

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04250

研究課題名(和文) レーザー-固体相互作用による予混合気の着火現象

研究課題名(英文) Laser solid target interaction induced ignition phenomenon of fuel-air premixture

研究代表者

高橋 栄一 (TAKAHASHI, Eiichi)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号：90357369

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：パルスレーザー光を固体表面付近で集光すると、気体中で集光した場合よりも著しく低いエネルギーで予混合気を着火できることが知られていたが、そのメカニズムは良くわかっていなかった。本研究ではそれを明らかにするために、レーザー集光点とターゲット間隔、およびターゲット表面とレーザー入射角度が着火に与える影響を、集光レーザービームの特性評価に基づく照射エネルギー密度、および着火の初期火炎をシュリーレン計測を行うことによる可視化によって調べた。その結果、着火はレーザーブレイクダウンプラズマが誘起する流体運動とターゲット材料のアブレーションによる複合現象であることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

内燃機関の着火方法を従来の方法から、レーザーを用いる着火にすることによって、希薄、且つ高圧な混合気の着火を可能とすることで熱効率を高め、CO2排出量を削減することができる。本研究によって、その着火に必要なレーザーエネルギーを抑制する方法や条件が明らかになったことから、レーザーによる多点着火などの新たな燃焼方法の可能性への展開が期待できる。また、近年の高エネルギー放電を希薄混合気への着火に用いる取り組みにおいても、電極に短時間にエネルギーが付与される状況は本研究で検証した条件と近く、電極材料のアブレーション効果は今後の着火研究に対して重要な知見を与える。

研究成果の概要(英文)：It has been known that when pulsed laser is focused near the surface of a solid target in the fuel-air premixture can be ignited with significantly lower energy than when it is focused in a gas, but the mechanism is not well understood. In this study, in order to clarify this, the effects of the laser focusing point and target spacing, and the target surface and laser incident angle on ignition were examined. The irradiation energy density was evaluated by observing the focused laser beam profile, and the initial flame kernel was visualized by schlieren measurement. As a result, it was clarified that the ignition is a complex phenomenon of the fluid motion induced by the laser breakdown plasma and the ablation of the target material.

研究分野：燃焼工学

キーワード：着火 レーザーブレイクダウン アブレーション 誘起流動

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 従来のスパーク着火法に代わりレーザーブレイクダウンプラズマを用いるレーザー着火法は希薄、高圧条件での着火、また多点着火の実現を通じて内燃機関の高効率化へ寄与が期待されていた。一方、予混合気中の固体表面にパルスレーザー光を集光すると、気体中に集光する場合に比べて著しく小さいエネルギーで着火できることは知られていた。金属表面に照射されたレーザー光の一部は金属表面のおよそ数 10 nm に深さにまで浸透し、自由電子と相互作用する。自由電子は格子フォノンと散乱を生じ急速な加熱が行われる。レーザーの強度、パルス幅だけではなく、材料の熱伝導率、反射率にも依存して、媒質は溶解、気化、微粒子の放出を経てプラズマの形成に至ることもある。レーザーを積極的に金属表面に集光しアブレーションプラズマで着火する方法や、固体表面にくぼみをあらかじめ形成し、表面からの反射レーザー光を集光することで着火を行った例が報告されていた。レーザー着火に必要なエネルギーを低減できることは工学的に大きな利点であったが、これら経験的には知られていた固体表面にレーザーが照射された際の着火メカニズムについて包括的な理解には至っていなかった。

(2) また、従来のスパーク放電による着火技術においても熱効率の改善に向けて希薄予混合気の着火のために放電エネルギーを高くする取り組みが行われていたが、その場合、高融点材料を電極に用いていたとしてもアークスポットは極めて高温になって一部溶解・放出することが予想された。実際、高電流放電において着火確率が電極材料の融点に反比例する実験例も報告されていた。

(3) 従って、この高温に加熱された固体が着火に及ぼす影響を理解することは、新規着火技術を開発することに加え、高エネルギー放電着火技術においても極めて重要であると考えられた。

2. 研究の目的

(1) 本研究では低エネルギーレーザーによる新規着火法の開発と、高エネルギー放電に伴う電極の着火への影響を考察する知見を得るために、予混合気中におけるレーザーと固体表面の相互作用に基づく着火メカニズムを明らかにすること、

(2) さらに、そのレーザー着火の低エネルギー化を利用し、従来に無い多点レーザー着火の可能性を示すことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 図 1 に本研究における基本的な実験配置を示す。予混合気中に固体ターゲットが設置さ

れており、近傍にレーザーパルスが集光されている。この着火に対するレーザー光の集光点とターゲット表面までの距離 (x_p) の依存性、およびレーザー入射方向に対するターゲット表面法線方向の角度依存性を、初期火炎核成長のシュリーレン計測法による可視化と併せて実施した。また、ターゲット材料としてレーザー光に対する吸収率や熱伝導率が異なる種々の金属（鉄、銅、白金）や、アルミナセラミックの様な誘電体材料を用いた材料依存性、および Nd:YAG の基本波と 2 倍高調波によるレーザー波長依存性、およびメタン、プロパンガスの結果を比較した。特に銅は赤外レーザーによる難加工性金属として知られるほか、特徴的な炎色反応を呈するためターゲット材料の広がり进行评估するために用いた。

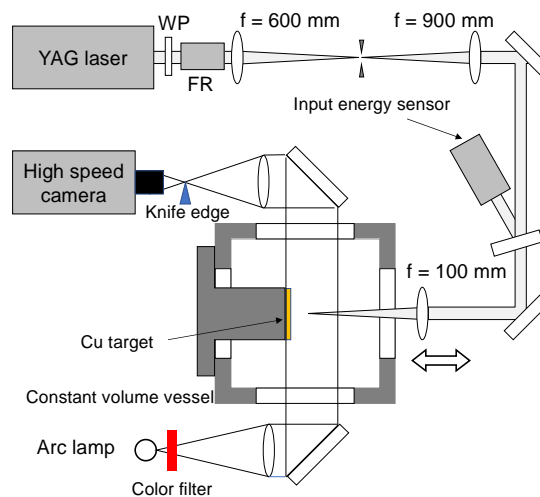


図 1 実験配置

(2) その考察の基礎となるレーザーの集光特性を着火実験に先だってレーザービームプロファイラーを用いて評価した。また、数値シミュレーションによって、評価されたレーザーのフルエンス、レーザー光の反射・吸収率、およびターゲット材料の熱伝導率を考慮して温度密度分布を求め、実験結果と比較した。

4. 研究成果

(1) まず図 2 に本研究によって得られた銅をターゲットとして得られた、プロパン中の最小着火レーザーエネルギーの x_p 依存性の例を示す。赤丸、青×のデータ点がそれぞれ着火に成功、失敗した点を表している。従って、そのデータ点の間が着火しきい値となる。また図中の曲線はレーザービームプロファイラー計測に基づき求められたターゲット上でレーザーフルエンスが 4 J/cm^2 になるレーザーエネルギーを表している。実験は YAG レーザーの基本波をターゲットに対して垂直に入射する条件でレンズをステージで移動させることで実施した。図からわかる様に、ターゲット表面から焦点が離れているときは 4 J/cm^2 のフルエンス以上に着火のし

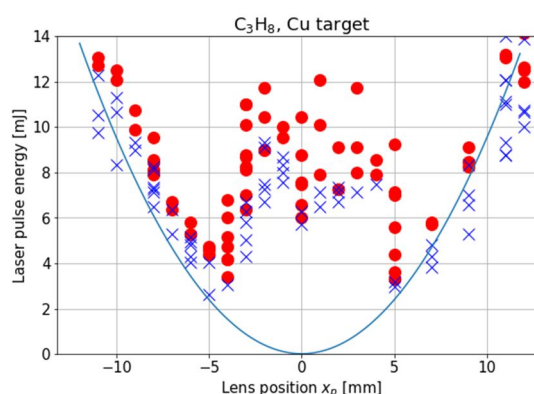


図 2 最小着火エネルギーのターゲット・レーザー焦点距離間隔 (x_p) 依存性

る様に、ターゲット表面から焦点が離れているときは 4 J/cm^2 のフルエンス以上に着火のし

きい値があるものの、 x_p が 0 mm 近傍では著しく高くなっていることが分かる。同様な振る舞いは固体ターゲット材料として、鉄、白金に加えアルミナセラミックを用いた場合、さらにメタン空気予混合気においても確認することができた。

(2) この x_p に対する違いを検討するために、カラー高速度カメラによる自発光計測、および初期火炎のシュリーレン法による可視化計測の結果を図 3、4 に示す。銅をターゲットとして用いたことによって、空間領域へのターゲット材料の広がり、またその周囲からの火炎成長を可視化することができた。図 3 (a) の $x_p = 0$ mm ではレーザーブレイクダウン直後にアブレーションした銅は円盤状に広がり、その後、渦輪の中に拡散していることがわかる。一方、焦点をターゲット上からずらした $x_p = 5$ mm の図 3 (b) の実験ではターゲット表面から噴き出した緑色に発光する銅と、その周りから火炎が後半の時間帯に成長している様子を見ることができる。この初期火炎をシュリーレン法によって可視化した画像を図 4 (a) に示す。 $x_p = 0$ mm の実験条件ではターゲット表面に渦輪が形成

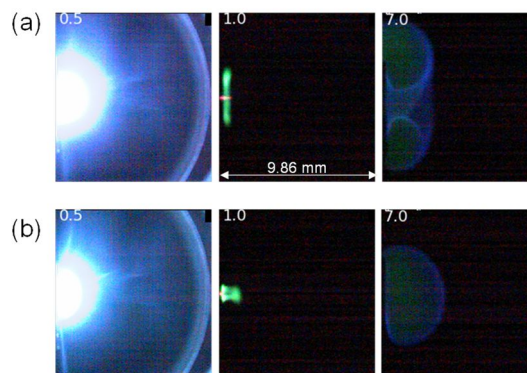


図 3 カラー発光像 (a) $x_p = 0$ mm (b) $x_p = 5$ mm

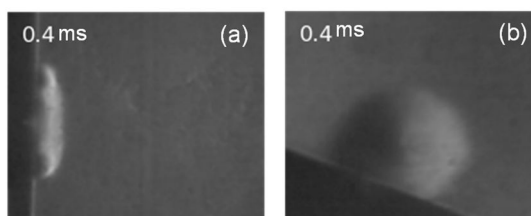


図 4 シュリーレン計測初期火炎像 (a) 直入射, (b) 斜入射

されていることを確認することができる。つまり、図 2 において確認された $x_p = 0$ mm 近傍で見られた最小着火エネルギーが増大する現象は、ターゲット表面近傍で形成されたプラズマが誘起する渦輪がターゲット表面近傍に形成されてしまうことから初期火炎の熱損失や火炎伸長の影響によって失火につながりやすくなっているためと考えられる。

(3) 一方、 x_p が大きい範囲ではレーザーアブレーションしきい値に最小着火エネルギーのしきい値が一致したことは基本的にアブレーションが着火をもたらしていると考えられるが、この現象を検証するためにシミュレーションを実施した。銅と鉄ターゲットを想定し、基本波 YAG レーザーの反射率、レーザーを吸収する表面スキン長、熱伝導率等を考慮した。その結果、銅は鉄よりもレーザー反射率や熱伝導率が高い赤外レーザーによる難加工性金属として知られているが沸点が低いため最終的にはいずれも融点を越えることが分かった。スパークプラグなどに用いられている高融点材料も一般に熱伝導率が低いため、同様に融点に達すると考えられる。

(4) 次にシュリーレン計測によるレーザー入射角度依存性実験の代表的な初期火炎の像を図4に示す。(a)はレーザーが固体ターゲットに対して垂直に入射した場合、(b)は斜めに入射した場合を表している。図からわかる様に形状に大きな違いがみられており、直入射では表面に局在化する渦輪構造が見られている一方、(b)の斜め入射においてはターゲット垂直方向にマッシュルーム状の火炎が成長していることが分かる。斜め入射ではブレイクダウンプラズマの形成した誘起流動がターゲット表面との相互作用によって早期に減衰し、アブレーションがより低いレーザーエネルギーでも生じていることを確認した。また火炎に対する反射レーザー光の影響は見られなかった。この斜め入射を用いることで最小レーザー着火エネルギーを2 mJ にまで低下させることに成功した。

(5) 今回の YAG レーザーのパルス幅は 7 ns 程度でありその時間幅に数ミリジュールというエネルギーが固体表面に供給されることで放出されるアブレーション物質が着火に寄与しながら拡散していることが分かった。一方、一般的なスパーク放電においても、後半のグロー放電の時間帯の電極損耗は軽微であるが、ブレイクダウンフェーズは数ナノ秒程度の時間に高電流によって数ミリジュールというエネルギーが電極に付与されるため、損耗を生じることが報告されている。アブレーションの可視化に用いた銅ターゲットは一般的にスパークプラグに用いられる、ニッケル合金や白金に比べて融点は低いが高熱伝導率が高いので、両金属とも同様なエネルギー付与で融点に達する。時間、エネルギー密度とも同程度であることから今回得られた知見はスパーク放電による着火現象を考察する上でも重要であると考えられる。

(6) 最後に、本手法で9点のレーザー多点着火を実現した実験例を図5に示す。(a)は1本のレーザービームを9本に分割して本手法によってピストン上に形成した着火プラズマ発光を表している。図5(b)に示す様に多点着火(赤、緑)を用いることによって燃焼期間を1点着火(青)よりも早期化することができることを示した。

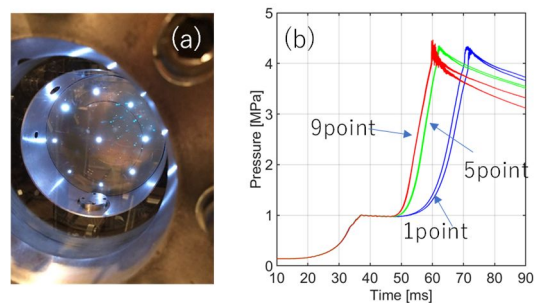


図5 (a) 9点レーザー着火発光像, (b)燃焼における圧力の時間履歴(40msで着火)

<引用文献>

E. Takahashi and S. Kato "Laser ablation ignition of flammable gas." Japanese Journal of Applied Physics 60(4), 2021, 047001.

N. Jeanvoine, "Plasma-Material Interaction and Electrode Degradation in High Voltage Ignition Discharges". Doctor thesis, Saarland University 2009.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takahashi Eiichi, Kato Susumu	4. 巻 60
2. 論文標題 Laser ablation ignition of flammable gas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 047001 ~ 047001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abed20	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋栄一、加藤進、中村大造、西岡牧人
2. 発表標題 レーザーアブレーションによる予混合気の点火
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋栄一、加藤進、秋濱一弘
2. 発表標題 レーザーアブレーションによる予混合気の点火 入射角度依存性
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
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
---------	---------