döring, A. Tünnemann, and S. Nolte: Ultrastable bonding of glass with femtosecond laser bursts, Appl. Opt., **52** (2013) 114.
- (13) A. Volpe, F. Di Niso, C. Gaudiuso, A. De Rosa, R. Martínez Vázquez, A. Ancona, P. M. Lugarà, and R. Osellame: Welding of PMMA by a femtosecond fiber laser, Opt. Express, **23** (2015) 4114.
- (14) A. Horn, I. Mingareev, A. Werth, M. Kachel, and U. Brenk: Investigations on ultrafast welding of glass-glass and glass-silicon, Appl. Phys. A, **93** (2008) 171.
- (15) I. Miyamoto, Y. Okamoto, A. Hansen, J. Vihinen, T. Amberla, and J. Kangastupa: High speed, high strength microwelding of Si/glass using ps-laser pulses, Opt. Express, **23** (2015) 3427.
- (16) Y. Ozeki, T. Inoue, T. Tamaki, H. Yamaguchi, S. Onda, W. Watanabe, T. Sano, S. Nishiuchi, A. Hirose, and K. Itoh: Direct welding between copper and glass substrates with femtosecond laser pulses, Appl. Phys. Express, **1** (2008) 082601.
- (17) T. Sano, S. Iwasaki, Y. Ozeki, K. Itoh and A. Hirose: Femtosecond laser direct joining of copper with polyethylene terephthalate, Mat. Trans., **54** (2013) 926.
- (18) H. Huan, L. M. Yang, S. Bai, J. Liu: Femtosecond fiber laser welding of dissimilar metals, Appl. Opt., **53** (2014) 6569.
- (19) M. Duocastella and C. B. Arnold: Bessel and annular beams for materials processing,” Laser Photonics Rev., **6**, (2012) 607.
- (20) Y. Matushiro and W. Watanabe: Femtosecond laser processing of polymethyl methacrylate with an axicon, J. Laser Micro Nanoeng. **11** (2016) 59.
- (21) G. Zhang, and G. Cheng: Direct welding of glass and metal by 1 kHz femtosecond laser pulses, Appl. Opt. **54** (2015) 8957.