

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：63903

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02030

研究課題名(和文) マイクロ固体フォトンクスによる次世代レーザー点火・燃焼計測

研究課題名(英文) Next generation of laser ignition and measurement by using micro solid-state photonics

研究代表者

平等 拓範 (TAIRA, TAKUNORI)

分子科学研究所・メゾスコピック計測研究センター・准教授

研究者番号：50216595

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 25,000,000円

研究成果の概要(和文)：瞬間的な点火条件の把握および燃焼制御の指針を得ることを目的とし、空間的なレーザー誘起ブレイクダウンスペクトロスコピー法(LIBS)の開発に取り組んだ。サブナノ秒の発光時間(660 ps)を持つジャイアントパルス・マイクロチップレーザー(GP-MCL, 波長1064nm)を用いて形成された、レーザー誘起プラズマを対向配置された二台の超高速カメラを用いて異なる波長で撮影することにより、サブナノ秒のレーザー誘起プラズマが成長する過程の観察に成功した。また、燃焼機器に取り付けるためのディテクター一体型のレーザープラグを用いて空気中のLIBS試験を行い、窒素や酸素のスペクトルを計測できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：The sub-ns giant-pulse microchip laser (GP-MCL) based laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) has been developed. Besides, the laser induced plasma formation process has been observed with the high speed camera under the sub-ns time resolution. Finally, the important combustion information of N₂ and O₂ spectrum to improve combustion quality has been observed with the GP-MCL and camera combined system.

研究分野：工学

キーワード：量子エレクトロニクス エネルギー効率化 レーザー点火 燃焼計測 高性能レーザー

1. 研究開始当初の背景

レーザー誘起ブレイクダウンによるエンジン(内燃機関)点火は、150年続く電気火花点火を凌駕する強力点火が可能で、低燃費、二酸化炭素・NOxなどの低排出に重要な高圧縮、高過給、希薄燃焼での効率的な燃焼が望めるため、次世代の革新的省エネ技術として期待されている。一方で、エンジン動作状態を最適化するためにレーザー誘起ブレイクダウン分光法(Laser Induced Breakdown Spectroscopy; LIBS)が適用され、多くの成果が上がっているが、これを実際の走行に即する車両搭載には成功していない。本提案では、世界で始めてレーザー点火の車載を可能とした最先端技術「マイクロ固体フォトンクス」を駆使し、LIBSをレーザープラグに装着することを目指す。これにより革新的な燃焼状態が一般に望めるようになるもので、高い社会貢献が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、新たなレーザー点火方式の提案として、多点の点火時期を独立させ、多時刻多重点火による燃焼反応の制御が望める新たなエンジン点火方式の学術的基盤構築と有用性の実証を目指す。ここでは、多時刻多重点火を可能とするアレイ型ジャイアントパルスマイクロチップレーザーの開発に準じ、マイクロチップレーザーによるLIBS法の開発も行い、さらにはCO₂など燃焼ガス分析可能な広帯域中赤外光発生非線形光学システムを開発するなどして、次世代レーザー点火方式の探索とモデル化など体系化に寄与する事を図る。

3. 研究の方法

(1) ジャイアントマイクロフォトンクスの高度化

レーザー点火の利点である多点点火を実現するには1つのマイクロチップから複数のビームを取り出す必要があり、面内に複数のレーザーを形成するアレイ型のジャイアントパルス・マイクロチップレーザーが求められる。本研究ではアレイ化を可能とすべく励起増大に伴い深刻化する熱問題を低減できる新たなレーザー構成を検討する。また、このアレイ化と併せ燃焼計測のためのLIBSを点火装置に内蔵し、さらにその最適化する事を検討する。加えて燃焼状態のダイナミクスを詳細に知るためのジャイアントパルスに適した多機能非線形光学素子として、大口径擬似位相整合(QPM)素子を用いて広帯域中赤外光発生システムを開発、構築する。

(2) 燃焼計測システムの開発

レーザー誘起ブレイクダウンを用いた点火(以下、レーザー点火)を実用燃焼器への適用、特に難燃性の燃料や混合気に希釈ガス成分が含まれる状況において確実に点火を実現するためには、複数のパルスによる多時

刻点火および局所の燃料・空気比に応じた点火制御が必要となる。このことから、(1)において開発したアレイ型ジャイアントパルスレーザーの開発およびLIBS用ジャイアントパルスレーザーを用いて、燃焼計測技術の開発を行う必要がある。本研究では、上記目的を達成するために、任意の燃料・空気比および流れ場を構築することが可能な模擬的レーザー点火試験装置の構築、レーザー点火の際に点火源として利用するレーザー誘起ブレイクダウンプラズマからの発光を用いたレーザー誘起ブレイクダウン分光計測(LIBS)による燃焼診断法に加えて、赤外光を用いた未燃混合気あるいは既燃ガス中に含まれる水蒸気量の計測診断法の構築を行う。

(3) 多時刻多重レーザー点火を用いた高効率燃焼の体系化

ジャイアントパルスレーザーおよび計測手法の有用性を効果的に示すためには、局所あるいは包括的な燃料・空気比を自在に変化させることが可能であり、燃焼現象を詳細に計測することが可能な燃焼器による燃焼実験が必要となる。また、時間的、空間的に自由度が高い多時刻多重レーザー点火を用いて、ジャイアントパルスレーザーを用いた超希薄燃焼や高効率燃焼を行うための鍵となる物理的な要因、およびプラズマから火炎核へと遷移する化学反応を明らかにする。

4. 研究成果

レーザー点火には、点火源となるプラズマの形成が重要となることから、ピコ秒のパルス幅(レーザーパルスの発振時間)を持つレーザーの照射によって形成されるプラズマ(ブレイクダウン)の時間的・空間的な推移を理解することを目的として、超高速カメラ(1秒間に2億フレーム, Exposure 5 ns)を用いて観察した。その結果、ピコ秒のパルス幅を持つレーザーが形成するプラズマの持続時間は、初期圧力に影響を受け、長くとも数100 ns 発光を維持することが明らかとなった。また、瞬間的な点火条件の把握および燃焼制御の指針を得ることを目的として、空間的なLIBSの開発に取り組んだ。サブナノ秒の発光時間(660 ps)を持つマイクロチップレーザー(波長1064nm)を用いて形成された、レーザー誘起プラズマを対向配置された二台の超高速カメラ(1秒間に2億フレーム, Exposure 5 ns)を用いて異なる波長で撮影することにより、サブナノ秒のレーザー誘起プラズマが、ビームウェスト近傍の点から発生し、10 ns程度で最大の大きさにまで成長する過程の観察に成功した。また、燃焼機器に取り付けるためのディテクター体型のレーザープラグを用いて空気中のLIBS試験を行い、窒素や酸素のスペクトルを計測できることを確認した。課題として、LIBS計測のS/Nを向上させるために、マイク

ロチップレーザーの励起光源の透過光を低減する必要があることを見出した。なお、上記 LIBS 用のレーザープラグは、分子研からの技術移転を受けてリコーが開発したジャイアントパルス・マイクロチップレーザー (GP-MCL) である。

一方、燃焼ガス分光評価に適する中赤外光発生光源として、GP-MCL をマイクロチップベースでアンプするマイクロ MOPA 励起の光パラメトリック発生 (OPG) を周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN) を用いて実施した。その結果、OPG に光注入同期を行い、分光に適する広帯域波長可変特性を損なわずに狭線幅化できる事を検証した。さらに、可視域や紫外域での LIBS も有用とのことから水晶を用いた可視・紫外域での波長変換法についても検討を行い、数 kW だった波長 532nm の第二高調波出力を最終的には数 100kW にまで高出力化するなど世界記録の更新に至る良好な結果を得た。

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) V. Yahia and T. Taira, "High brightness energetic pulses delivered by compact microchip-MOPA system," *Opt. Express*, vol. 26, no. 7, pp. 8609-8618 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.008609 査読有
- 2) H. Ishizuki, V. Yahia, and T. Taira, "Characteristics of crystal quartz for high-intensity, sub-nanosecond wavelength conversion," *Opt. Mat. Express*, vol. 8, no. 5, pp. 1259-1264 (2018). DOI: 10.1364/OME.8.001259 査読有
- 3) 平等拓範, 「革新的レーザー点火システムの開発」, 日本燃焼学会誌 第 59 巻 189 号, pp. 157-163 (2017). 査読有
- 4) 軸谷直人, 泉谷一磨, 沼田雅之, 大倉佑介, 原田慎一, 新井伸幸, 池田圭介, 佐々木譲, 萩田健太郎, 池應敏行, 常包正樹, 平等拓範, 鈴木剛, 「レーザー点火向け高出力 VCSEL モジュール」, 日本燃焼学会誌 第 59 巻 189 号, pp. 164-171 (2017). 査読有
- 5) H. Ishizuki and T. Taira, "Quasi phase-matched quartz for intense-laser pumped wavelength conversion," *Opt. Express*, vol. 25, no. 3, pp. 2369-2376 (2017). DOI:10.1364/OE.25.002369 査読有
- 6) H. H. Lim and T. Taira, "Sub-nanosecond

laser induced air-breakdown with giant-pulse duration tuned Nd:YAG ceramic micro-laser by cavity-length control," *Opt. Express*, vol. 25, no. 6, pp. 6302-6310 (2017). DOI:10.1364/OE.25.006302 査読有

- 7) J. Hayashi, N. Nakatsuka, I. Morimoto and F. Akamatsu, "Time evolution of the high temperature region formed by laser induced breakdown and of the development of the flame kernel in the constant volume combustion vessel", *Proc. SPIE 10328*, Selected Papers from the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, 1032813 (2017). DOI:10.1117/12.2268728. 査読有
- 8) 平等拓範, "レーザ点火技術の最新動向～自動車エンジンからコージェネレーションガスエンジンまで," *電気学会誌*, vol. 136, no. 5, pp. 296-300 (2016). 査読有
- 9) 平等拓範, "マイクロドメイン制御によるハイパワーレーザー材料," *応用物理*, vol. 85, no. 10, pp. 863-869 (2016). 査読無
- 10) H. Ishizuki and T. Taira, "High-gain mid-infrared optical-parametric generation pumped by microchip laser," *Opt. Express*, vol. 24, no. 2, pp. 1046-1052 (2016). DOI:10.1364/OE.24.001046 査読有

[学会発表](計 54 件)

- 1) T. Taira, "Micro domain and boundary control for ubiquitous power laser," *Ceramic and Crystal Materials for Optics and Photonics, Materials Science & Technology 2018 (MS&T18)*, USA (2018). (*Invited*)
- 2) H. Ishizuki, and T. Taira, "Efficient optical parametric generation pumped by a sub-nanosecond MOPA source," *Mid-Infrared Coherent Sources (MICS), OSA High-brightness Sources and Light-driven Interactions Congress 2018*, France (2018).
- 3) 平等拓範, "自動車へのレーザー応用最前線 -エンジン点火から LiDAR、ヘッドライトまで-, "レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会, 京都市勧業館みやこめっせ, 京都 (2018). (*Invited*)
- 4) 平等拓範, "次世代ハイパワーレーザー開発 2 - ジャイアントマイクロフォトリクスによるユビキタス・パワーレーザー-", レーザーエンジン点火向けマ

- イクロチップレーザー励起用高出力VCSELモジュール," レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会, 京都市勧業館みやこめッセ, 京都 (2018). (*Invited*)
- 5) T. Taira, "Quantum design of micro-domains for giant pulse lasers," 13th Laser Ceramics Symposium (LCS2017), (2017.12). (*Invited*)
 - 6) 平等拓範, 「カーフォトニクスの未来 ~ エンジン点火, LIDAR からレーザー加工まで」, 光とレーザーの科学技術フェア 2017 「レーザー科学技術フェア」, (株)オプトロニクス社, 科学技術館, 東京, (2017). (*Invited*)
 - 7) 平等拓範, 「マイクロチップレーザー」, 第 88 回レーザー加工学会講演会, レーザ加工学会, 大阪大学, 大阪 (2017). (*Invited*)
 - 8) Y. Sato and T. Taira, "Study of saturable absorption in Cr⁴⁺:YAG ceramics for the efficient Q-switched laser action," OSA Topical Meeting on Advanced Solid-State Lasers (ASSL), Nagoya (2017).
 - 9) H. Lim and T. Taira, "Giant-pulse width tunable Nd:YAG ceramic microchip laser and amplifier for smart ignition," OSA Topical Meeting on Advanced Solid-State Lasers (ASSL), Nagoya (2017).
 - 10) V. Yahia, L. Zheng, and T. Taira, ">200 mJ high-brightness sub-ns micro-laser-based compact MOPA," OSA Topical Meeting on Advanced Solid-State Lasers (ASSL), Nagoya (2017).
 - 11) L. Zheng and T. Taira, "High damage-resistant coating solution for high-field ceramics laser," OSA Topical Meeting on Advanced Solid-State Lasers (ASSL), Nagoya (2017).
 - 12) H. Ishizuki and T. Taira, "Laser damage threshold evaluation of nonlinear crystal quartz for sub-nanosecond pulse irradiation," OSA Topical Meeting on Advanced Solid-State Lasers (ASSL), Nagoya (2017).
 - 13) T. Taira, "Ubiquitous Power Lasers from Giant Micro-Photonics," International Conference on Laser Ablation (COLA 2017), France (2017). (*Invited*)
 - 14) H. Ishizuki and T. Taira, "Damage threshold evaluation by bulk-shaped nonlinear and laser materials," The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24), (2017.08).
 - 15) T. Taira, "Giant micro-photonics for integrated power laser," 5th IAPLE Annual Conference (IAPLE 2017), KOS, Greece (2017). (*Plenary Keynote*)
 - 16) J. Hayashi, N. Nakatsuka, I. Morimoto and F. Akamatsu, "Requirement time and space for laser ignition under fuel lean premixed mixture", 5th Laser Ignition Conference, Bucharest (2017). (*Invited Talk*)
 - 17) T. Ikeo, K. Hagita, Y. Ishikawa, Y. Higashi, N. Jikutani, T. Taira, and T. Suzudo, "Improvement the optical-to-optical conversion efficiency of passively Q-switched micro-laser pumped by VCSEL module," The 5th Laser Ignition Conference (LIC'17), Bucharest (2017).
 - 18) H. Lim and T. Taira, "Pulse-width scaling law of air-breakdown for laser ignition application," The 5th Laser Ignition Conference (LIC'17), Bucharest (2017).
 - 19) 平等拓範, 「LD励起パワーレーザー」, 光・量子ビーム科学合同シンポジウム 2017, 大阪大学, 大阪 (2017). (*Invited*)
 - 20) R. Bhandari, N. Ishigaki, S. Uno, T. Hiroki, J. Saikawa, K. Tojo, and T. Taira, "Novel end-pumping method for stable and compact microchip laser," CLEO/Europe-EQEC 2017, Munich (2017).
 - 21) H. Lim and T. Taira, "Pulse-width and pulse-energy dependence of sub-nanosecond laser Induced air-breakdown," CLEO/Europe-EQEC 2017, Munich (2017).
 - 22) 平等拓範, "ジャイアントマイクロフォトニクスによるコビキタス・パワーレーザー", 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 応用物理学会, パシフィコ横浜, 横浜 (2017). (*Invited*)
 - 23) T. Taira, "Domain control toward MW to sub-GW giant-pulse micro-lasers," 12th Laser Ceramics Symposium (LCS2016), Saint-Louis, France (2016). (*Invited*)
 - 24) T. Taira, "GW-class giant-pulse micro-lasers by using domain control," CerSJ-GOMD Joint Symposium on

- Glass Science and Technologies, Kyoto University, Kyoto (2016). (*Invited*)
- 25) H. Lim and T. Taira, "Continuously pulse width tunable Nd:YAG ceramic micro giant-pulse laser for laser induced breakdown," OSA Topical Meeting on Advanced Solid-State Lasers (ASSL), Boston, Massachusetts, USA (2016).
- 26) J. Yue, T. Tamada, M. Kamata, L. Zheng, H. Ishizuki, and T. Taira, ">2 MW peak power at 1560 nm from micro giant-pulse laser/amplifier with PPMgLN OPG," OSA Topical Meeting on Advanced Solid-State Lasers (ASSL), Boston, Massachusetts, USA (2016).
- 27) T. Taira, "Giant micro-photonics for engine ignition and sensing," International Conference "Global/Local Innovations for Next Generation Automobiles 2016," Sendai International Center, Sendai, Japan, (2016). (*Invited*)
- 28) T. Taira, "Micro-domain control toward new lasers," 第40回日本磁気学会学術講演会, 金沢大学, 石川 (2016). (*Invited*)
- 29) H. Ishizuki and T. Taira, "Periodic laminar structured quartz for intense-laser pumped wavelength conversion," 7th EPS-QEOD Europhoton Conference, Vienna, Austria, August 21-26, PO-1.13 (2016).
- 30) M. Baudisch, H. Pires, U. Elu, H. Ishizuki, T. Taira, and J. Biegert, "44 μ J, 160 kHz, few-cycle mid-IR OPCPA with chirp reversal," CLEO 2016, San Jose, California, USA (2016).
- 31) C. K. D. Suddapalli, J. Wei, A J. Debray, V. Kemlin, B. Boulanger, H. Ishizuki, T. Taira, and M. Ebrahim-Zadeh, "Picosecond mid-infrared optical parametric oscillator based on cylindrical MgO:PPLN," CLEO 2016, San Jose, California, USA (2016).
- 32) T. Taira, "Opening remarks for LIC," LIC plenary session, The 4th Laser Ignition Conference (LIC'16), OPIC'16, Yokohama (2016). (*Plenary Talk*)
- 33) T. Suzudo, K. Hagita, T. Ikeo, K. Izumiya, N. Jikutani, Y. Higashi, and T. Taira, "Total design of high power VCSEL pumped passively Q-switched micro-lasers for laser ignition," The 4th Laser Ignition Conference (LIC'16), OPIC'16, Yokohama (2016). (*Invited*)
- 34) H. H. Lim and T. Taira, ">0.5 MW peak power, widely pulse-width tunable Nd:YAG ceramic microchip laser by cavity length control," The 10th Asia-Pacific Laser Symposium (APLS 2016), Jeju Island, Korea (2016).
- 35) H. Ishizuki and T. Taira, "Mid-infrared optical-parametric generation pumped by sub-nanosecond microchip laser," OSA Topical Meeting on Advanced Solid-State Lasers (ASSL), Berlin, Germany (2015).
- 〔図書〕(計1件)
- 1) 平等拓範, 「9・3 DPSSL とセラミックレーザー材料の開発」, レーザー・光技術が拓く科学技術の新潮流報告書, レーザー学会 レーザー・光技術が拓く科学技術の新潮流調査委員会, pp. 108-131(2017). 総ページ 154
- 〔産業財産権〕
- 出願状況 (計1件)
- 名称: レーザ点火装置
 発明者: 平等拓範, 林桓弘
 権利者: 大学共同利用機関法人自然科学研究機構
 種類: 特許
 番号: 特願 2017-085731
 出願年月日: 2017年4月24日
 国内外の別: 国内
- 取得状況 (計0件)
- 〔その他〕
 ホームページ等
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
平等 拓範 (TAIRA, Takunori)
 分子科学研究所・メソスコピック計測研究センター・准教授
 研究者番号: 50216595
- (2) 研究分担者
 赤松 史光 (AKAMATSU, Fumiteru)
 大阪大学・工学研究科・教授
 研究者番号: 10231812
- 林 潤 (HAYASHI, Jun)
 京都大学・エネルギー科学研究科・准教授
 研究者番号: 70550151
- 石月 秀貴 (ISHIZUKI, Hideki)
 分子科学研究所・メソスコピック計測研究センター・助教
 研究者番号: 90390674

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

森本 巖 (MORIMOTO, Iwao)

大阪大学・工学研究科・特任研究員

研究者番号：50828176

鈴木 剛 (SUZUDO, Tsuyoshi)

リコーインダストリアルソリューションズ株式会社

株式会社

軸谷 直人 (JIKUTANI, Naoto)

株式会社リコー

萩田 健太郎 (HAGITA, Kentaro)

株式会社リコー