

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23246029

研究課題名(和文) 自己集束を利用した光吸収性媒質の超短パルスレーザーによる内部加工と加工現象の解析

研究課題名(英文) INTERNAL PROCESSING OF LIGHT ABSORPTION MEDIUM BY USE OF SELF-FOCUS INDUCED BY ULTRA SHORT PULSE LASER AND ANALYSIS OF PROCESSING PHENOMENA

研究代表者

大村 悦二(OHMURA, ETSUJI)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90144435

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,700,000円、(間接経費) 8,910,000円

研究成果の概要(和文)：透明媒質内を伝播する超短パルスレーザーのビーム径、ビームプロファイルおよび透過率を測定した。一方で、光吸収性カー媒質中の超短パルスレーザーの伝播、自己集束、非線形光吸収の光学解析を行った。実験結果と比較することで、BK7と熔融石英の非線形吸収係数を算出した。さらに、超短パルスレーザーによるガラスの内部加工と重ね溶接の実験を行うとともに、ガラス内部での吸収率を測定して熱伝導解析を行い、加工メカニズムの解明を行った。

研究成果の概要(英文)：The beam diameter, the beam profile and the transmittance of an ultrashort pulse laser propagating in a transparent medium were measured. The optical analysis was performed by considering the beam propagation, the self-focusing and the nonlinear absorption of ultrashort pulse laser in a Kerr medium. Comparing with the experimental results, the nonlinear absorption coefficients of BK7 and fused silica were calculated. Furthermore, the internal processing and the lap welding of glass were conducted with an ultrashort pulse laser. Using the measurement results of the absorption ratio in the inside of glass, heat conduction analysis was carried out, and the processing mechanism was discussed.

研究分野：知的加工、加工数理、レーザー加工

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：超短パルスレーザー 光吸収性媒質 内部加工 溶接 非線形光学 自己集束

1. 研究開始当初の背景

電子デバイスの小型・高密度化に伴って、ガラスやウェハはますます薄化しており、レーザーによるスクライプやダイシングは新たな展開が求められていた。そこで、超短パルスレーザーによる内部加工をスクライプやダイシングに応用することの可能性が考えられた。超短パルスレーザーを透過性媒質に集光照射すると、光強度に依存して屈折率が変化して自己集束する。光吸収性媒質中では、非線形吸収された光エネルギーがパルス終了後に熱に変わり、媒質内部に溶融あるいは局所アブレーション現象が生じる。内部亀裂も生成する。これらの現象を利用して、透過性の誘電体や半導体の内部を改質することで、スクライプやダイシングを行うことの可能性を検討しようとした。実用化に向けては、内部加工における加工メカニズムの解明、加工品質に関わるパラメータの究明と制御について、学術的な立場から検討する必要があった。超短パルスレーザーによる内部加工の基になっている自己集束現象についても、理論的な解析は、大気中のような非線形光吸収をほとんど伴わない場合が扱われており、光吸収性媒質中での自己集束現象を解析した例は見当たらなかった。

2. 研究の目的

研究代表者がすでに導出している光吸収性カー媒質中の近軸波動方程式を用いて、超短パルスレーザー照射による媒質中の光強度と吸収エネルギー、透過率を求め、文献値がほとんどない非線形吸収係数を算出する手法を確立することを第一の目的とした。つぎに、得られた吸収エネルギー分布を初期条件として熱伝導解析を行うとともに、その結果を用いて熱応力解析や亀裂進展解析を行う一連の解析システムを構築することを第二の目的とした。一方で、超短パルスレーザーによる精密微細内部加工を行い、加工メカニズムの解明、加工品質に関わるパラメータの究明と制御について、学術的な立場から検討することを第三の目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、新たに購入した超短パルスレーザー(波長 1028 nm)を用いた。上記研究の目的に従って、以下の研究を行った：(1) 非線形吸収係数の測定・・・本研究で新たに試作したフィラメントビーム測定光学系を用いて、BK7と溶融石英について、プリズムを用いて超短パルスレーザーの透過光のビームプロファイルと光強度を、ビーム伝播距離の関数として測定した。前者のビームプロファイル測定は、非線形光学効果による自己集束現象を観測するために行った。後者は、透過率を求めるために行った。一方で、非線形光学効果と非線形吸収を考慮した光伝播解析結果を測定結果と比較することで、文献値がほとんどない非線形吸収係数の算出を行った。(2)

熱伝導解析、熱応力解析、亀裂進展解析・・・前項(1)で述べた、吸収性カー媒質中の超短パルスレーザーの伝播、自己集束、非線形光吸収の光学解析で得られた吸収エネルギー分布を初期条件として、有限差分法によって熱伝導解析を行った。有限要素法による熱応力解析を行い、その解析結果を用いて、境界要素法による亀裂進展解析を行う一連の解析システムを構築した。(3) 超短パルスレーザーによる内部加工実験と解析・・・新たに購入した超短パルスレーザー精密微細加工装置を用いて内部加工と重ね溶接の実験を行い、断面観察を行うとともに、加工時の透過光強度の測定を行って内部で吸収されるエネルギーを求めた。一方で、繰り返し照射に伴う温度上昇を熱伝導解析によって明らかにして、加工メカニズムの検討を行った。具体的には、焦点面の深さ、パルス幅、材料などが加工領域の形状、吸収エネルギーに及ぼす影響について、実験と解析の両方の観点から調査した。これまで比較的報告の少ないパルス幅の影響については、290 fs ~ 10 ps の範囲で照射実験を行い検討した。

4. 研究成果

(1) 非線形吸収係数の測定・・・プリズムからの透過光のビームプロファイルを測定することで、自己集束現象をまず実験的に確認した。フィラメントの生成する位置(光伝播距離)を求めるとともに、透過光の透過率を測定した。一方で、非線形吸収係数をパラメータとして非線形光学効果と非線形吸収を考慮した光伝播解析を行った。これらの解析結果と測定結果を比較することで、BK7と溶融石英の非線形吸収係数がそれぞれ $5 \times 10^{-17} \mu\text{m}^5/\text{W}^3$ 、 $6 \times 10^{-26} \mu\text{m}^7/\text{W}^4$ 程度であることを明らかにした。本研究によって、本測定手法を用いれば、さまざまな透明媒質の非線形吸収係数の測定が可能であることが示された。(2) 熱伝導解析、熱応力解析、亀裂進展解析・・・前項(1)の光学解析で得られた吸収エネルギー分布を初期条件として、有限差分法によって熱伝導解析を行った。1パルスの場合、最高到達温度分布はパルス終了時と大差はなく、溶融・凝固、屈折率変化などの加工領域はパルス終了時の温度分布でほぼ決まり、熱拡散に伴う熱影響層はほとんど無視できることを明らかにした。有限要素法による熱応力解析、その解析結果を用いた境界要素法による亀裂進展解析は、まずはCWレーザーやパルス幅の長いレーザーを用いたときについて行った。その結果、熱伝導解析から亀裂進展解析までの一連の解析ができるシステムを構築できた。ただ、超短パルスレーザーを用いた場合の具体的な解析は今後の課題として残った。(3) 超短パルスレーザーによる内部加工実験と解析・・・焦点面深さの影響について、焦点面が表面に近いときは、吸収されるエネルギーはほとんど変化しないが、加工領域は広くなる。焦点面が深くなると、深さに

比例して吸収の割合が低下し、加工領域は次第に細長くなる。繰り返し照射に伴う蓄熱効果と材料表面における熱反射を考慮するため、移動瞬間線熱源による半無限体の熱伝導解析を行った。その結果、焦点面が浅い場合に、吸収エネルギーの変化がほとんどないにもかかわらず加工領域が広がる原因は、表面の熱反射によるもの、いわゆる端面効果であることが示された。焦点面が比較的深い場合に加工領域がレーザーの照射方向に対して縦長になるのは、収差の影響が次第に大きくなることに起因することを示した。熱伝導解析から、レーザー光吸収に伴う熱源分布が焦点面深さによって変化することも明らかにした。パルス幅について、加工領域の幅はパルス幅の影響がほとんどないのに対して、加工領域の深さ方向の長さはパルス幅が短くなるほど長くなる。これは、パルス幅が短いほどピーク強度が高く、自己集束が生じやすくなることに起因することを示した。一方で、同一材料および異種材料間の重ね溶接を行った。同一材料による溶接では、内部加工で見られたのと同様な加工痕が確認された。異種材料間の溶接では、溶融領域が混ざり合う現象が確認でき、これは線膨張係数の違いによって生じることを示した。いずれにしても、内部加工において、焦点面が比較的深い場合に加工領域がレーザーの照射方向に対して縦長になることが示されたが、この現象が重ね溶接での接合特性向上につながる事がわかり、超短パルスレーザーによる透明媒質の溶接の有用性が確認できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計10件)

- (1) Takuto Asada, Takayuki Tamaki, Masaya Nakazumi, Etsuji Ohmura, and Kazuyoshi Itoh: Laser-induced structural modifications inside glass using a femtosecond laser and a CO₂ laser, Journal of Laser Micro/Nanoengineering、査読有、Vol. 9 (2014). (掲載予定)
- (2) 八幡恵輔、大村悦二、清水政二、村上政直: ガラスのレーザースクライプにおける適正加工条件の推定と亀裂進展解析, レーザ加工学会誌、査読有、Vol. 21, No. 1 (2014-2) pp.46-53.
- (3) Nobuaki Komatsubara and Etsuji Ohmura: Internal Processing of Glass by Ultrashort Pulse Laser and Analysis of Its Processing Phenomena, Proceedings of the International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21)、査読有、(2013).
- (4) T. Murakami and E. Ohmura: Analysis of internal processing phenomena of glass by repetitive irradiation of ultrashort

pulse laser, On-line Proceedings of the 6th International Congress on Laser Advanced Materials Processing (LAMP2013)、査読無、(2013), #13-031: A220.

(5) Etsuji Ohmura: Analyses of self-focusing phenomenon and temperature rise in light absorption medium by ultrashort pulse laser irradiation, Materials Science and Engineering Technology、査読有、Vol. 44、No. 5 (2013) pp.472-480.

(6) Etsuji Ohmura, Analyses of Self-Focusing Phenomenon and Temperature Rise in Fused Silica by Ultrashort Pulse Laser Irradiation, Procedia CIRP、査読無、Vol. 5, (2013), 7-12.

DOI: 10.1016/j.procir.2013.01.002

(7) 八幡恵輔、大村悦二、清水政二、村上政直: ガラスのレーザースクライプにおける亀裂湾曲メカニズムの解明と亀裂形状の推定 レーザ加工学会誌、査読有、Vol. 20, No. 1 (2013) pp.46-53.

(8) Keisuke Yahata, Etsuji Ohmura, Seiji Shimizu and Masanao Murakami: Boundary Element Analysis of Crack Propagation in Laser Scribing of Glass, Journal of Laser Micro/Nanoengineering、査読有、Vol. 8, No. 1 (2013-1) pp.102-109.

(9) Keisuke Yahata, Etsuji Ohmura, Seiji Shimizu and Masanao Murakami: Suitable Processing Conditions Determined from the Standpoint of Residual Strain in Laser Scribing of Glass, Proceedings of the 31st International Congress on Application of Laser and Electro-Optics (ICALEO2012)、査読無、(2012) pp.1281-1288.

(10) 大村悦二, ステルスダイシングの加工原理, 光アライアンス、査読無、Vol. 23, No. 7, (2012-7), pp.27-31.

[学会発表](計14件)

(1) Isamu Miyamoto, Kazuhiro Maeda, Etsuji Ohmura: Effects of Pulse Duration on NL-Absorption Process in Microwelding of Glass Using USLP, The 15th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM2014)、(2014-6-19)、Vilnius.

(2) Etsuji OHMURA, Principle of the Stealth Dicing【招待講演】、9th International Laser Processing and Systems Conference (LPC 2014)、(2014-3-19)、Shanghai.

(3) Nobuaki Komatsubara and Etsuji OHMURA: Internal Processing of Glass by Ultra short Pulse Laser and Analysis of Its Processing Phenomena、International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21)、(2013-11-7)、松島.

(4) Etsuji Ohmura, Keisuke Yahata, Takahiro Hirano and Seiji Shimizu:

Estimation of Crack Depth in Laser Scribing of Glass by Analyses with FEM and BEM, The 32nd International Congress on Application of Laser and Electro-Optics 2013 (ICALEO 2013)、(2013-10-10)、Miami.

(5) Keisuke Yahata, Seoji Shimizu, Masanao Murakami and Etsuji Ohmura: Quasi-steady crack propagation analysis with few repetition steps in laser scribing of glass, The 6th International Congress on Laser Advanced Materials Processing (LAMP2013)、(2013-7-25)、Niigata.

(6) Tomoaki Murakami and Etsuji Ohmura: Analysis of internal processing phenomena of glass by repetitive irradiation of ultrashort pulse laser、The 6th International Congress on Laser Advanced Materials Processing (LAMP2013)、(2013-7-24)、Niigata.

(7) Takuto Asada, Masaya Nakazumi, Takayuki Tamaki, Etsuji Ohmura and Kazuyoshi Itoh: Laser-induced structural modifications in glass using a femtosecond laser and a CO₂ laser, The 6th International Congress on Laser Advanced Materials Processing (LAMP2013)、(2013-7-23)、Niigata.

(8) Etsuji Ohmura, Kosuke Matsumoto, Tomoaki Murakami: Experimental Verification of Self-focusing Phenomena in Transparent Materials by Ultrashort Pulse Laser and Application to Internal Processing, 7th International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting (ACE-X 2013)、(2013-7-4)、Madrid.

(9) Etsuji Ohmura: Analyses of Self-focusing Phenomenon and Temperature Rise in Light Absorption Medium by Ultrashort Pulse Laser Irradiation【依頼講演】、BIT's 2nd Annual World Congress of Advanced Materials-2013 (WCAM-2013)、(2013-6-5)、Suzhou.

(10) 八幡恵輔・清水政二・村上正直・大村悦二, ガラスのレーザスクライブにおける境界要素法を用いた亀裂進展解析【依頼講演】、第79回レーザ加工学会講演会、(2013-5-7)、吹田.

(11) Etsuji Ohmura, Analyses of Self-Focusing Phenomenon and Temperature Rise in Fused Silica by Ultrashort Pulse Laser Irradiation, The First CIRP Conference on BioManufacturing (CIRP-BioM 2013)、(2013-3-4)、Tokyo.

(12) Keisuke YAHATA, Etsuji OHMURA, Seiji SHIMIZU and Masanao MURAKAMI: Suitable Processing Conditions Determined from the Standpoint of Residual Strain in Laser Scribing of Glass, The 31st International Congress on Application of Laser and

Electro-Optics 2012 (ICALEO 2012)、(2012-9-25)、Anaheim.

(13) Etsuji Ohmura: Analyses of Self-Focusing Phenomenon and Temperature Rise in Light Absorption Medium By Ultrashort Pulse Laser Irradiation, 6th International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting (ACE-X 2012)、(2012-7-2)、Istanbul.

(14) Keisuke Yahata, Etsuji Ohmura, Seiji Shimizu and Masanao Murakami: Boundary Element Analysis of Crack Propagation in Laser Scribing of Glass、The 13th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM2012)、(2012-6-13)、Washington DC.

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者
大村 悦二(OHMURA ETSUJI)
大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：90144435

(2) 研究分担者
()

研究者番号：

(3) 連携研究者
()

研究者番号：