

小特集 プラズマ支援燃焼の現状と展望

7. ジャイアントパルスマイクロレーザーによる エンジン点火の可能性

7. Promise of Giant Pulse Micro-Laser for Engine Ignition

平等拓範, 常包正樹, 金原賢治¹⁾, 森島信悟¹⁾, 田口信幸²⁾, 杉浦明光²⁾

TAIRA Takunori, TSUNEKANE Masaki, KANEHARA Kenji¹⁾, MORISHIMA Shingo¹⁾,

TAGUCHI Nobuyuki²⁾ and SUGIURA Akimitsu²⁾

自然科学研究機構分子科学研究所, ¹⁾(株)日本自動車部品総合研究所, ²⁾(株)デンソー

(原稿受付: 2013年3月19日)

近年, マイクロ固体レーザーの高輝度化は著しく, これまで固体レーザーのパルスギャップであったサブナノ秒でのジャイアントパルス発生が望めるようになった. そして, このジャイアントパルス光を用いて, 強力かつ効率的なエンジン点火を狙った研究が進行中である. 本章ではこれらレーザー点火の諸特性と, 持続可能社会実現に要請の高い低燃費, 低排出で高性能なエンジンについて, ジャイアントパルスマイクロレーザー, マイクロチップレーザーの可能性と併せ展望を解説したい.

Keywords:

laser ignition, engine, micro laser, microchip laser, micro solid-state photonics, giant micro-photonics, laser plug, gasolin vehicle, gas engine, cogeneration system

7.1 はじめに

19世紀にはマックスウェルらにより電磁気学が体系化され, 発電機, モーター, 変圧器などの電気機械の発明, 発展を経て, 20世紀のラジオ, テレビに代表されるエレクトロニクスの時代を迎えるに至った. また, プランクやアインシュタイン等により道が拓かれた量子力学は, 半導体などの電子デバイスの学術的基盤となり20世紀のエレクトロニクス時代を主導し, 一方で, 1960年のメイマンによるレーザーの発明に代表される量子エレクトロニクスの基礎ともなった.

そして19世紀に成された電磁気学の体系化と電気機械の発展は, 1860年のルノアール・エンジン(内燃機関)において高電圧で放電を起こし火花点火させる機構として展開される, など産業革命にも大きな影響を与え, 20世紀における自動車社会を担ったエンジンの高性能化に寄与し現在に至っている. それなら, 20世紀に発展した量子力学によるレーザーを現在のエンジンに展開することで, さらなる高性能化が期待できるのでは?と誰しもが想像する. しかしながら, 光電離が可能な尖頭値がメガワット以上のジャイアントパルスレーザーは, 長らく大型で不便な装置であり, このような夢を阻んでいた. ところが, 最近のマイクロ固体フォトンクスにより劇的に高性能化が進み, かつては荒唐無稽とされていたレーザーによるエンジン点火が, 決して非現実的な話ではなくなってきた[1-14]. ところで, 学問の発展過程で細分化された「レーザー」と「エンジン」の研究はこれまでは距離があり, お互いの最先端研究を知り

得ず, 新領域の発展が阻害されていたが, 最近になりようやく両者の接点ができてきた[15-22]. 本章では, 「量子の力でエンジンを回す」を主題に最近の研究を紹介したい.

7.2 電気火花点火

近年, 環境問題などからCO₂低減, 低燃費を狙った高圧縮・希薄燃焼エンジンの研究開発が盛んである. しかし, このようなエンジンに火花点火プラグを適用した場合, 従来のままでは放電そのものが困難になる. 点火強化のため印加電圧を高めても, 40 kV 以上ではプラグ碍子からの電流リークによるエンジン失火や, プラズマによる電極の消耗, 点火コイルおよびジョイント部の寿命低下といった問題が生ずる. そのため, 新たな点火装置が種々提案されているが, 多くの場合, 従来型の火花点火プラグと同様, 電極を有する放電方式であるため, プラグの消耗の問題に加え, 高圧力場での放電形成, 電流のリーク, 火炎核形成時における電極からの熱損失といった課題が残されたままであった[23, 24].

7.3 レーザー点火

上記手法に対しレーザー点火ではそもそも電極が不要で空間的に自由度が高いため, 燃焼室中央付近で点火でき, 火炎が冷たい燃焼室壁から受ける損失が小さい高効率な燃焼を促進できる. さらに, レーザー光の照射方式によってはシリンダー内で多点での同時点火も可能で, 燃焼時間の短縮と燃焼効率の大幅な改善が期待される. さらにプラグ

authors adress: National Institutes of Natural Sciences Institute for Molecular Science, ¹⁾Nippon Soken, Inc., ²⁾DENSO CORPORATION

corresponding author's email: taira@ims.ac.jp

では点火が難しい高圧の可燃性予混合気の着火でもレーザー点火は有利となる。実際にレーザーで点火してみると火の回りも早く、その極限的な燃焼が期待されるものの、点火に必要なエネルギーが500 mJにも至り、電気からレーザー光への変換効率も0.5%ときわめて低いことが大きな課題とされた[1]。しかしそれ以上に点火に求められる尖頭値がメガワット以上のジャイアントパルスレーザーは、一般に大型で数10 kVに至る高電圧、大電力を要し、僅かな振動や温度変化で動作が不安定となることから、ガスコジェネエンジン用点火装置への適用を中心に研究開発が進められてきたが、それでもレーザーが問題で長らく基礎研究に留まっていた[1, 2, 4, 6, 25]。

一方で、固体レーザーの単一モード化の観点から共振器をマイクロチップ化し[26, 27]、さらにQスイッチ動作を適用することで尖頭値を高めることや[28-30]、焼結法による透明多結晶 YAG セラミックレーザー (セラミックレーザー) による量産化・高機能化を睨んだ試みなどの[31, 32]、マイクロ固体フォトンクス (microsolid-state photonics) にまつわる研究が進展し[10, 11]、加えて励起に伴う発熱高化を低減する準 CW 励起の手法が見直され[33]、先の焼結法による複合構造化などが進み[34, 35]、マイクロチップレーザーからのジャイアントパルスの直接発生が可能となり[36, 37]、エンジン点火の新たな可能性が出てきた[5, 6]。

7.4 レーザー点火プラグの構成と特性

図1 (a), (b)にそれぞれ試作したレーザー共振器の構成および外観写真を示す。レーザー媒質としてセラミック製 1.1 at.% Nd:YAG と光スイッチとして初期透過率30%のセラミック製 Cr⁴⁺:YAG を拡散接合[35]した後、入射側に励起光の波長 (λ_p) 808 nm に対する AR コーティングと発振波長 (λ_l) 1064 nm に対する全反射コーティングを、出力側に 1064 nm の透過率50%のコーティングを施し、長さ 10 mm の共振器とした。つまりこのレーザーは、共振器の Q 値切り換えに Cr:YAG 自身の可飽和吸収特性を利用できるため、スイッチング用の外部制御装置を設置する必要が

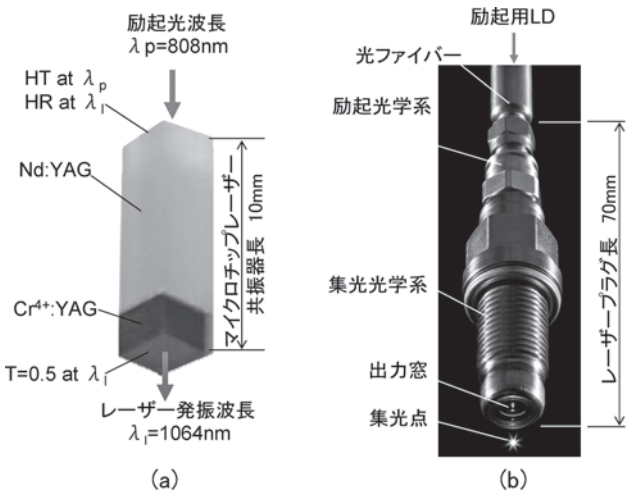


図1 試作した(a)レーザー共振器の構成および(b)レーザー点火の外観。

なく、小型、省電力にできる。さらに Nd 添加量が高いセラミック製のレーザー媒質を用いることで、単位長さあたりの励起光の吸収効率を高くでき、共振器長の短尺化とパルス幅の短縮化が図れる。実は、従来の Q スwitch レーザーにおけるパルス幅はナノ秒台であり、同じエネルギーだと尖頭値が低くなり、効率の良い光分離が期待できない。一方で、モードロックによるフェムト秒などの超短パルスでは、折角電離しても十分に電子を加速できず、電子雪崩を効率よく引き起こせない。残念ながら従来のレーザーでは、これらの中間のパルス幅がギャップ領域として残されていた(パルスギャップ)。サブナノ秒で発振可能なマイクロチップレーザーによるジャイアントパルスでは、これら両方の恩恵を享受できる(図2)[11]。また、Nd:YAG と Cr:YAG は拡散接合により一体化しているためエンジンの振動や温度変化による光学系のアラインメントの変化がない。励起光は、エンジンルーム外に設置したファイバ出力型半導体レーザー (LD) からレーザー媒質端面に入射させる。これで、LD 温度の安定性向上が図れる。レーザーの特性は、励起時間が 500 μ s の場合、1 パルスあたりのエネルギー 2.4 mJ、パルス幅 0.7 ns、横モード品質 $M^2 = 1.4$ と高輝度、高品質のレーザー光を 4 パルス、総エネルギー 9.6 mJ 発振できる。パルス数の制御は励起光の発光時間を変更し制御するため、エンジン条件に応じた点火エネルギーの制御が可能となる。集光部のビーム径は 8.4 μ m、パルス幅 0.7 ns、集光強度 5.5×10^{12} W/cm² であり、光電離を誘発するのに必要なエネルギー密度 10^{12} W/cm² を十分に上回るものである。

7.5 エンジン搭載システムの構成と特性

図3に1.8 L 直列4気筒ガソリンエンジンに搭載したレーザー点火システムを示す。トランクルームに設置した LD 駆動回路および LD 冷却システムから、レーザー点火プラグに SUS 被覆管付の光ファイバを介して励起光を供給する。レーザー媒質自体の発熱とエンジンからの伝熱によるレーザー媒質の温度上昇を防止するため、レーザー共振器の外周にエンジンの冷却水とは独立した水冷機構を設置し、レーザー媒質を冷却した。冷却水の設定温度は常温のパルスエネルギーとパルス数を維持できる 20℃ に設定した。試作したレーザー点火プラグと放電エネルギー 35 mJ の火花点火プラグの図示平均有効圧 (IMEP) の変動率 (COV_{IMEP}) を 1200 rpm、73 Nm にて評価した結果を図4

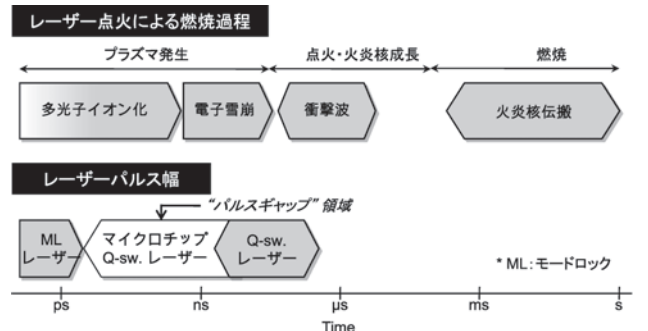


図2 レーザー点火過程とパルスギャップ。

に示す。理論空燃比近傍では、レーザー点火プラグの燃焼変動は火花点火プラグと同等であるが、希薄領域ではレーザー点火プラグの燃焼変動が小さくなり、常包等が報告した定容容器での実験結果と対応した結果が得られた[7]。すなわち、今回の実験により小型高輝度ジャイアントパルスマイクロチップレーザーは、火花点火プラグの約1/4のエネルギーでリーン限界を延ばすことができることが示された。ところで以前に、レーザー点火の特長として多点点火が容易であることを挙げた。これに対してもプロトタイプではあるが、すでに個別のLD光を3本の光ファイバーでモノリシックNd:YAG/Cr:YAGセラミックスの異なる空間を励起し、独立に尖頭値数メガワットのジャイアントパルス光を発生できるレーザーをプラグサイズの筐体に収めることにも成功しており、それが米国光学学会(OSA)等で広く紹介された(図5)[38-43]。産業革命の恩恵を享受した欧米において、電磁気学を背景とした電気火花点火から、量子力学によるレーザー点火とすることで何が起きる

のか、多方面から興味を持たれていることがうかがえる。以上、当面の目標であったジャイアントパルスレーザーを車載できるまで小型化、高効率化、高信頼性化を図ると同時に、エンジン高性能化に対する可能性を示すことができた。今後は、熱効率向上と低NOxの同時低減が求められているガスコジェネエンジンにおける可能性を検証していきたい。

7.6 まとめ

3.11以降、我が国におけるエネルギー情勢は大きく変わった。これを受け、NEDOはH23年報告書「省エネルギー効果が期待される半導体レーザー応用技術に関する検討」(H24.3, 委託先：株式会社三菱総合研究所)を緊急にまとめた[44]。報告書では、レーザーの強力点火はNOx等の排出を低減し、かつ低燃費が望める高圧縮、高過給、希薄燃焼の安定動作に道を拓くものであると報告している。そしてレーザー点火によるエンジンを搭載した自走する車両も実証され、耐久性やコストの課題はあるものの、

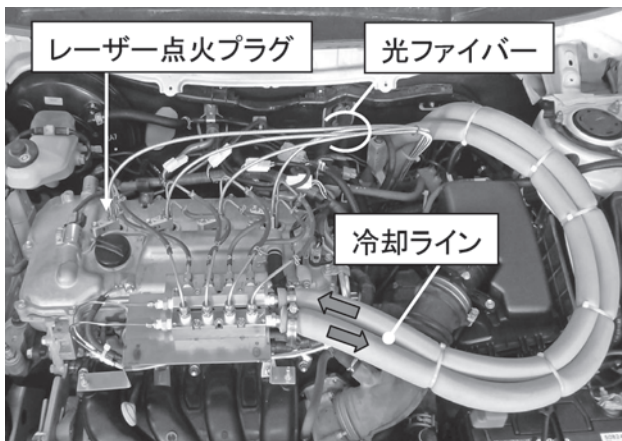


図3 ガソリンエンジンに搭載したレーザー点火システムの外観。

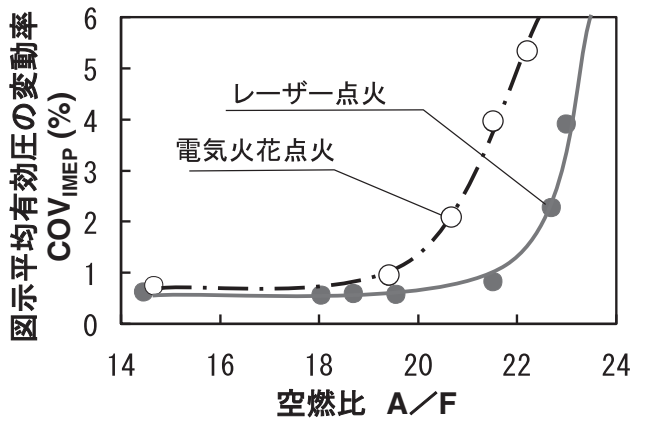


図4 レーザー点火プラグと火花点火プラグにおける図示平均有効圧(IMEP)の変動率(COV_{IMEP})。



図5 BBCやNew York Timesなどに掲載されたプラグサイズの三点点火のジャイアントパルスレーザー[38-43]。

レーザー点火はもう夢物語ではなくなったといえる[19]。日本の基幹産業である自動車も、ハイブリッド車も含め、まだまだエンジンを必要としており、さらには我が国の1次エネルギーの84%が石油、石炭、天然ガスなどによりまかなわれていることを考慮すれば、レーザー点火はまさに甚大な省エネ効果、経済効果、環境負荷低減効果をもたらすと期待される。そして世界的な機運も急速に高まり、2013年4月23日～25日にはOPICにおいて1st. Laser Ignition Conferenceが開催される[22]。微細な秩序制御(高度な物質制御)、さらにはそれを強調させるマイクロ共振器によるパルスギャップ光を中心に、ジャイアントマイクロフォトリクス(Giant Micro-photonics)によるレーザー点火、すなわち「量子の力でエンジンを回す」ことに、多くの人が興味を持ち始め、従来の学術領域を越えた産学官の新たな議論や連携が始まりつつある。今後の展開が楽しみである。

謝辞:

本報告は、JST イノベーションプラザ東海平成18年度採択による「実用化のための育成研究: 光波反応制御内燃機関をめざしたマイクロレーザーの開発」、JST 育成ステージ平成20年度採択による「車載型マイクロレーザー点火エンジンの研究」における研究成果の一部であり、研究の円滑な遂行に尽力頂いたJST並びに共同研究機関である自然科学研究機構、(株)デンソー、(株)日本自動車部品総合研究所の関係各位に感謝する。

参考文献

- [1] R. Hickling and W.R. Smith, SAE Tech. Paper 740114, 555 (1974).
- [2] 古谷博秀, 齊藤 剛: 応用物理 **77**, 1315 (2008).
- [3] D. Graham-Rowe, Nature Photonics **2**, 515 (2008).
- [4] H. Kofler *et al.*, Laser Phys. Lett. **4**, 4, 322-327 (2007).
- [5] 常包正樹 他: レーザー研究 **37**, 283 (2009).
- [6] M. Tsunekane *et al.*, IEEE J. Quantum Electron. **46**, 277 (2010).
- [7] 常包正樹, 平等拓範: レーザー研究 **41**, 119 (2013).
- [8] N. Pavel *et al.*, Opt. Express **19**, 9378 (2011).
- [9] N. Pavel *et al.*, *Laser Systems for Applications*, ed. by Krzysztof Jakubczak (INTECH, Croatia, 2011) Chapter 4, pp. 59-82.
- [10] T. Taira, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **13**, 798 (2007).
- [11] T. Taira, Opt. Mater. Express **1**, 1040 (2011).
- [12] 平等拓範: レーザー研究 **38**, 576 (2010).
- [13] 平等拓範: レーザー研究 **41**, 3 (2013).
- [14] 平等拓範, 常包正樹: オプトロニクス **5**, 124-130 (2009).
- [15] 鷺尾邦彦: 第33回レーザー学会年次大会「次世代エンジンのためのレーザー点火」シンポジウム, S1-28a I 01 (2013).
- [16] 村瀬英一: 第33回レーザー学会年次大会「次世代エンジンのためのレーザー点火」シンポジウム, S1-28a I 02 (2013).
- [17] 古谷博秀, 高橋栄一: 第33回レーザー学会年次大会「次世代エンジンのためのレーザー点火」シンポジウム, S1-28a I 03 (2013).
- [18] 赤松史光, 林 潤: 第33回レーザー学会年次大会「次世代エンジンのためのレーザー点火」シンポジウム, S1-28a I 04 (2013).
- [19] 森島信悟 他: 第33回レーザー学会年次大会「次世代エンジンのためのレーザー点火」シンポジウム, S1-28a I 05 (2013).
- [20] マシュー・パートロー 他: 第33回レーザー学会年次大会「次世代エンジンのためのレーザー点火」シンポジウム, S1-28a I 06 (2013).
- [21] 平等拓範: 第33回レーザー学会年次大会「次世代エンジンのためのレーザー点火」シンポジウム, S1-28a I 07 (2013).
- [22] 1st. Laser Ignition Conference 2013 <http://lic.opicon.jp/>
- [23] 白石泰介 他: 自動車技術会秋季大会前刷集, 文献番号 20095786 (2009).
- [24] Y. Ikeda and R. Turuoka, Applied Optics **51**, B183-B191 (2012).
- [25] 水野 透他: 第28回燃焼シンポジウム講演論文集 263 (1990).
- [26] J. Zayhowski and A. Mooradian, Opt. Lett. **14**, 618 (1989).
- [27] T. Taira *et al.*, Opt. Lett. **16**, 1955 (1991).
- [28] J.J. Zayhowski, C. Dill, III, Opt. Lett. **17**, 1201 (1992).
- [29] T. Taira *et al.*, Extended Abstracts, 39th Spring Meeting for Jpn. Soc. Appl. Phys., 31a-D-7, p.912 (1992).
- [30] J. J. Zayhowski and C. Dill III, Opt. Lett. **19**, 1427 (1994).
- [31] T. Taira *et al.*, OSA TOPS on Advanced Solid-State Lasers **19**, 430 (1998).
- [32] I. Shoji *et al.*, Appl. Phys. Lett. **77**, 939 (2000).
- [33] T. Taira *et al.*, Extended Abstracts, 62nd Autumn Meeting for Jpn. Society of Appl. Phys., 12p-ZK-5, p.804 (2001).
- [34] J. Saikawa *et al.*, OSA TOPS on Advanced Solid-State Lasers **34**, 106 (2000).
- [35] H. Yagi *et al.*, Laser Physics **15**, 1338 (2005).
- [36] T. Taira *et al.*, Extended Abstracts, 52nd Spring Meeting for Jpn. Society of Appl. Phys., 30p-YT-2, p. 1222 (2005).
- [37] H. Sakai *et al.*, Opt. Express **16**, 19891 (2008).
- [38] CLEO
<http://www.cleoconference.org/home/news-and-press/cleo-press-releases/cleo-press-releases-2011/laser-sparks-revolution-in-internal-combustion-eng/>
- [39] OSA News Release
http://www.osa.org/about_osa/newsroom/news-releases/releases/04.2011/lasersparksrevolution.aspx
- [40] EurekAlert! (AAAS Science news wire)
http://www.eurekalert.org/pub_releases/2011-04/osoa-lsr042011.php
- [41] BBC News
<http://www.bbc.co.uk/news/science-environment-13160950>
- [42] New York Times
<http://wheels.blogs.nytimes.com/2011/04/27/spark-plugs-joining-carburetors-on-the-automotive-scrap-heap/>
- [43] 分子科学研究所 <http://www.ims.ac.jp/topics/2011/110704.html>
- [44] [http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2012\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2012).pdf)
- [45] NEDO 成果報告書 DB http://www.nedo.go.jp/library/database_index.html