

令和 2 年 5 月 19 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06199

研究課題名(和文) 低温プラズマによる高含水バイオ燃料の革新的燃焼技術の構築

研究課題名(英文) Development of innovative combustion technology for high water content biofuel by low temperature plasma

研究代表者

田上 公俊 (Tanoue, Kimitoshi)

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：60284783

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高含水バイオ燃料利用のために低温プラズマを用いた点火・燃焼技術の構築を目的とする。発電用エンジンでは「副室式点火」を用いて希薄燃焼時の点火と燃焼促進を実現している。副室式点火は、主燃焼室とは別に小型の副室を設け、副室で燃焼させたガスをトーチ火炎として噴出させる点火方式である。本研究では、定容燃焼器を用いた可視化実験により熱プラズマと低温プラズマを用いた場合の発電用エンジンの副室式点火の燃焼特性について調べた。その結果、副室を用いた低温プラズマ点火においてトーチ火炎の成長形態は熱プラズマと異なるが、熱プラズマと同様に、主室を燃焼出来ることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球環境問題から各国でバイオ燃料の利用が推進されているが、現状では水分をほとんど含まない高純度(99%以上)なバイオ燃料の利用に限られているため、高純度化による高コスト化が特にアジア発展途上国でのバイオ燃料の普及の妨げとなっている。発展途上地域で容易かつ安価に製造できる水含有量50%程度の高含水バイオ燃料を発電に利用できれば、農産物から燃料製造、エネルギー利用まで完結した、いわゆる地産地消で利用できるシステムが提案可能となる。本研究の成果は発電用エンジンで用いられる副室式点火で低温プラズマの利用が可能であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop ignition and combustion technology using low-temperature plasma for high water content biofuel utilization. The engine for power generation uses "prechamber ignition system" to realize ignition and combustion promotion of lean combustion. Prechamber ignition system is an ignition method in which a small prechamber is provided in addition to the main combustion chamber, and the gas burned in the prechamber is ejected to the main chamber as a torch flame. In this study, we investigated the combustion characteristics of prechamber ignition system of a power generation engine using thermal plasma and low temperature plasma by a visualization experiment using a constant volume combustor. As a result, it was found that in the low temperature plasma ignition using the prechamber, although the torch flame growth pattern is different from that of the thermal plasma, the mixture in the main chamber can be burned like the thermal plasma.

研究分野：熱工学

キーワード：Low temperature plasma Combustion Ignition

1. 研究開始当初の背景

現在、地球温暖化問題や資源枯渇問題が深刻化する中、自然エネルギーへの関心が高まっている。中でもバイオマスはカーボンニュートラルな特徴を有する環境調和型のエネルギー資源としてその役割が強調されているが、急激に高まる発展途上国、特にアジア諸国のエネルギー需要に対してバイオマス利用をいかに普及・拡大するかが大きな課題の一つとなっている。現状、バイオ燃料の利用は水分をほとんど含まない高純度(99%以上)なバイオ燃料を使用する方法が一般的である。しかしながら、バイオ燃料を高純度化するためには、高価な製造設備が必要であり、さらに蒸留に多くのエネルギーを供給する必要があるため、発展途上国でのバイオマス利用の普及の妨げとなっている。高含水バイオ燃料の燃焼利用に際しては、特に点火と燃焼の安定性が問題となっている。燃料に含まれる水分量の増加は、最小点火エネルギーの急激な増加、燃焼速度の低下などが起こり、燃焼器稼働時に出力の低下、燃費の悪化、排気特性の悪化、騒音の発生など、さまざまな問題を引き起こすため、高含水バイオ燃料を有効利用するためにはこれまでにない燃焼技術を必要とする。本研究では、「低温プラズマ」を利用した点火・燃焼技術の基礎を構築し、地産地消型高含水バイオ燃料(水含有量 50%)の革新的点火・燃焼技術の確立を目指す。

2. 研究の目的

地球環境問題から各国でバイオ燃料の利用が推進されているが、現状では水分をほとんど含まない高純度(99%以上)なバイオ燃料の利用に限られているため、高純度化による高コスト化が特にアジア発展途上国でのバイオ燃料の普及の妨げとなっている。発展途上地域で容易かつ安価に製造できる水含有量 50%程度の高含水バイオ燃料を発電に利用できれば、農産物から燃料製造、エネルギー利用まで完結した、いわゆる地産地消で利用できるシステムが提案可能となる。高含水バイオ燃料を燃焼器で利用する場合、特に点火と、燃焼の安定性が問題となる。本研究では、高含水バイオ燃料利用のために低温プラズマを用いた革新的点火・燃焼技術の構築を目的とする。発電用エンジンでは「副室式点火」を用いて希薄燃焼時の点火と燃焼促進を実現している。副室式点火は、主燃焼室とは別に小型の副室(主室の5%以下程度)を設け、副室で燃焼させたガスをトーチ火炎として噴出させることで、主燃焼室内の希薄混合気を点火、燃焼させるという点火方式である。本研究では、定容燃焼器を用いた可視化実験により熱プラズマと低温プラズマを用いた場合の発電用エンジンの副室式点火の燃焼特性について調べた。

3. 研究の方法

本研究では図1に示すような定容燃焼器[3]を用いた。本燃焼装置は約 13L の主燃焼室(以降、主室)の内部に副室が設置されている。副室容積は主室容積の0.65%となっており、副室と主室は直径6mmの噴口を介して繋がっている。主室内下部には混合気を均一に攪拌するために、サーボモータにより駆動するファンが取り付けられている。主室に予混合気を形成後、予混合気タンクを用いて副室の燃料充填を行う。予混合気を主室と副室に形成後、副室内に設けた点火プラグにより点火し副室からのトーチ火炎により主室を燃焼させる。熱プラズマ点火実験では市販の自動車用点火装置を用い、低温プラズマ点火実験では、IES 式パルス電源[4]を用いて燃焼実験を行った。点火プラグにはそれぞれ、市販の自動車用点火プラグと低温プラズマ専用プラグを用いた。主燃焼室の水平4方向には直径150mmの石英観測窓が備えられており、高速度カメラを用いたシャドウグラフ法により主室の燃焼を観測した。また燃料はメタンを用いた。

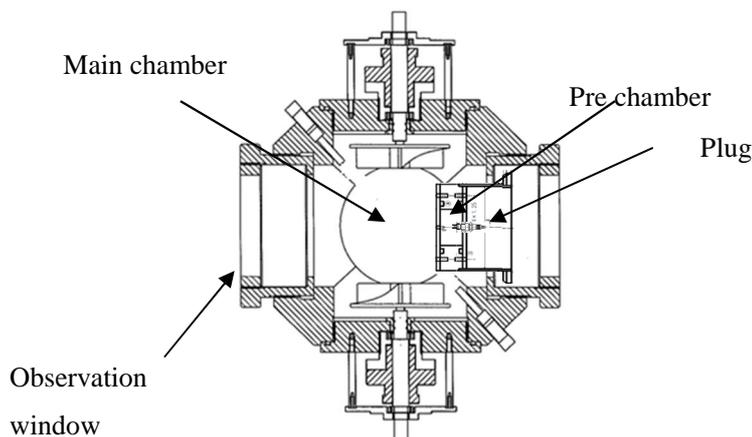


Fig.1 Cross-section view of combustion chamber

4. 研究成果

(1) 低温プラズマの点火特性

本研究では、まず低温プラズマと熱プラズマの点火特性を調べるために、副室を用いずに点火実験を行い、点火直後の火炎核形成の可視化画像から、画像解析により火炎面積の変化を算出し比較した。火炎面積は放電開始時から 1ms 間隔で 5ms までの初期火炎を対象とした。ここで点火プラグと重なる領域においては、点火プラグの部分を除いて火炎のみを計測した。

図 2 に初期温度 300K、初期圧力 0.3MPa、当量比 $\phi=1.0$ 、 $\phi=0.8$ に対して、低温プラズマ(Low-temperature plasma 以降 LTP)と熱プラズマ(Thermal-plasma 以降 TP)の火炎面積の時間変化の比較を示す。ここで $A/A_{basis}[-]$ は各条件における火炎面積 $A[\text{mm}^2]$ を当量比 $\phi=1.0$ の熱プラズマ点火に対する火炎面積 $A_{basis}[\text{mm}^2]$ で除して無次元化した値である。図より当量比 $\phi=0.8$ 、 $\phi=1.0$ の両条件において、同時刻における火炎面積は熱プラズマ点火の方が低温プラズマ点火に比べ大きい。すなわち初期火炎の成長速度は熱プラズマ点火の方が速いことがわかる。

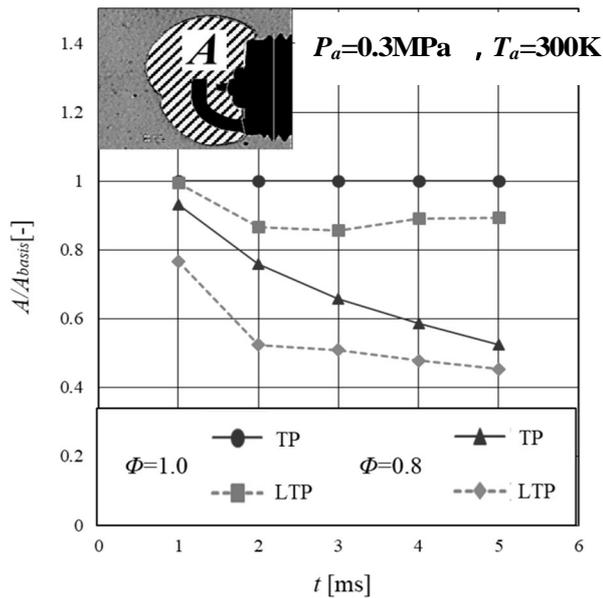


Fig.2 Comparison of initial combustion between thermal plasma and low-temperature plasma

(2) 副室点火における低温プラズマの点火特性

次に本研究では定容燃焼器に副室を取り付けて燃焼実験を行った。実験は初期温度 300K, 初期圧力 0.3MPa, 当量比 $\phi=1.0$, $\phi=0.8$ の条件で, 主室燃焼の可視化を行った。

図 3 に当量比 $\phi=1.0$ における点火後から 6ms までのトーチ火炎のシュリーレン写真を, 低温プラズマ, 熱プラズマそれぞれ示す。また図 4 に $\phi=0.8$ におけるシュリーレン写真を示す。

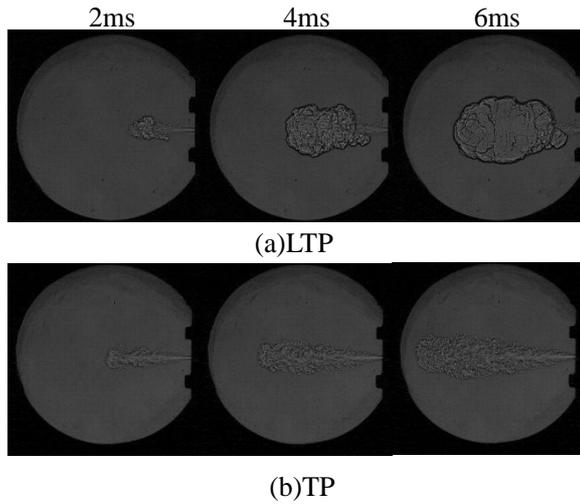


Fig.3 Schlieren photographs of the flame kernel formation at 0.3MPa, $\phi=1.0$

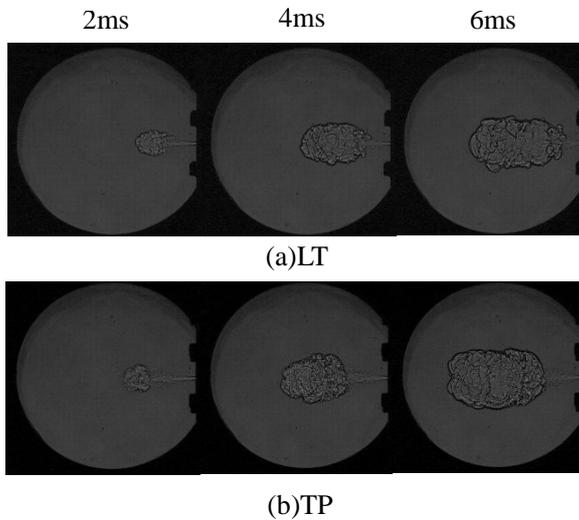


Fig.4 Schlieren photographs of the flame kernel formation at 0.3MPa, $\phi=0.8$

図から低温プラズマを用いた場合でも熱プラズマ同様に副室内からのトーチ火炎により主室を燃焼出来ることが確認できる。また図 3 から当量比 $\phi=1.0$ の熱プラズマと低温プラズマのトーチ火炎を比較すると, トーチ火炎の形状が大きく異なることがわかる。また同時刻で比較すると, 熱プラズマのトーチ火炎の成長は, 低温プラズマより早いことがわかる。

図 4 から当量比 $\phi=0.8$ のトーチ火炎に対しても, 当量比 $\phi=1.0$ と同様に熱プラズマのトーチ火炎の成長は低温プラズマより早い, $\phi=1.0$ とは異なり両トーチ火炎の形状が類似していることがわかる。

次に本研究では, 得られた画像からトーチ火炎の成長の定量化を試みた。本研究ではトーチ火炎成長の指標としてトーチ火炎の噴口から主室内での水平方向の到達距離 L を定義し, 火炎の噴出後, 6ms 後までの値を算出し低温プラズマと熱プラズマで比較した。

図 5 に $\phi=1.0$, $\phi=0.8$ の条件におけるトーチ火炎の到達距離 L の時間変化を, 低温プラズマ (LTP), 熱プラズマ (TP), それぞれに対して示す。ここで実験は 1 条件につき 5 回の試行回数を行い, 平均距離を求めた。

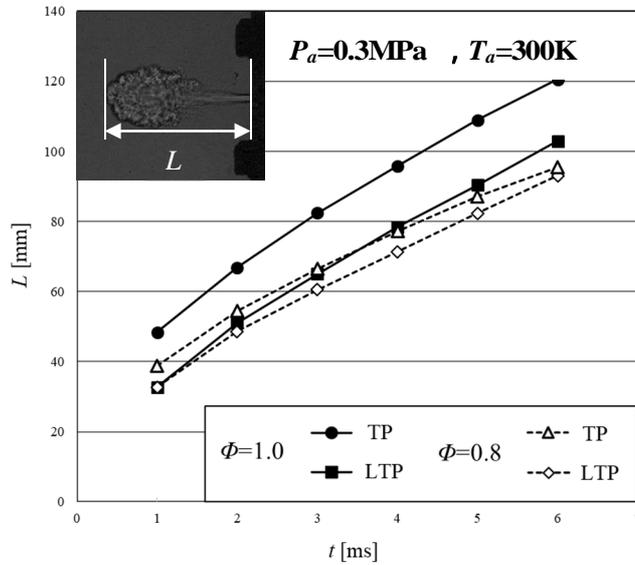


Fig.5 Variations of L with t for both LTP and TP

図から噴出後 1ms の初期トーチ火炎においては、 $\phi=1.0$ 、 $\phi=0.8$ の両条件において、熱プラズマのトーチ火炎の成長速度は低温プラズマより速いことがわかる。これは図 2 で示したように、点火直後の火炎核の成長は熱プラズマの方が低温プラズマに比べ早いため、熱プラズマの副室内での圧力上昇が早くなり、これにより噴出直後のトーチ火炎の噴出速度が早くなったためと考えられる。また両当量比を比較すると、低温プラズマと熱プラズマの成長の差異は、 $\phi=1.0$ に比べて $\phi=0.8$ の希薄条件で小さくなることからわかる。これは希薄条件においては混合気の燃焼速度が低下するため、相対的にトーチ火炎の成長速度の差異が小さくなったものと考えられる。以上のことから、副室を用いた低温プラズマ点火においてトーチ火炎の成長形態は熱プラズマと異なるが、熱プラズマと同様に、主室を燃焼出来ることがわかった。

< 参考文献 >

1. Tanoue, K., et al., *Applied Thermal Engineering*, 115, 64-71, (2017).
2. Moriyoshi, Y., et al., International Conference SIA Powertrain Versailles 2017.
3. Tanoue, K., et al., *Transactions of Society of Automotive Engineering of Japan*, 43, 1021-1026, (2012).
4. Shimizu, N., Sekiya, T., Iida, K., Imanishi, Y., Kimura, M., Nishizawa, J., *Prog. 2004 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs*, 281-284, (2004).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 橋本淳, 甲斐健太郎, 後藤大輝, 高橋美沙紀, 伊東朋晃, 足立久也, 田上公俊	4. 巻 50
2. 論文標題 イソオクタン/トルエン/アルコール燃料の筒内模擬液面燃焼におけるすす生成特性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 1294-1299
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Tanoue Kimitoshi, Kimura Takanori, Jimoto Taishu, Hashimoto Jun, Moriyoshi Yasuo	4. 巻 115
2. 論文標題 Study of prechamber combustion characteristics in a rapid compression and expansion machine	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Thermal Engineering	6. 最初と最後の頁 64~71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.079	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 橋本 淳, 足立久也, 伊東朋晃, 高橋美沙紀, 田上公俊	4. 巻 48
2. 論文標題 Toluene reference Fuel 火炎における芳香族炭化水素の生成特性	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 1201-1206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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25件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 高山泰佳, 佐竹洋輔, 上野聖矢, 嶋田不美生, 田上公俊
2. 発表標題 炭化水素混合燃料の消炎特性に関する研究
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田篤人, 前田直人, 斎藤輝行, 和久哲志, 盛 大輔, 嶋田不美生, 田上公俊, 森吉泰生
2. 発表標題 急速圧縮膨張装置を用いた副室式点火の着火・燃焼機構に関する研究
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 斎藤輝行, 前田篤人, 前田直人, 和久哲志, 盛 大輔, 嶋田不美生, 田上公俊, 森吉泰生
2. 発表標題 急速圧縮膨張装置を用いた副室点火燃焼の相似則に関する研究
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐竹洋輔, 高山泰佳, 上野聖矢, 嶋田不美生, 田上公俊, 小嶋健, 内木武虎, 渡邊学
2. 発表標題 炭化水素混合燃料の燃焼特性に関する研究
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上野聖矢, 高山泰佳, 佐竹洋輔, 嶋田不美生, 田上公俊, 森吉泰生
2. 発表標題 炭化水素燃料を用いた副室式点火の基礎燃焼特性に関する研究
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田直人, 前田篤人, 斎藤輝行, 和久哲志, 盛 大輔, 嶋田不美生, 田上公俊, 森吉泰生
2. 発表標題 急速圧縮膨張装置を用いた副室式点火の着火および燃焼特性に関する研究
3. 学会等名 第30回内燃機関シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三代泰輔, 前田琢磨, 佐竹洋輔, 田上公俊, 嶋田不美生, 小畑健, 内木武虎, 渡邊学
2. 発表標題 各種炭化水素系燃料の層流燃焼特性に関する研究- 層流燃焼速度について
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大石裕太, 伊東朋晃, 前田直人, 前田篤人, 斎藤輝行, 嶋田不美生, 田上公俊, 森吉泰生
2. 発表標題 急速圧縮膨張装置を用いた副室式点火の基礎燃焼特性に関する研究
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊東朋晃, 大石裕太, 前田直人, 前田篤人, 斎藤輝行, 嶋田不美生, 田上公俊, 森吉泰生
2. 発表標題 急速圧縮膨張装置を用いた副室式点火の基礎燃焼特性に関する研究
3. 学会等名 第29回内燃機関シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野島亮, 嶋田賢治, 嶋田不美生, 田上公俊, 森吉泰生
2. 発表標題 定容燃焼器を用いた副室式点火の基礎燃焼特性に関する研究
3. 学会等名 第29回内燃機関シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐竹洋輔, 三代泰輔, 前田琢磨, 嶋田不美生, 田上 公俊
2. 発表標題 炭化水素燃料の燃焼特性に及ぼすフラン添加の影響
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第72期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 嶋田賢治, 野島亮, 嶋田不美生, 田上公俊, 森吉泰生
2. 発表標題 定容燃焼器を用いた副室式点火の基礎燃焼特性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第72期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田篤人, 伊東朋晃, 大石裕太, 前田直人, 斎藤輝行, 嶋田不美生, 田上公俊, 森吉泰生
2. 発表標題 ガスエンジン用副室点火式大型急速圧縮膨張装置の開発
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第72期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本 淳, 足立久也, 伊東朋晃, 高橋美沙紀, 田上公俊
2. 発表標題 イソオクタン・トルエン混合燃料火炎における芳香族炭化水素の生成特性
3. 学会等名 自動車技術会春季大会講演論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊東 朋晃, 高橋美紗紀, 足立 久也, 橋本 淳, 田上 公俊
2. 発表標題 プロパン拡散火炎の芳香族炭化水素生成特性に圧力が及ぼす影響
3. 学会等名 第55回燃焼シンポジウム講演論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今富 優貴, 三代 泰輔, 田上 公俊, 田中 光太郎, 小畠 健
2. 発表標題 ペンテンおよびペンタン異性体の基礎燃焼特性に関する研究
3. 学会等名 第55回燃焼シンポジウム講演論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山元 太聖, 大石 裕太, 橋本 淳, 嶋田 不美生, 田上 公俊, 森吉 奏生
2. 発表標題 急速圧縮膨張装置のノック特性に及ぼす自着火伝ば火炎の影響
3. 学会等名 第55回燃焼シンポジウム講演論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 足立 久也, 高橋美紗紀, 伊東 朋晃, 橋本 淳, 田上 公俊
2. 発表標題 プール燃焼を模擬した反応帯における芳香族炭化水素の成長に関する研究
3. 学会等名 第55回燃焼シンポジウム講演論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 畑 伸一郎, 野島 亮, 田上 公俊, 嶋田 不美生, 森吉 泰生
2. 発表標題 低温プラズマを用いた副室式点火の燃焼特性に関する研究
3. 学会等名 第55回燃焼シンポジウム講演論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 橋本 淳, 足立 久也, 伊東 朋晃, 高橋美紗紀, 田上 公俊
2. 発表標題 模擬筒内プール燃焼場における粒子状物質の成長に関する研究
3. 学会等名 第28回内燃機関シンポジウム講演論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山元 太聖, 大石 裕太, 橋本 淳, 田上 公俊, 森吉 泰生
2. 発表標題 急速圧縮膨張装置による副室式点火の燃焼特性に及ぼす圧力および燃料性状の影響
3. 学会等名 第28回内燃機関シンポジウム講演論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大石 裕太, 山元 太聖, 田上 公俊, 嶋田 不美生, 田中 光太郎, 小畠 健
2. 発表標題 ペンテンおよびペンタン異性体の着火遅れ時間に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第71期総会・講演会講演論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野島 亮, 畑 伸一郎, 田上 公俊, 嶋田 不美生, 森吉 泰生
2. 発表標題 低温プラズマを用いた副室式点火の燃焼特性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第71期総会・講演会講演論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三代 泰輔, 今富 優貴, 田上 公俊, 田中 光太郎, 小畠 健
2. 発表標題 ペンテンおよびペンタン異性体の基礎燃焼特性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第71期総会・講演会講演論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasuo Moriyoshi, T. Kuboyama, O. Matsumoto, T. Nakamura, Y. Kinuzawa, Kimitoshi Tanoue
2. 発表標題 A Novel Low-Temperature Plasma Ignition System Applied to a GHP Engine
3. 学会等名 INTERNATIONAL CONFERENCE SIA Powertrain Versailles 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 田上公俊, 森吉泰生, 堀田栄喜	4. 発行年 2019年
2. 出版社 株式会社エヌ・ティ・エス	5. 総ページ数 183-195
3. 書名 パルスパワーの基礎と産業応用	

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----