

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04330

研究課題名（和文）副室トーチ火炎を用いた能動的ノッキング制御技術の構築に関する研究

研究課題名（英文）Study on the development of active knocking control using a pre-chamber torch flame

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的はノッキングの現象解明と、副室からのトーチ火炎により、能動的にノッキング強度を低減する技術の確立である。本研究では、急速圧縮膨張装置を用いた可視化実験により副室点火時のノッキングについて調べた。ノッキング研究に関して研究代表者らは既報でRCEMを用いた実験により燃料の自着火特性とノック強度との関係を調べ、火花点火機関のノック強度には、燃料性状および自着火時の温度場が影響を及ぼすことを報告した。副室点火ではトーチ火炎により自着火時の温度場が大きく変化するため、ノッキング特性が火花点火機関とは異なる可能性がある。そこで本研究では副室点火時のノッキング特性を詳細に調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SDGs「エネルギー」関連の目標達成のためには化石燃料のさらなる高効率・低公害な利用技術の確立が求められている。現在、運輸・発電分野におけるエネルギー利用の主力である火花点火エンジンの熱効率向上のために高過給・高圧縮比化がすすめられているが、高過給・高圧縮比化により異常燃焼（ノッキング）が発生しやすくなることから、ノッキングの現象解明および回避策の確立は熱効率向上に際して重要な課題となっている。本研究結果では副室からの噴流ガスの噴出特性とノッキングの発生現象には相関があることがわかった。このことから今後の能動的制御の基礎データとなるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to elucidate the phenomenon of knocking and to establish a technique to actively reduce the knocking intensity by means of a torch flame from the pre-chamber. In this study, knocking was investigated by visualization experiments using a rapid compression and expansion machine. In a previous study, the authors investigated the relationship between fuel auto-ignition characteristics and knock strength and reported that fuel properties and the temperature field during auto-ignition have an effect on knock strength in spark-ignition engines. In the case of a pre-chamber ignition system, the knocking characteristics may be different from those of a spark-ignition engine because the temperature field during auto-ignition is greatly changed by the torch flame. In this study, the knocking characteristics were investigated in detail by changing the shape of the pre-chamber.

研究分野：熱工学

キーワード：燃焼 副室式点火燃焼 内燃機関

1. 研究開始当初の背景

SDGs「エネルギー」関連の目標達成のためには化石燃料のさらなる高効率・低公害な利用技術の確立が求められている。現在、運輸・発電分野におけるエネルギー利用の主力である火花点火エンジンの熱効率向上のために高過給・高圧縮比化がすすめられているが、高過給・高圧縮比化により異常燃焼（ノッキング）が発生しやすくなることから、ノッキングの現象解明および回避策の確立は熱効率向上に際して重要な課題となっている。本研究の目的はノッキングの現象解明と、副室からのトーチ火炎により、能動的に燃焼室に温度勾配を制御することでノッキング強度を低減する技術の確立である。

2. 研究の目的

現在、地球規模での環境問題、エネルギー資源枯渇問題の深刻化対策として、エンジン技術において高効率・低公害な利用技術の確立が求められている中、エンジンの高効率化の有効な一手段として希薄燃焼²⁾があげられるが、燃焼速度の低下や失火といった問題が生じる。この対策として「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、急速圧縮膨張装置(Rapid Compression Expansion Machine: RCEM)を用いた可視化実験によりエンジンの副室式燃焼特性について調べた。ノッキング研究に関して研究代表者らは既報で RCEM を用いた実験により燃料の自着火特性とノック強度との関係を調べ、Zeldovich, Bradley らの理論を適用することにより、火花点火機関のノック強度には、燃料性状および自着火時の温度場が影響を及ぼすことを報告した。副室点火ではトーチ火炎により自着火時の温度場が大きく変化するため、ノッキング特性が火花点火機関とは異なる可能性がある。そこで本研究では副室形状を変え、副室点火時のノッキング特性を詳細に調べた。

3. 研究の方法

図1、図2に本研究で用いた急速圧縮膨張装置(RCEM)の概略図と燃焼室の詳細図をそれぞれ示す。本装置は既存の RCEM⁶⁾の燃焼室に副室を設置することで、副室式ガスエンジンの圧縮・膨張過程の1回分を模擬することが可能である。また主燃焼室の上部に石英観測窓を備えており、主燃焼室全域を観察することができる。本研究では高速度カメラを用いて燃焼室上部から撮影を行い、燃焼の様子を観察した。

図3に副室の詳細図を示す。副室は容積、噴口径、噴口数、点火位置の変更が可能である。本研究では容積 2.23 cc、TDC 時主室との容積比 4.17%、ノズル長さ 2 mm の副室を用いた。また点火位置は図3に示すように噴口から離れた点火位置 A と噴口近傍の点火位置 B で実験を行った。主室と副室にそれぞれピエゾ式圧力センサを取り付けることで燃焼室内の圧力の測定を行った。本研究は回転数を 650 rpm、圧縮比を 9.8、初期温度 T_0 を 303 K、点火時期 θ_{ig} は 23 deg.BTDC とした。燃料はプロパン・空気予混合気を用いて、当量比は 0.7 および 0.8 とした。

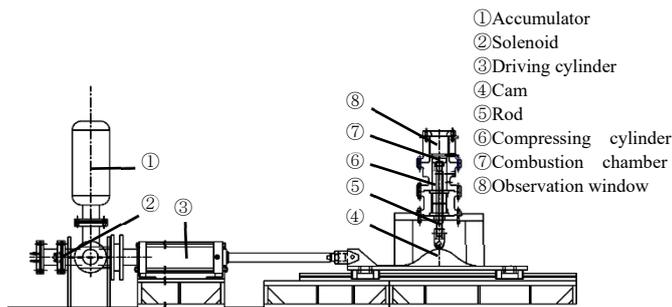


Fig.1 Rapid Compression Expansion Machine

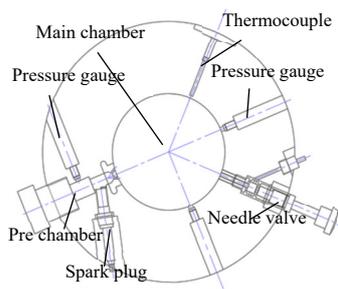


Fig.2 Combustion chamber

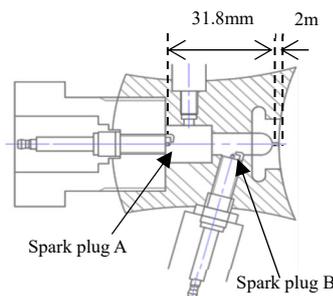


Fig.3 The position of ignition

4. 研究成果

本研究では副室式燃焼におけるノッキング特性について調べた。実験は点火位置を **B** に固定し、ノッキングを発生させるために初期圧力 0.2 MPa, 当量比 $\phi=0.8$ とし、噴口数を 1 穴と 2 穴で変更して実験を行った。ここで 1 穴, 2 穴の総噴口断面積は約 3.5mm² であり、等しくなるように設計した。

図 4, 図 5 にノッキング時の燃焼画像を示す。図 4 から 1 穴では火炎が壁面衝突後、壁にそって移動し、約 12 deg.ATDC で噴口近くの壁面近傍で自着火が生じてノッキングに至っている。一方、2 穴では 2 つの火炎が両端から接近し、約 7.7 deg.ATDC で燃焼室中央付近において自着火が生じてノッキングに至っている。以上のようにトーチ火炎の形態は、自着火位置に影響を及ぼすことがわかる。

図 6, 図 7 に各噴口における主室と副室の筒内圧力履歴および主燃焼室の熱発生率をそれぞれ示す。図より各噴口における圧力履歴を比較すると 1 穴は 2 穴に比べ副室の圧力上昇が急峻となり、その結果、主室の圧力および熱発生率がトーチ火炎の噴出初期において急峻となった後、副室からの噴出を終える 15 deg.BTDC 付近から減少している。これは図 4 の燃焼画像よりトーチ火炎の速度が壁面近傍で速度が減衰し、また壁に衝突したことによる火炎面の減少および熱損失増大の影響と考えられる。その後、約 12 deg.ATDC における圧力、熱発生履歴の急峻な上昇とともに圧力振動が発生していることからノッキングの発生が確認できる。一方、2 穴の圧力および熱発生率履歴でも 1 穴と同様に噴出初期に熱発生率の上昇と、火炎が壁面に近づき衝突する約 10 deg.BTDC での熱発生率の減少が確認できる。その後、約 7.7 deg.ATDC 付近でノッキングが確認できる。

次に筒内圧力履歴を FFT 解析することでノッキング時の圧力振動を詳細に調べた。

図 8 に FFT 解析の結果を示す。本研究ではこの結果を基に主室の圧力波形に 5 kHz のハイパスフィルタ処理を施しその圧力振幅の最大値から最小値を減じた値をノック強度とした。

図 9 に各噴口におけるノック強度を示す。ノック強度は 1 穴と 2 穴でそれぞれ、0.85 MPa, 0.64 MPa となり、1 穴の方がノック強度は大きくなった。各噴口数におけるノッキング発生前の未燃混合気質量割合 MF_{ub} を求めたところ、1 穴が 20%, 2 穴で 27% となり、ノッキング発生時の未燃混合気量に大きな差はなく、ノック強度との相関は確認できなかった。しかしながら振動周波数に差異が生じていることから以下ではノッキング時の周波数振動モードを調べた。

エンジン内の圧力波の共振に関して Draper は円筒座標系の波動方程式の解析解を導出した⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。2次元の場合以下の共振周波数が得られる。

$$f_{m,n} = \frac{a \cdot \rho_{m,n}}{\pi \cdot B} \quad (1)$$

ここで a は音速、 B はボア径、 $\rho_{m,n}$ はモード係数である。音速 a は以下の式で表される。

$$a = \sqrt{\kappa RT} \quad (2)$$

ここで、 κ は比熱比、 R は気体定数、 T は筒内温度である。

また、各モード(m, n)におけるモード係数 $\rho_{m,n}$ は、壁面境界条件から以下の式を満たす解である。

$$J'_m(\rho_{m,n}) = 0 \quad (3)$$

ここで J'_m は m 次の第一種ベッセル関数の導関数である。

表 1 に各振動モードにおけるモード図とモード係数を示す。

表 2 に各振動モードを仮定したときの状態方程式から求めた温度 T_{all} を用いて求めた理論モード周波数 $F_{m,n}$ 及び断熱火炎温度 T_{ad} より求めた理論モード周波数 F_{Tad} を示す。ここで、断熱火炎温度 T_{ad} は点火時の筒内状態($P_0=22.5$ atm, $T_u=528$ K)を初期条件として定容断熱の条件で求めた。

図 8 から実験で求めた圧力スペクトルでは 1 穴で 6.7 kHz, 2 穴で 14.3 kHz, 19.8 kHz, 26.1 kHz に主なピーク値が存在した。各温度から求めた理論周波数と燃焼画像によるノッキングの発生位置を考慮すると 1 穴は(1,0)モード, 2 穴は(0,1), (1,1), (0,2)モードがノッキング時の主な振動モードであると考えられるが、どちらも理論値とは差異が生じている。これは推定した温度が実際の燃焼場の温度と異なることが原因と考えられる。ノッキング特性の解析およびモデリングにはノッキング発生時の温度の推定が重要であることから、本研究では共振周波数から導出される音速から燃焼室内の温度を推定した。圧力波を用いた温度の推定に関しては Livengood ら⁽¹³⁾, Hickling ら⁽¹⁴⁾が行っているが、本研究ではノッキング時の共振周波数 F_{knock} から式(1)(2)を用いてノッキング時の燃焼室平均温度 T_{knock} の推定を行った。

表 3 にノッキング時の温度 T_{knock} の推定結果を示す。各ピーク値において他のモード固有値を用いて温度も算出を行ったが、妥当な結果が得られなかった。得られた T_{knock} と表 3 の各温度を比較すると推定した温度 T_{knock} は全ての周波数で約 2350~2400 K となり近い値となった。この値は状態方程式から求めた温度 T_{all} より高く、断熱火炎温度 T_a に近い値となった。熱損失を考慮すると、ノッキング時の燃焼場の平均温度が既燃ガス温度に近い値で現象が生じていると考えられる。

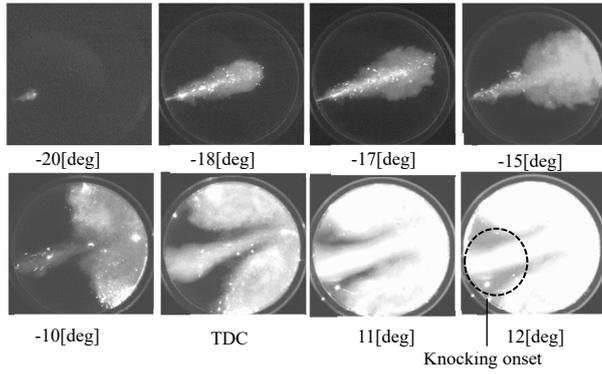


Fig.4 Photographs of flame shape (knocking, 1hole)

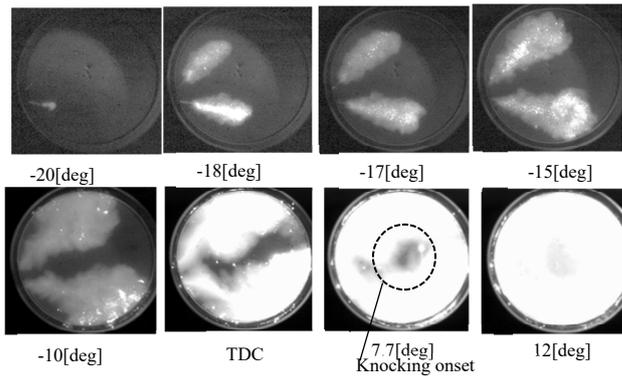


Fig.5 Photographs of flame shape (knocking, 2hole)

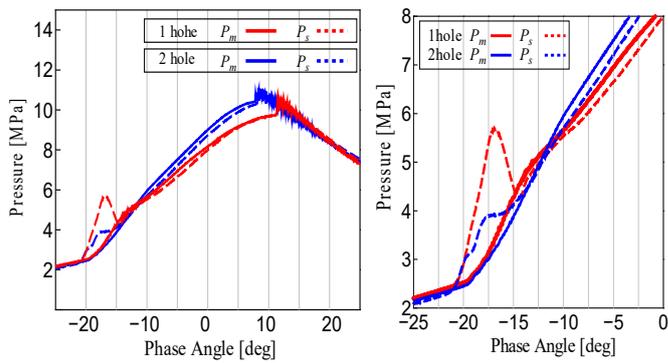


Fig.6 Pressure history (knocking)

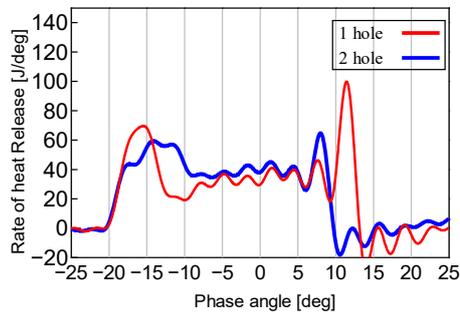


Fig.7 Rate of Heat Release (knocking)

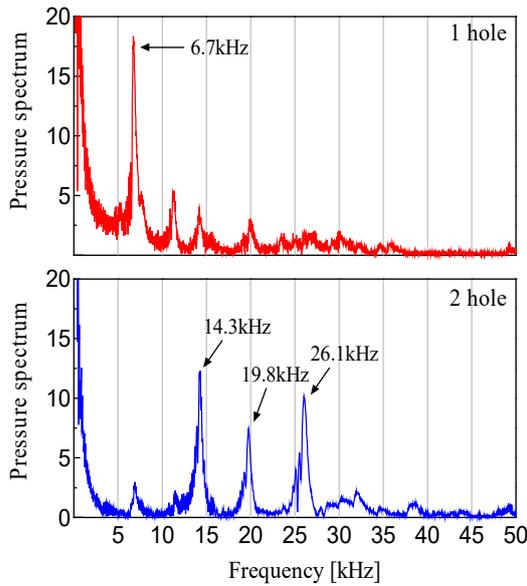


Fig.8 Frequency spectrum

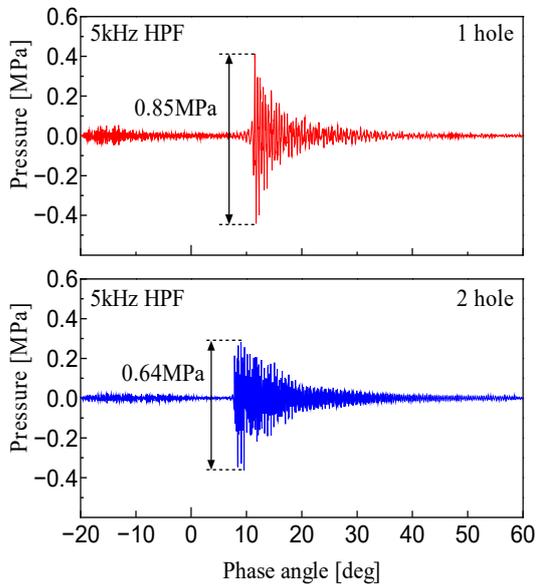


Fig.9 Knock intensity (HPF_5kHz)

Table1 Characteristic vibration modes

m,n	(1,0)	(2,0)	(0,1)	(3,0)	(4,0)
Mode Shape					
$\rho_{m,n}$	1.841	3.054	3.831	4.201	5.318
m,n	(1,1)	(5,0)	(2,1)	(0,2)	(6,0)
Mode Shape					
$\rho_{m,n}$	5.331	6.416	6.706	7.015	7.501

Table2 Theoretical mode frequency obtained from T_{all} and T_{ad}

	1hole	2hole			
mode	(1,0)	(0,1)	(4,0)	(1,1)	(0,2)
T_{all} [K]	1641	1601			
$F_{m,n}$ [kHz]	5.7	11.6	16.2	16.2	21.4
T_{ad} [K]	2854				
F_{Tad} [kHz]	7.5	15.6	21.6	21.7	28.5

Table3 Temperatures on knock estimated from frequency

	1hole	2hole			
mode	(1,0)	(0,1)	(4,0)	(1,1)	(0,2)
T_{knock} [K]	2332	2406	2393	2381	2388
F_{knock} [Hz]	6.8	14.2	19.8		26.1

< 参考文献 >

1. 資源エネルギー庁, 熱電併給推進室資料, (2003).
2. J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, (1988) McGraw-Hill.
3. R.P. Roethlisberger, D. Favrat: Comparison between direct and indirect (prechamber) spark ignition in the case of a cogeneration natural gas engine, Applied Thermal Engineering 22 (2002) 1217–1229.
4. S. Heyne, M.Meier, B. Imbert, D. Favrat: Experimental investigation of prechamber autoignition in a natural gas engine for cogeneration, Fuel 88 (2009) 547–552.
5. A. Jamrozik, Lean combustion by a pre-chamber charge stratification in a stationary spark ignited engine: Journal of Mechanical Science and Technology, 29 (5) (2015) 2269-2278.
6. K. Tanoue, Y. Chado, T. Jimoto, T. Nomura, F. Shimada, J. Hashimoto: Effect of Autoignition Characteristics of Fuels on Knocking Properties, International Journal of Engine Research, DOI: 10.1177/1468087415601785. in press (2015)
7. Y. B. Zeldovich: Regime classification of an exothermic reaction with nonuniform initial conditions, Combustion and Flame, (1980), 39, 211-214.
8. D. Bradley: Autoignitions and detonations in engines and ducts, Philosophical Transactions of the Royal Society A, (2012), 370, 689-714.
9. Reaction Design, “CHEMKIN-PRO”, Reaction Design, Inc., San Diego, (2013).
10. <http://c3.nuigalway.ie/mechanisms.html>.
11. C.S. Draper: The physical effects of detonation in a closed cylindrical chamber, N.A.C.A. Technical Report No.493, (1934).
12. C.S Draper: Massachusetts Institute of Technology, Pressure Waves Accompanying Detonation in the Internal Combustion Engine, J. Aeronaut. Sci., Vol.5 219- 226 (1938).
13. J.C. Livengood, C.F. Taylor, P.C. Wu: Measurement of Gas Temperature in an Engine by the Velocity of Sound Method, SAE 580064, (1958).
14. R. Hickling, J.A. Hamburg, D.A. Feldmaier, J.Y. Chung: Method of Measurement of Bulk Temperature of Gas in Engine Cylinders, US Patent No.4164867, (1979).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 松浦翼, 小澤祥太, 山下陸, 三重野貴敬, 嶋田不美夫, 田上公俊, 森吉泰生	4. 巻 52
2. 論文標題 副室式点火燃焼に及ぼす燃料性状の影響に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 1173-1179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11351/jsaeronbun.52.1173	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 UENO Seiya, SATAKE Yosuke, TAKAYAMA Taiga, SHIMADA Fumio, TANOUE Kimitoshi, MORIYOSHI Yasuo	4. 巻 86
2. 論文標題 A fundamental study of prechamber combustion characteristics in a constant volume combustion chamber	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tanoue Kimitoshi, Takayama Taiga, Ueno Seiya, Mieno Takanori, Irikura Kairi, Kiritani Tomoki, Obata Ken, Naiki Taketora, Watanabe Manabu	4. 巻 287
2. 論文標題 Study on the combustion characteristics of furan- and nitromethane-added hydrocarbon fuels	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fuel	6. 最初と最後の頁 119550-119550
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fuel.2020.119550	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 YAMASHITA Riku, WAKU Satoshi, MORI Daisuke, UENO Seiya, TANOUE Kimitoshi, MORIYOSHI Yasuo	4. 巻 16
2. 論文標題 Effect of fuel property on the ignition and combustion characteristics of prechamber ignition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jtst.2021jtst0014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 MORI Daisuke, WAKU Satoshi, YAMASHITA Riku, SHIMADA Fumio, TANQUE Kimitoshi, MORIYOSHI Yasuo	4. 巻 87
2. 論文標題 Study on ignition and combustion characteristics of prechamber ignition using rapid compression and expansion machine	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00380	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計14件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 三重野 貴敬・岡 優希・入倉海理・桐谷知樹・田上公俊・嶋田 不美生
2. 発表標題 イソオクタンの基本燃焼特性に及ぼすアルコール添加の影響に関する研究
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松浦 翼・小澤 祥汰・三重野 貴敬・嶋田 不美男・田上 公俊・森吉 泰生
2. 発表標題 副室式点火システムの着火・燃焼に及ぼす二酸化炭素希釈の影響
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大前 幹鉄, 山下 陸, 嶋田 不美生, 田上 公俊, 森吉 泰生
2. 発表標題 副室点火システムの着火・燃焼の相似則に関する研究
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 入倉 海理・桐谷 知樹・三重野 貴敬・岡 優希・田上 公俊・嶋田 不美生
2. 発表標題 炭化水素燃料の燃焼特性に及ぼすアルコール燃料添加の影響
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桐谷 知樹, 入倉 海理, 三重野 貴敬, 岡 優希, 田上 公俊, 嶋田 不美生
2. 発表標題 炭化水素燃料の基礎燃焼特性に及ぼすアルコール燃料添加の影響に関する研究
3. 学会等名 第32回内燃機関シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下 陸, 大前 幹鉄, 松浦 翼, 嶋田 不美生, 田上 公俊, 森吉 泰生
2. 発表標題 副室式点火システムの点火・燃焼に及ぼす燃料性状の影響に関する研究
3. 学会等名 第32回内燃機関シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上野聖矢, 松浦翼, 高山泰佳, 田上公俊, 嶋田不美生, 森吉泰生
2. 発表標題 副室点火燃焼の基礎燃焼特性に関する研究
3. 学会等名 第90回日本マリーンエンジニアリング学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上野 聖矢, 松浦 翼, 高山 泰佳, 山下 陸, 嶋田 不美生, 田上 公俊, 森吉 泰生
2. 発表標題 副室式点火燃焼に及ぼす燃料性状の影響に関する研究
3. 学会等名 第31回内燃機関シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 盛 大輔, 和久 哲志, 山下 陸, 田上 公俊, 嶋田 不美生, 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の着火・燃焼特性に関する研究
3. 学会等名 第31回内燃機関シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和久 哲志・盛 大輔・山下 陸・上野 聖矢・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31回内燃機関シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桐谷 知樹・入倉 海理・高山 泰佳・田上 公俊・嶋田 不美生
2. 発表標題 対向流バーナーを用いた予混合火炎の消炎特性に関する研究
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 高山 泰佳・三重野 貴・田上 公俊・嶋田 不美生・小畠 健・内木 武虎・渡邊 学
2. 発表標題 高効率化のための各種炭化水素燃料の基礎燃焼特性
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 山下陸・和久哲志・盛大輔 ¹ ・上野聖矢・嶋田不美夫・田上公俊・森吉 泰生
2. 発表標題 副室式点火の着火・燃焼特性に及ぼす燃料性状の影響
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 上野 聖矢・松浦 翼・山下 陸・高山 泰佳・嶋田不美男・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燃焼に及ぼす燃料性状の影響に関する研究
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
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
---------------------------	-----------------------	----

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