

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K05733

研究課題名(和文) レーザープラズマを用いた火花放電路の長距離形成に関する基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental Study on Long-Distance Electric Discharge Formation by Laser breakdown

研究代表者

大熊 康典 (OHKUMA, Yasunori)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号：80287581

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：レンズで集光したレーザーを照射して気体をプラズマ化させ、これを放電路の中継点とすることで、パッシェン則によって決まる従来の火花放電よりも放電距離の長い火花放電を発生させる手法を提案した。レーザーで生成するプラズマの衝撃波方向と電極間に印加する電圧方向との関係や、レーザープラズマの形成過程と電極間に印加する電圧のタイミングが、放電距離の長い火花放電の発生に強く影響していることが明らかとなり、火花放電の放電距離を制御する手法に関する指針や、放電路の長尺化に対するエネルギー効率の最適化を検討する際に必要となる成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案されるパッシェン則に依存しない長距離火花放電の技術は、火花点火エンジンにおいて広域火花点火を実現させる革新的な新点火方法の提案に寄与するものである。火花放電単体よりも初期火炎核が拡大できるため、希薄予混合気燃焼限界などのガソリンエンジン燃焼性能を大幅に向上させる可能性があることから、燃費向上によるCO2排出量削減とNOx低減によるクリーン排気の技術に貢献できる。また、長距離放電による体積的な点火は、CO2を排出しないアンモニア燃焼において懸念されている燃焼速度が遅いという課題に対しても有効であることから、脱炭素燃料の利用促進につながる技術として期待できる。

研究成果の概要(英文)：We proposed a spark discharge triggered by a laser breakdown by generating a laser plasma between the discharge electrodes in order to generate a spark discharge with a longer distance between the discharge electrodes than the spark discharge determined by Paschen's law. We experimentally clarified that the relationship between the shock wave direction of the laser plasma and the voltage direction applied between the electrodes and the relationship between the laser plasma formation process and the timing of the voltage applied between the electrodes affect the spark discharge distance. We also used an Intensified CCD camera to clarify the effect of the laser breakdown on the discharge path of the spark discharge. With these results of these experiments, we established a method to control the distance between electrodes in a spark discharge. We have also obtained results that will be necessary when we study the optimization of energy efficiency for longer discharge paths.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：レーザープラズマ 火花放電 レーザー誘起ブレイクダウン 長距離放電

1. 研究開始当初の背景

近年、ハイブリット自動車が普及する中、従来の内燃機関の低燃費化が再び重要視され、欧州に続き日本においてもダウンサイズ、高過給エンジンの研究が盛んに行われている。内閣府 SIP 「革新的燃焼技術」においても、熱効率 50%を目指してスーパーリーンバーンの研究・開発が行われている[1]。

ガソリンエンジンの燃費を改善する手法の一つとして、希薄予混合気燃焼が挙げられる。これは、燃料に混合する空気の比率を高めて希薄化した混合気をエンジンで燃焼させる方法で、この燃焼の利用により、更なる燃費向上が期待できる。しかし、この燃焼を実現するためには、初期火炎核を大きくして急速な燃焼を実現する必要がある。一方、従来のガソリンエンジンの点火方式は、スパークプラグ放電による点に近い点火、すなわち“点状”の小体積放電による点火が用いられているため、混合気の希薄化を進めると点火が困難になり、さらに点火しても火炎が伝播しにくい。したがって、希薄予混合気燃焼を効率良く行うためには、燃焼状態を左右する点火の強化が重要な課題となる。

この課題に対する従来の取り組みとして、放電エネルギーの増加や、レーザーによる多点点火などの様々な研究が行われている(例えば文献[2])。レーザー点火方式は電極を必要としないことから、初期火炎核の成長時に電極への熱損失がない利点があるが、レーザー照射点からの点状の点火となるため、数点程度の多点化では放電の総体積を飛躍的に大きくすることが難しく、スパークプラグ点火と同様の課題が残されている。一方、レーザーによる誘雷実験やレーザートリガースパークギャップスイッチなどでは、レーザーによって生成された電離チャンネルによる長距離放電の形成が知られており、点火装置への応用が検討されている[3]。しかし、この方法を希薄予混合気燃焼の点火に応用した研究事例や実現事例が少ないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究は、火花放電点火とレーザー点火を組合せることで放電路の長い“線状”の放電を実現し、希薄予混合気燃焼を火花点火ガソリンエンジンに採用するために必要となる、初期火炎核のサイズを拡大して燃焼性能を大幅に向上させるための体積的な広域火花点火に関する技術発展に寄与することをねらいとしている。そこで、本研究では、レンズで集光したレーザーを放電電極間に照射して気体をプラズマ化させ、これを放電経路の中継点とすることで、パッシェン則に依存しない、従来では困難であった数十ミリメートル程度の放電電極間距離の長い火花放電を発生させ、長距離放電の形成におけるメカニズムや制御法を明らかにすることを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 放電実験装置

本研究では、放電電極間の中央の位置にレーザーによるプラズマを生成させ、レーザー誘雷のようにレーザー誘起ブレイクダウンをトリガーとする放電実験を行い、火花放電に影響を与えるレーザープラズマの特性を調べた。実験装置概略図と光学系配置図を、それぞれ図1と図2に示す。

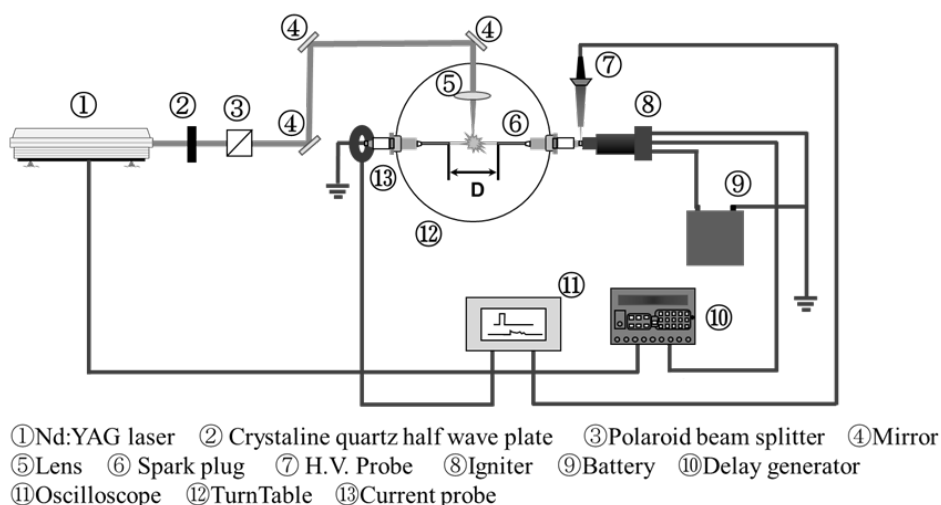


図1 実験装置概略図

半波長板と偏光ビームスプリッターによってエネルギーを調整した Nd:YAG レーザー（波長：532nm、パルス幅：7ns）光を、反射ミラーを用いて誘導し、レンズ（焦点距離：f=150mm）で集光して放電電極間にブレイクダウンプラズマを生成させる。火花放電を発生させる電極には、自動車用プラグ電極（NGK 製 BKR7E-11、電極直径：2.5mm、電極長：8.8mm）を使用する。電極間には、電源としてのバッテリー（Panasonic 製 Blue Battery Caos）とイグナイター（DENSO 製 90919-02244）を使用して、レーザーの発振に同期させたパルス電圧（ピーク電圧：～32kV）を印加する。電極間の最大放電エネルギーは 20mJ、レーザーエネルギーは 100mJ/pulse である。レーザーの照射や電極間の電圧印加のタイミング制御は、ディレイパルスジェネレータ（Stanford Research Systems 製 DG645）によって行う。放電現象を捉えるための電圧および電流波形は、放電電極の高圧側に取り付けた電圧プローブ（Tektronix 製 P6015A 型）と、接地側に取り付けた電流プローブ（Bergoz 製 CT-0.5-B）を用いて、オシロスコープ（GW Instek 製 GDS3254）により測定する。レーザーの発光は、Si 増幅フォトディテクター（Thorlab 製 PDA10A-EC）を用いて測定する。

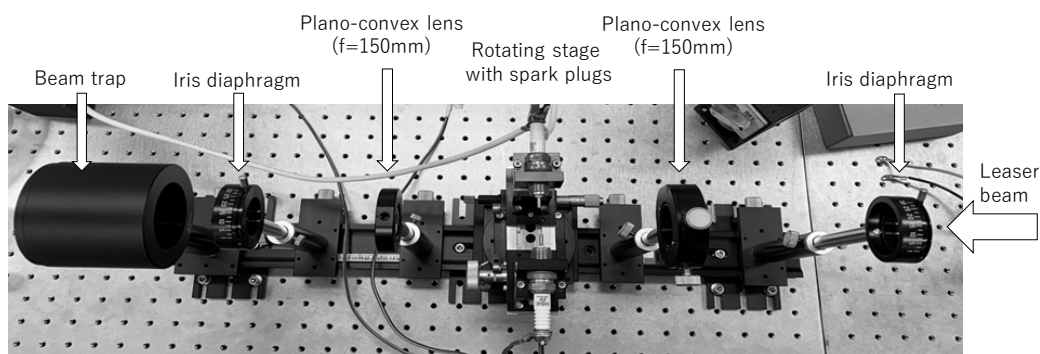


図 2 光学系配置図

(2) 実験方法

実験では、プラグ電極を設置した回転ステージを回転させて、電極間を結ぶラインを基準（接地電極側を 0° 高圧電極側を 180°）として設定するレーザー光の照射角度 (θ) と、電極間の電圧印加開始時間を基準としたレーザー光の照射のタイミング (Δt) をパラメータとして、放電確率 100% を維持する最大電極間距離 (D) や、レーザープラズマの発生から放電が起こるまでに要する時間 (ΔT) などの放電特性を測定した。また、Intensified CCD カメラを利用して、レーザー誘起ブレイクダウンによって引き起こされる火花放電の様子を観測し、レーザープラズマが及ぼす影響などを調べた。

プラグ電極および回転ステージと θ の関係の概要を図 3 に、また、電極間に印加する電圧波形と Δt および ΔT の関係の概要を図 4 に示す。 D は、同じ電極間距離で行った 30 回の試行で放電確率が 100% となることを確認して決定した。

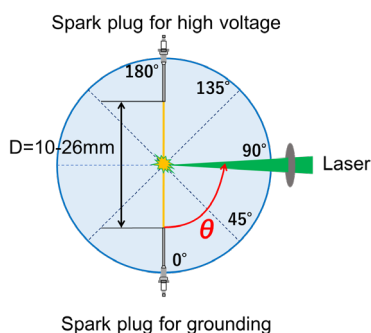
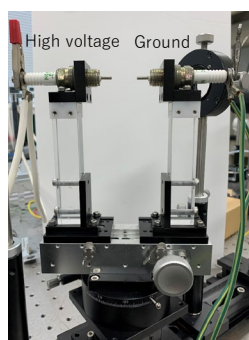


図 3 プラグ電極および回転ステージと θ の関係

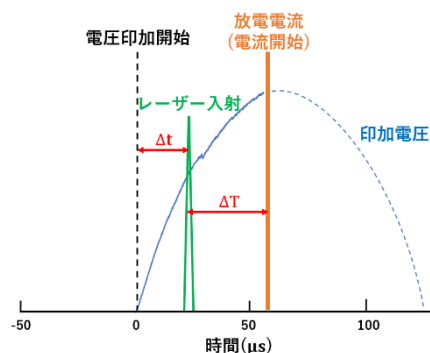


図 4 電極間の印加電圧波形と Δt および ΔT の関係

4. 研究成果

(1) 放電距離とレーザー光の照射角度の関係

レーザーブレイクダウンで発生する衝撃波やプラズマ成長方向と高電圧印加方向の最適化によって、さらなる長距離放電が期待できる。そこで、レーザーと高電圧印加の角度が放電距離に及ぼす影響を明らかにするための実験を行った。

実験は、レーザー光の照射タイミング (Δt) が、 $-50\mu\text{s}$ （電極間電圧印加前にレーザー照射）、 $0\mu\text{s}$ （レーザー照射と同時に電極間電圧印加）、 $+50\mu\text{s}$ および $+100\mu\text{s}$ （電極間電圧印加後にレーザー照射）の 4 条件について、レーザー照射角度 (θ) を接地側の電極から 45°、60°、75°、90°、105°、120°、135° とした火花放電を行い、それぞれの場合において、放電確率 100% を維持する

最大電極間距離 (D) を調べた。放電確率 100% の最長電極間距離 (D) のレーザー照射角度 (θ) 依存性を図 5 に示す。

電極への電圧印加のみの通常の火花放電 (SI : Spark Ignition) では、 D が 14.5mm であったが、レーザー光を電極間に照射することで放電電極間距離が長くなることが分かった。そして、 θ が 90° (電極間を結ぶラインの中央にレーザーを垂直に照射して放電) よりもやや高圧電極側から照射した方が、 D が長くなる傾向があることが分かった。

さらに、 θ を一定にして Δt を変えた場合、 D は Δt が $+50\mu\text{s}$ 、 $0\mu\text{s}$ 、 $-50\mu\text{s}$ 、 $+100\mu\text{s}$ の順で短くなることが分かった。 Δt が $-50\mu\text{s}$ 、 $0\mu\text{s}$ の実験では、 θ が 90° 付近で D が長くなり、 Δt が $+50\mu\text{s}$ 、 $+100\mu\text{s}$ では 90° 付近で D が短く、 135° 付近で D が長くなる傾向が観測された。

これらの結果の要因として、レーザー誘起ブレイクダウンによる衝撃波の生成[4]や衝撃波後方の高温・低密度領域の流動の非対称性が放電に影響を及ぼしていると考えられ、放電距離のレーザー照射角度依存性が示唆された。

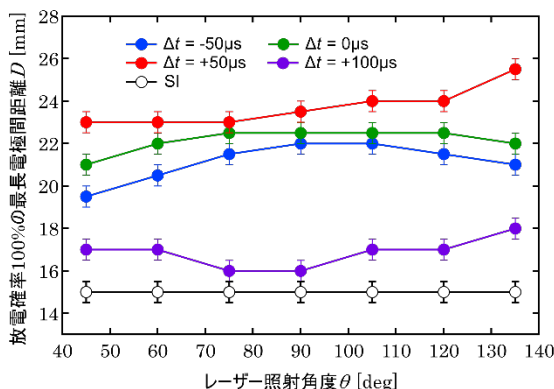


図 5 放電確率 100% の最長電極間距離 (D) のレーザー照射角度 (θ) 依存性

(2) 放電距離とレーザー光の照射タイミングの関係

レーザーブレイクダウン発生時のレーザープラズマの状態と高電圧印加タイミングの最適化によって、さらなる長距離放電が期待できる。そこで、レーザー光の照射と電極間電圧印加のタイミングが放電距離に及ぼす影響を明らかにするための実験を行った。

実験は、レーザー光の照射タイミング (Δt) が、 $-50\mu\text{s}$ (電極間電圧印加前にレーザー照射)、 $0\mu\text{s}$ (レーザー照射と同時に電極間電圧印加)、 $+25\mu\text{s}$ 、 $+50\mu\text{s}$ 、 $+75\mu\text{s}$ および $+100\mu\text{s}$ (電極間電圧印加後にレーザー照射) の 6 条件について、レーザー照射角度 (θ) を接地側の電極から 45° 、 60° 、 90° 、 120° 、 135° とした火花放電を行い、それぞれの場合において、放電確率 100% を維持する最大電極間距離 (D) を調べた。放電確率 100% の最長電極間距離 (D) のレーザー照射タイミング (Δt) 依存性を図 6 に示す。また、放電確率 100% の最長電極間距離 (D) とレーザー照射から放電までの時間 (ΔT) の関係を図 7 に示す。

図 6 から、 D は、 Δt が $+25\mu\text{s}$ まではほぼ一定で、 $+50\mu\text{s}$ で最も長く、その後は Δt の増加とともに減少するという傾向が見られ、 D の Δt 依存性が示唆された。

また、レーザー照射タイミングの放電特性として、 Δt が $-50\mu\text{s}$ 、 $0\mu\text{s}$ 、 $+25\mu\text{s}$ 、 $+50\mu\text{s}$ の場合は、 ΔT と Δt の時間差がほぼ同じ $70\mu\text{s}$ 前後で放電するのに対し、 Δt が $+75\mu\text{s}$ 、 $+100\mu\text{s}$ の場合は、レーザー照射とほぼ同時 ($\Delta T = 0\mu\text{s}$) で放電するという現象が観測された (図 7)。

電極間に印加する電圧波形は、立ち上がりから $65\mu\text{s}$ 付近で最大となる正弦波に近い波形である。したがって、 Δt が $-50\mu\text{s}$ ~ $+50\mu\text{s}$ では印加電圧が最大となる時間付近で常に放電していることが分かる。特に Δt が $+50\mu\text{s}$ では、レーザープラズマの発生から間もない時間で印加電圧が最大値になるために D が長くなり、 Δt が $+75\mu\text{s}$ 、 $+100\mu\text{s}$ では、印加電圧が低下している時間にレーザーを照射しているために $+50\mu\text{s}$ の場合よりも D が短くなると思われる。

一方、レーザーを照射してから放電までの時間が短いほど電極間距離の伸長が顕著に見られるが、 Δt が $-50\mu\text{s}$ 、 $0\mu\text{s}$ ではレーザー照射時に電極間に電圧が印加されていなくても D

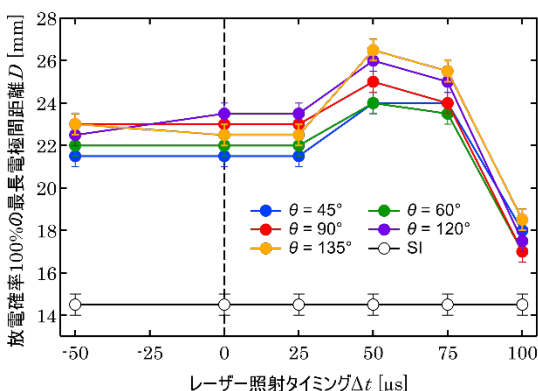


図 6 放電確率 100% の最長電極間距離 (D) のレーザー照射タイミング (Δt) 依存性

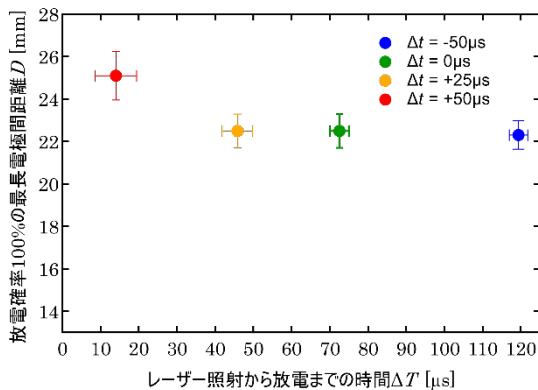


図 7 放電確率 100% の最長電極間距離 (D) とレーザー照射から放電までの時間 (ΔT) の関係

が+100 μ sの場合よりも長いことや、 Δt が+100 μ sではDがSIの場合に近いものの、放電時の電極間印加電圧値がSIに比べて大幅に低い値で放電していることが分かった。

これらの結果の要因として、レーザープラズマの形成過程が放電に影響を及ぼしていると考えられ、印加電圧最大値付近の時間でレーザーを照射した場合に最も長い放電距離が得られることや、印加電圧最大値付近を境にして、レーザープラズマの支援が強く作用する場合とレーザー照射時の印加電圧値が強く作用する場合があることが示唆された。

(3) レーザー誘起ブレイクダウンによる火花放電現象

レーザー誘起ブレイクダウンによって引き起こされる火花放電の特性を調べるために、Intensified CCDカメラで放電の様子を撮影した。この実験では図8に示すように、レーザー光の照射方向を基準($\theta = 0^\circ$)として接地電極とのなす角を角度(θ)としている。

放電の一例を図9に示す。各画像において、画像の上側が接地電極、下側が高圧電極で、レーザーは右側から照射している。上段は Δt が+50 μ s、下段は Δt が-50 μ sで、左側から θ がそれぞれ45 $^\circ$ 、90 $^\circ$ 、135 $^\circ$ の画像である。

Δt が+50 μ s (ΔT がおよそ10 μ s)では、電極間の中央部に強いレーザープラズマの発光が観測されている。一方、 Δt が-50 μ s (ΔT がおよそ120 μ s)では、レーザープラズマの発光が弱く、さらに形状が画像の上下方向に細長く伸びているが、 θ が90 $^\circ$ の場合では電極間距離が+50 μ sと比べて2mm短い程度であることから、本実験では、レーザープラズマの放電に及ぼす影響が120 μ s以上持続していると推察される。

各画像を比べると、プラズマの形状や放電路に違いが見られ、電極間距離のレーザー光の照射角度や照射タイミング依存性にはレーザープラズマの形成過程[5]が影響していることが示唆された。

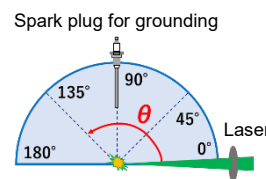


図8 放電画像における角度(θ)

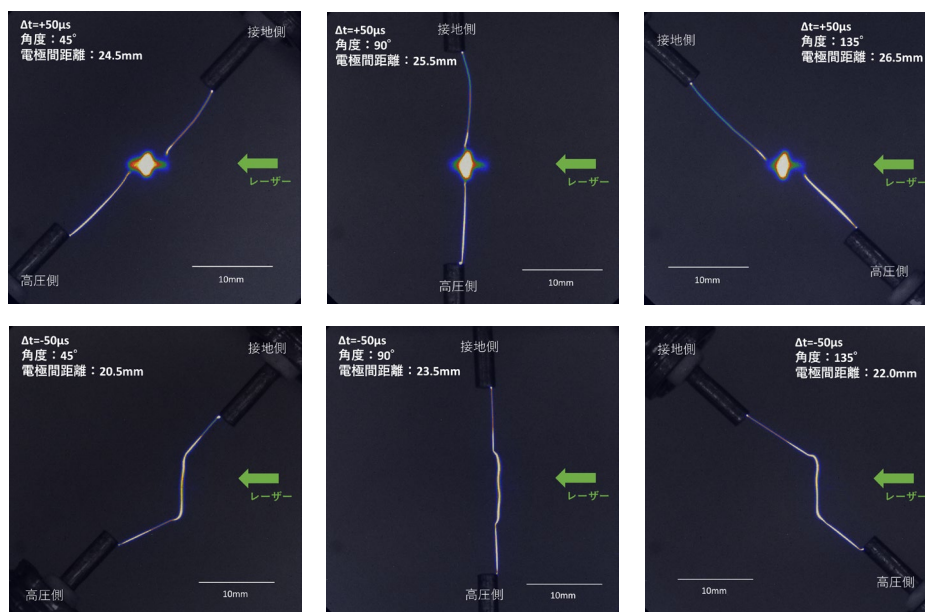


図9 レーザーブレイクダウンによって引き起こされる火花放電現象

(4) まとめ

本研究において、レーザーで生成するプラズマの衝撃波方向と電極間に印加する電圧方向との関係や、レーザープラズマの形成過程と電極間に印加する電圧のタイミングが、放電距離の長い火花放電の発生に強く影響していることが明らかとなり、火花放電の放電距離を制御する手法に関する指針や、放電路の長尺化に対するエネルギー効率の最適化を検討する際に必要となる成果が得られた。

<引用文献>

- [1] https://www.jst.go.jp/sip/k01_kadai.html
- [2] Briggs, T., Alger, T., and Mangold, B., "Advanced Ignition Systems Evaluations for High-Dilution SI Engines," SAE Int. J. Engines 7(4):1802-1807 (2014).
- [3] "レーザー誘起型火花放電点火装置", 特開 2009-97427.
- [4] 遠藤琢磨, "レーザー誘起ブレイクダウンの物理とそれがもたらす点火特性", 日本燃焼学会, Vol.59, No.189, pp.172-183 (2017).
- [5] S. S. Harilal, B. E. Brumfield, M. C. Phillips, "Lifecycle of laser-produced air sparks", Phys. Plasmas 22, 063301 (2015).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 瀬川泰聖、秋濱一弘、大熊康典、高橋栄一、山崎博司、今村宰
2. 発表標題 レーザーブレイクダウン支援火花放電点火における放電特性に関する研究
3. 学会等名 日本大学生産工学部 第55回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀬川泰聖、今村宰、大熊康典、山崎博司、秋濱一弘
2. 発表標題 レーザー誘起ブレイクダウンによる長距離火花放電に関する研究
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第38回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤佑哉、秋濱一弘、大熊康典、山崎博司、今村宰
2. 発表標題 レーザー誘起ブレイクダウンによる長距離火花放電に関する研究
3. 学会等名 日本大学生産工学部 第54回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤佑哉、今村宰、大熊康典、山崎博司、秋濱一弘
2. 発表標題 レーザー誘起ブレイクダウンによる長距離火花放電に関する研究
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第37回年会
4. 発表年 2020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
連携研究者	秋濱 一弘 (AKIHAMA Kazuhiro) (30394547)	日本大学・生産工学部・教授 (32665)	

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
---------	---------