

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18667

研究課題名（和文）過渡的透明化によるセラミックスの超高速精密フェムト秒レーザー加工

研究課題名（英文）Ultrafast and precision femtosecond laser processing of ceramics by transiently increasing transparency

研究代表者

伊藤 佑介（Ito, Yusuke）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・講師

研究者番号：90843227

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：セラミックス材料は、優れた機械的、電気的、熱的特性を有することから、電子機器、光学機器等の主要部品として活用されている。これらの機器の更なる高機能化、低価格化のためには、セラミックス材料の微細加工を高効率かつ精密に施す技術の確立が要求されるが、その硬脆性故にセラミックス材料の加工は困難を極める。また、散乱体であるため、材料内部の現象観察も困難である。本研究では、セラミックスにフェムト秒レーザーを照射した際の、励起過程の高速観察手法を確立した。そして、その励起領域を長パルスレーザーで加熱することにより、セラミックスの超高速精密加工を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ジルコニア等のセラミックス材料をミクロに見ると、バンドギャップが広く、透過性が高い。一方で、マクロに見ると、低い透過性を示す。結晶粒界における光散乱がこの要因と考えられる。本研究では、プローブ光を集光し、その散乱光を捉えることで、セラミックス内部の高速現象の可視化を実現した。ピコ秒スケールの内部現象を撮影可能としたことは、学術的に意義がある。さらに、セラミックスの物性を過渡的に変化させることにより、超高速加工を実現した。物性制御という物理分野の研究の、生産工学分野への応用を実現したという点にも学術的意義がある。また、加工の効率化によるエネルギー消費抑制という社会的意義を有している。

研究成果の概要（英文）：Ceramic materials are utilized as key components in electronic devices, optical instruments, and other applications due to their excellent mechanical, electrical, and thermal properties. To achieve further enhancements in functionality and cost reduction of these devices, it is essential to establish techniques for highly efficient and precise micromachining of ceramic materials. However, due to their hardness and brittleness, machining ceramics is extremely challenging. Additionally, as they are scattering materials, observing phenomena inside of the material is also difficult. In this study, we established a high-speed observation method for the excitation process when a femtosecond laser pulse is irradiated onto ceramics. Furthermore, by heating the excited region with a long-pulse laser, we achieved ultra-high-speed precision machining of ceramics.

研究分野：レーザー加工

キーワード：過渡選択的レーザー加工法 TSL加工法 ジルコニアセラミックス フェムト秒レーザー 超高速加工 励起

1. 研究開始当初の背景

アルミナ、炭化ケイ素、ジルコニアといったセラミクス材料は、優れた機械的、電気的、熱的特性を有することから、医療機器、電子機器、光学機器の主要部品として活用されている。これらの機器の更なる高機能化、低価格化のためには、セラミクス材料の微細加工を高効率かつ精密に施す技術の確立が要求されるが、その優れた機械特性(硬脆性)故に、セラミクス材料の加工は困難を極める。こうした硬脆材料に対する微細加工技術としてフェムト秒レーザーが注目されている。フェムト秒レーザーは高い光強度を有し、そのエネルギーを微小領域に届けることができることから、硬脆材料の微細加工のための強力なツールになり得る。しかしながら、フェムト秒レーザー加工時には、クラックが生成され精密加工が阻害されるという課題と、エネルギー変換効率の低さ故に加工速度が著しく低いという課題が存在する。このため、実用的応用先は金属等の延性材料に限定され、硬脆材料への適用には障壁があった。その背景のもと、申請者は2018年に、ガラスやサファイア等の透明硬脆材料を対象に、上記の2点の課題を同時に解決する「過渡選択的レーザー加工法」を提案・実証した(Y. Ito, et al., *Applied Physics Letters* 113(6), 061101 (2018).)。この技術によって、透明硬脆材料の微細加工が従来比5000倍の超高速で、なおかつクラックの全く存在しない超精密で実現した(図1)。しかしながら、本技術の適用対象は透明材料に限定されることから、不透明であるセラミクス材料に対する超高速精密微細加工の実現が要求される。

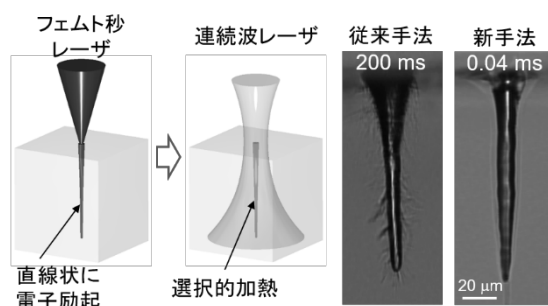


図1: 透明硬脆材料のレーザー加工を従来比5000倍の超高速で実現。

2. 研究の目的

本研究では、まず、不透明であるセラミクス内部の現象を可視化するシステムを開発する。そして、フェムト秒レーザー照射により、セラミクス内部に励起領域を生成し、その様子を可視化システムにより超高速(ピコ秒スケール)で観察する。これらに基づき、励起領域に対し、連続波レーザーを吸収させることで、セラミクス材料への「過渡選択的レーザー加工法」の適用可能性を示し、セラミクス材料の超高速精密微細加工を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) セラミクス内部の超高速現象可視化

厚さ0.4 mmのジルコニアセラミクス試料に対し、フェムト秒レーザーを集光した際に材料内部で生じる高速現象を、ポンプ・プローブ法により撮像する。このとき、プローブ光を試料に対し集光する。ジルコニアセラミクスは、粒界による散乱が顕著であることから、集光されたプローブ光が試料内部で散乱される。散乱されたプローブ光が、ポンプ光によって変

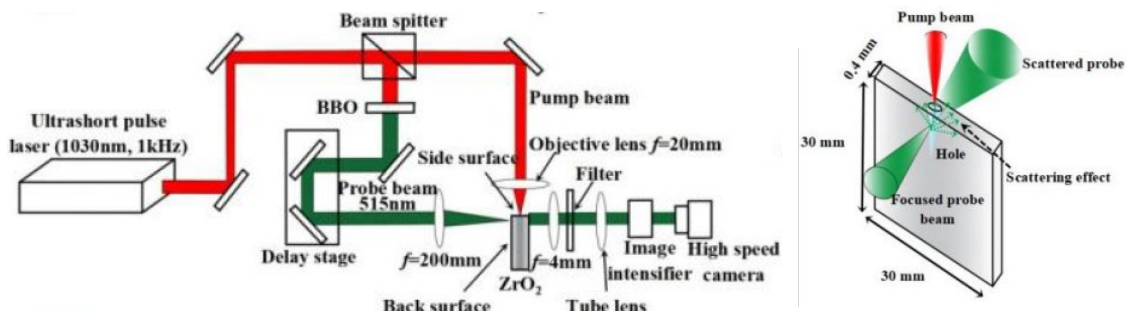


図2: 時間分解撮像法において、プローブ光をセラミクス内部に集光することで、散乱光を捉える。

化を及ぼされた領域を通過し、試料を通り抜ける。それを対物レンズで集め、結像レンズでセンサに集光することで、セラミックスの内部現象を撮像する（図 2）。ポンプ光とプローブ光の時間差を、遅延ステージを用いて調整することにより、内部の高速現象をピコ秒スケールで撮像する。

(2) セラミックスへの過渡選択的レーザー加工

フェムト秒レーザー照射により、セラミックス内部に励起領域を生成する。その生成過程を可視化した上で、励起領域に対し、高出力の連続波レーザーを吸収させる。励起領域を加熱・蒸発させることにより、セラミックスの超高速に加工する。

4. 研究成果

(1) セラミックス内部の超高速可視化の実現

図 3 に、ジルコニアセラミックス表面にポンプ光を照射した後、1 ps から 1.5 ns の時間スケールで生じる現象を示す。電子の励起している領域が黒い影として観察されている。通常、光透過性の低いセラミックスであるが、プローブ光を集光し、光強度を高めた上で散乱光を集めることで、内部の可視化が実現した。この結果から、材料表面だけでなく、内部にまで励起領域が分布していることが分かる。

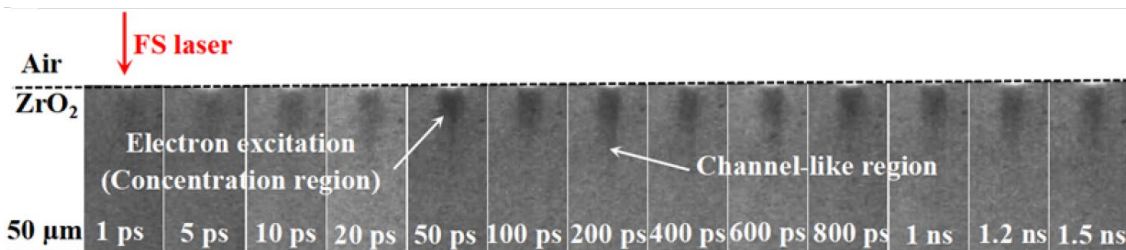


図 3: 集束プローブ光により、ジルコニアセラミックス内部の励起過程をピコ秒スケールで撮像。

(2) セラミックスへの過渡選択的レーザー加工の実現

さらに、フェムト秒レーザーの集光条件を適切に定め、励起形状を安定させた上で、高出力連続波レーザーを集光した際の現象を図 4 に示す。図中、右端の画像は、加工開始から 13.5 μs 後の結果を示す。撮影用光源には、同様に短パルスレーザーを用いており、これを試料に集光することにより可視化をしている。まず、材料表面付近から加工が開始し、表面からの材料除去とプラズマ発光を伴いながら、材料深部まで加工が進行している。なお、フェムト秒レーザーあるいは連続波レーザーのどちらか一方しか照射しない場合は、加工が起こらないことが確認できた。以上の結果より、本研究により、不透明材料であるセラミックスに対して、過渡選択的レーザー加工が実現したといえる。

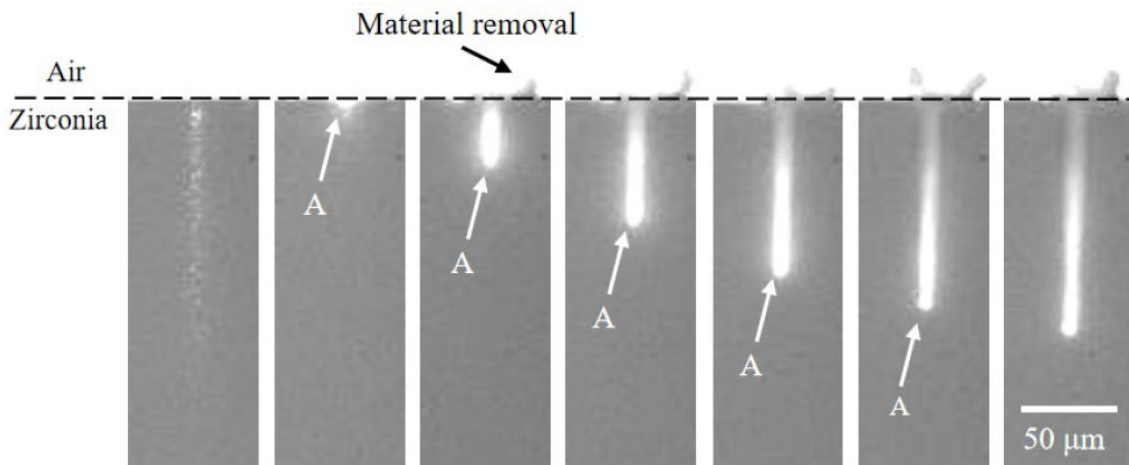


図 4: ジルコニアセラミックスへの過渡選択的レーザー加工の実現。レーザー照射開始から 13.5 μs 経過までの加工過程を撮像。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Zhang Yanming, Ito Yusuke, Sun Huijie, Sugita Naohiko	4. 巻 30
2. 論文標題 Investigation of multi-timescale processing phenomena in femtosecond laser drilling of zirconia ceramics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 37394 ~ 37394
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.474090	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yoshizaki Reina, Ito Yusuke, Ogasawara Kazuma, Shibata Akihiro, Nagasawa Ikuo, Sano Tomokazu, Nagato Keisuke, Sugita Naohiko	4. 巻 154
2. 論文標題 High-efficiency microdrilling of glass by parallel transient and selective laser processing with spatial light modulator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics & Laser Technology	6. 最初と最後の頁 108306 ~ 108306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optlastec.2022.108306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sun Huijie, Ito Yusuke, Ren Guoqi, Hattori Junya, Nagato Keisuke, Sugita Naohiko	4. 巻 128
2. 論文標題 Observation of damage generation induced by electron excitation and stress wave propagation during ultrashort pulse laser drilling of sapphire	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics A	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00339-022-05686-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshitake Shunya, Ito Yusuke, Miyamoto Naoyuki, Yoshizaki Reina, Sugita Naohiko	4. 巻 -
2. 論文標題 Ultrafast and large-gap microwelding of glass substrates by selective absorption of continuous-wave laser into transiently excited electrons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 CIRP Annals	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cirp.2022.03.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ren Guoqi, Ito Yusuke, Sun Huijie, Sugita Naohiko	4. 巻 30
2. 論文標題 Temporal-spatial characteristics of filament induced by a femtosecond laser pulse in transparent dielectrics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 4954 ~ 4964
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.449874	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hattori Junya, Ito Yusuke, Nagato Keisuke, Sugita Naohiko	4. 巻 72
2. 論文標題 Investigation of damage generation process by stress waves during femtosecond laser drilling of SiC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 789 ~ 797
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precisioneng.2021.08.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhang Yanming, Ito Yusuke, Yoshizaki Reina, Shibata Akihiro, Nagasawa Ikuo, Nagato Keisuke, Sugita Naohiko	4. 巻 31
2. 論文標題 Mechanism and performance evaluation of transient and selective laser processing of glass based on optical monitoring	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 38191 ~ 38191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.497360	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wei Chaoran, Zhang Yanming, Sugita Naohiko, Ito Yusuke	4. 巻 130
2. 論文標題 Generation mechanism and temporal/spatial evolution of electron excitation induced by an ultrashort pulse laser in zirconia ceramic	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Applied Physics A	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00339-023-07223-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Zhang Yanming、Wei Chaoran、Fukui Tomohiro、Sugita Naohiko、Ito Yusuke	4. 巻 -
2. 論文標題 Ultrafast processing of zirconia ceramics by transient and selective laser absorption	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Ceramics International	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ceramint.2024.04.257	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計40件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 23件)

1. 発表者名 伊藤佑介, 任国旗
2. 発表標題 励起領域への選択的吸収による透明材料の超高速レーザー加工
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yusuke Ito
2. 発表標題 Ultrafast processing of transparent materials by selective absorption of long-pulse laser into transiently excited electrons
3. 学会等名 International workshop on laser material processing and applications (LMPA) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusuke Ito
2. 発表標題 Ultrafast processing of dielectric materials by selective absorption of continuous-wave laser into transiently excited electrons
3. 学会等名 PULMM (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusuke Ito, Naohiko Sugita
2. 発表標題 Ultrafast processing of transparent materials by selective absorption of continuous-wave laser into transiently excited electrons
3. 学会等名 Q-Basis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Guoqi Ren, Yusuke Ito, Reina Yoshizaki, Huijie Sun, Junya Hattori, Naohiko Sugita
2. 発表標題 Ultrafast dynamics of the interaction between double-pulse femtosecond laser and silica glass
3. 学会等名 JSAP-Optica Joint Symposia (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Huijie Sun, Junya Hattori, Tomohiro Fukui, Naohiko Sugita, and Yusuke Ito
2. 発表標題 Measurement of intense stress wave generated by femtosecond laser double pulses in fused silica
3. 学会等名 12th International Conference on Photo-Excited Processes and Applications (ICPEPA) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Junya Hattori, Yusuke Ito, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 Crackless femtosecond laser percussion drilling of SiC by suppressing shock wave magnitude
3. 学会等名 72nd CIRP General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kotaro Hinuma, Yanming Zhang, Yusuke Ito, Naohiko Sugita
2. 発表標題 Real-time optical monitoring and evaluation of glass through hole drilled by transient and selective laser processing
3. 学会等名 The 24th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yanming Zhang, Chaoran Wei, Yusuke Ito, Naohiko Sugita
2. 発表標題 Ultrafast and precision micro-drilling of zirconia ceramics by transient and selective laser processing
3. 学会等名 The 24th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takumi Koike, Yusuke Ito, Guoqi Ren, Naohiko Sugita
2. 発表標題 Study on the propagation behaviour of ultrashort pulses inside synthetic silica glass
3. 学会等名 The 24th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sabrina Crepaldi, Yusuke Ito, Junya Hattori, Hiroshi Jo, Guoqi Ren, Naohiko Sugita
2. 発表標題 Time-resolved stress measurement by photoelastic imaging incorporated with Mach-Zehnder interferometry
3. 学会等名 The 24th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Qinru Zheng, Yusuke Ito, Junya Hattori, Yuta Teshima, Guoqi Ren, Huijie Sun, A. Amani Eilanlou, Atsushi Iwasaki, Naohiko Sugita
2. 発表標題 Time-resolved quantitative imaging of electronic excitation processes in glass under femtosecond laser irradiation
3. 学会等名 The 24th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 服部隼也, 徳味健太, 杉田直彦, 伊藤佑介
2. 発表標題 石英ガラス内の超短パルスレーザー誘起応力波の3次元応力テンソル場計測
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 服部隼也, 長谷川亮太, 杉田直彦, 伊藤佑介
2. 発表標題 パルスエネルギー変調フェムト秒レーザー加工法による石英ガラスへのクラックフリー微細穴あけ加工
3. 学会等名 2024年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Guoqi Ren, Huijie Sun, Naohiko Sugita, and Yusuke Ito
2. 発表標題 Plasma filament induced by a femtosecond laser pulse in transparent dielectrics
3. 学会等名 第100回レーザー加工学会講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小池匠, 伊藤佑介, 任国旗, 杉田直彦
2. 発表標題 熱影響を考慮した超短パルスレーザー・誘電体間の相互作用に関する研究
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 服部隼也, 伊藤佑介, 徳味健太, 杉田直彦
2. 発表標題 時間分解偏光マッハ・ツェンダー干渉計による超短パルスレーザー誘起応力波の空間プロファイル計測
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 魏超然, 北村章吾, 服部隼也, 孫慧傑, 杉田直彦, 伊藤佑介
2. 発表標題 超短パルスレーザー照射時の材料表面変位の高速ナノスケール計測
3. 学会等名 2023年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takumi Koike, Yusuke Ito, Reina Yoshizaki, Guoqi Ren, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 Pulse duration dependence of spatiotemporal evolution of plasma channel produced by an ultrashort laser pulse
3. 学会等名 ICPE 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yanming Zhang, Yusuke Ito, Huijie Sun, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 Investigation of the processing phenomena in femtosecond laser drilling zirconia ceramic
3. 学会等名 ICPE 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Guoqi Ren, Yusuke Ito, Huijie Sun, Takumi Koike, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 Investigation of femtosecond laser induced plasma filament in transparent dielectrics
3. 学会等名 ICPE 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yanming Zhang, Yusuke Ito, Huijie Sun, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 Multiple time-scales observation of femtosecond laser drilling of zirconia ceramics
3. 学会等名 JSAP-Optica Joint Symposia (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Koike, Yusuke Ito, Reina Yoshizaki, Guoqi Ren, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 Pulse width dependence of spatiotemporal electron excitation in fused silica by ultrashort laser pulse
3. 学会等名 COLA (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小池匠, 伊藤佑介, 任国旗, 吉崎れいな, 杉田直彦
2. 発表標題 合成石英内部での励起領域形成過程のパルス幅依存性評価
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小池匠, 伊藤佑介, 吉崎れいな, 任国旗, 杉田直彦
2. 発表標題 合成石英内部におけるプラズマチャネル形成過程のパルス幅依存性評価
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Guoqi Ren, Yusuke Ito, Huijie Sun, Takumi Koike, Naohiko Sugita
2. 発表標題 Characteristics of femtosecond laser induced plasma filament in silica glass
3. 学会等名 2022年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuke Ito, Reina Yoshizaki, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 Ultrafast processing of glass by selective absorption of continuous-wave laser into transiently excited electrons
3. 学会等名 OPIC SLPC (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yanming Zhang, Huijie Sun, Yusuke Ito, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 Multi-timescale observation of femtosecond laser drilling of zirconia ceramics
3. 学会等名 COLA 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Koike, Yusuke Ito, Reina Yoshizaki, Guoqi Ren, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 Pulse width dependence of spatiotemporal electron excitation in fused silica by ultrashort laser pulse
3. 学会等名 COLA 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Huijie Sun, Yusuke Ito, Guoqi Ren, Junya Hattori, Hiroshi Jo, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 Investigation of ultrashort pulse laser drilling of dielectric materials by combining time-resolved imaging and high-speed camera
3. 学会等名 SPIE LASE (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Guoqi Ren, Yusuke Ito, Huijie Sun, Takumi Koike, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 Temporal-spatial evolution of filament induced by femtosecond laser pulse in transparent dielectrics
3. 学会等名 SPIE LASE (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Jo, Yusuke Ito, Junya Hattori, Keisuke Nagato, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 High-speed observation of stress wave propagation and damage generation during ultrashort pulse laser drilling of sapphire
3. 学会等名 The 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chaoran Wei, Reina Yoshizaki, Yusuke Ito, Akihiro Shibata, Ikuo Nagasawa, Keisuke Nagato, and Naohiko Sugita
2. 発表標題 High-speed processing of glass by sweeping high-temperature region formed by femtosecond and continuous wave lasers
3. 学会等名 The 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 任国旗, 伊藤佑介, 服部隼也, 孫慧傑, 杉田直彦
2. 発表標題 Quantitative estimation of plasma density in filament induced by a femtosecond laser pulse
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Huijie Sun, Yusuke Ito, Guoqi Ren, Junya Hattori, Naohiko Sugita
2. 発表標題 Investigation of ultrashort pulse laser drilling of sapphire by combining time-resolved imaging and high-speed camera
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小池匠, 伊藤佑介, 吉崎れいな, 任国旗, 杉田直彦
2. 発表標題 超短パルスレーザによって形成されるプラズマチャネル時空間分布のパルス幅依存性
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 徐弘, 伊藤佑介, 服部隼也, 長藤圭介, 杉田直彦
2. 発表標題 超短パルスレーザによるサファイア加工の超広時間スケール観察
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉武俊哉, 伊藤佑介, 吉崎れいな, 服部隼也, 長藤圭介, 杉田直彦
2. 発表標題 電子励起領域へのレーザ吸収を用いたガラスの微細高速接合における密度分布変化の解析
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 魏超然, 吉崎れいな, 伊藤佑介, 柴田章広, 長澤郁夫, 長藤圭介, 杉田直彦
2. 発表標題 精密過渡選択的レーザ吸収と高温領域の掃引によるガラスの微細高速溝加工法
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 服部隼也, 伊藤佑介, 杉田直彦
2. 発表標題 ガラスのフェムト秒レーザ加工中の超高速圧力分布計測
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------