

令和元年5月31日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04601

研究課題名(和文) ガス機関における燃焼後半の自着火を利用した高熱効率燃焼のメカニズム解明

研究課題名(英文) Elucidation of mechanism of high thermal efficiency combustion owing to auto-ignition in the latter half of combustion in gas engines

研究代表者

富田 栄二 (TOMITA, Eiji)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：80155556

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：1回だけ燃焼可能な圧縮膨張装置を用いて、少量の軽油着火によりCH₄-空気混合気を燃焼させ、エンドガス部において、圧力振動のない自着火燃焼をさせることが可能となった。高速度カメラで得られた画像より、自着火燃焼部の広がり速度を求めた結果、ノックの場合と比較して緩やかであった。3次元CFDシミュレーションも始めている。C₁₄H₂₈簡略化素反応スキーム由来の反応群から対象反応を絞って、遺伝的アルゴリズムによる最適化を行い、着火遅れがほぼ同じで、CH₄-airの層流燃焼速度が希薄条件において実験値に近い値を再現する結果が得られた。この反応で熱発生率を計算すると、以前よりも実験値に近い結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エンドガス部で自着火するものの、ノックに至らないエンジン燃焼(PREMIER燃焼)は、過去の研究より高効率であることが分かっている。エンドガス部で自着火するのに、なぜ圧力波が生じないのかを明らかにすることが課題である。このメカニズムが解明できれば、ノックの抑制手法の発見につながる可能性もある。本研究ではエンドガス部の可視化により、自着火の様子や自着火燃焼部の広がり速度を調査し、PREMIER燃焼とノックの差を明らかにした。軽油着火式ガス機関は希薄燃焼式で高圧縮比であるので、もともと熱効率が高いがさらに高くなり、省資源および二酸化炭素低減にも寄与する。

研究成果の概要(英文)：It was possible that methane and air mixture was burned due to a small amount of diesel fuel and auto-ignited in the end gas region without pressure oscillation by using a compression-expansion machine that can make the mixture burn only once. The expansion rate of combustion area of end gas in PREMIER combustion was slower than that in knocking combustion by analyzing time series image with a high-speed camera. Three-dimensional CFD simulation is applied to analyze the auto-ignition phenomena in the end gas region. Reactions selected from the group of simplified reaction scheme of C₁₄H₂₈ were optimized due to genetic algorithm of elementary reactions. Then, laminar burning velocity of methane-air mixture showed closer value with the experimental data for lean condition while the values of ignition delay of both C₁₄H₂₈-air and methane-air were almost the same. The rate of heat release based on these reactions shows better results than previous one.

研究分野：船舶海洋工学，熱工学，燃焼，光計測

キーワード：熱機関 燃焼 自着火 光計測 火炎伝ば 3次元CFDシミュレーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球の温暖化防止のため、二酸化炭素の排出抑制が求められている。船舶用の熱機関あるいは定置式発電用熱機関は、コストや運用の観点から、他の動力源に今すぐにとって代わるものではないと考えられる。よって、これら熱機関の熱効率向上が二酸化炭素排出の抑制に最も効果があると期待される。二酸化炭素排出の比較的少ない天然ガス熱機関が注目されている。

天然ガスは自着火温度が高いために、圧縮着火機関には向いておらず、何らかの着火源を必要とする。本研究では、軽油をパイロット燃料とする二元燃料方式の熱機関を対象とした。

当研究室では、以前から2元燃料熱機関の燃焼と排気に関する基礎的な研究を実施してきた。これは種々のガス燃料を空気と予混合させた後、吸気管から吸入させて、少量の軽油を圧縮上死点前に噴射して着火源として、その後、天然ガスと空気の予混合気中を火炎が伝播することによって燃焼を完結させる。燃料噴射時期を早めていくと、全体の燃焼の位相が早まることによって圧力上昇が大きくなり、圧力および端部の未燃焼ガス温度が上昇してノックに至る。ノックは、エンドガス部が自着火することによって生じ、燃焼室内に圧力波が生じ、シリンダ内に特有の周波数を持つ圧力振動が生じる。圧力波が生じると壁面における温度境界層が破壊されるため、燃焼ガスから壁面への熱伝達が非常に大きくなり、ピストンやバルブなどが溶損することになる。よって、ノックは避けなければいけないと云われている。

あるとき、熱発生を観察していると、燃料噴射時期を早めると燃焼が早くなってシリンダ内の最大圧力が高くなってくるとともに、徐々に負荷が大きくなり、ノック発生の少し手前の燃料噴射時期条件で、熱発生率が燃焼後半で盛り返してくるといった面白い現象が見られた(図1参照)。これは、いわゆるノックとは異なり、圧力履歴にはノック特有の高周波振動が見られず、また、高出力が得られるとともに熱効率が高くなっていた。これは、おそらく、火炎伝播とともにエンドガス部が圧縮されて温度が上昇して、自着火が発生することによって燃焼率が大きくなったためであろうと考えた。そこで、申請者らは、この現象を **PREMIER (PREmixed Mixture Ignition in the End gas Region)** 燃焼と名付けた。この現象は、どのようなガスでも同様の現象が生じることがわかったが、自着火の発生するメカニズムが、ノックと何がどのように異なるのか、その着火とその後の燃焼のメカニズムが未だ不明である。そこで、基礎的に現象を解明することが必要と考えた。これは着火の本質に迫ろうとする研究であり、学術的な意義が非常に大きい。この解明は、ガス機関のエンドガス部におけるノック発生の抑制方法を考える上でも、非常に重要であり、熱効率の向上への一歩となるであろう。

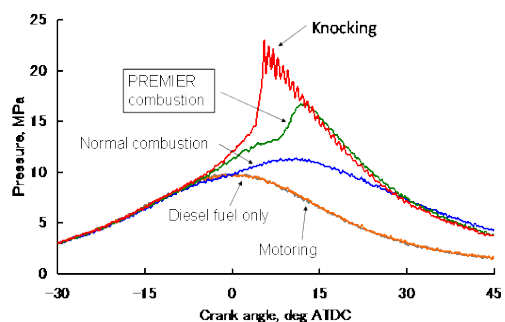


図1 シリンダ内圧力履歴(PREMIER燃焼の場合、熱発生率が燃焼後半で大きくなる)

2. 研究の目的

二酸化炭素の排出および有害排出物質を低減するための一つの方法が、熱機関を石油系燃料ではなく、天然ガスで運転することである。天然ガスを利用する熱機関の熱効率を向上させるための一つの方法として、申請者らは、燃焼後半に発生する自着火を適切に制御して、ノックに至らず、圧力振動のない燃焼で終了させる方法が良いことを見出した。熱機関における自着火には酸素濃度、未燃ガス温度と圧力の履歴が影響を与えると云われている。本研究では、1回だけ燃焼が可能な圧縮・膨張装置を利用して、初期条件をいろいろと変化させる。どのような酸素濃度、未燃ガス温度および圧力の履歴において、自着火が発生し、そのあとの燃焼が圧力波を発生させるか否かを、燃焼室内の熱発生、自着火部の超高速撮影、分光計測、簡略化素反応モデルによるシミュレーションを通して検討することが目的である。

3. 研究の方法

(1) 圧縮膨張装置による実験的研究

① 単一燃焼が可能な圧縮膨張機関における燃料噴射および上部からの可視化

今まで、火花点火機関の燃焼模擬用として圧縮膨張装置を利用してきたが軽油を噴射することができるようにした(図2)。この装置は、装置の横に設けられた混合気タンクとパイプで接続されている。弁が1つのみで、最初、弁を開けたまま、シリンダ内と混合気タンクに、予め作成しておいた天然ガスと空気の完全予混合気を所定の圧力まで入れる。その後、弁を開けた状態で、電動モータによって、圧縮膨張装置を駆動し、一定回転になったとき、下死点で弁を閉じて、予混合気を圧縮する。圧縮上死点前のある時期で少量の軽油を噴射して自着火させ、火炎伝播を行わせる。燃焼室の壁面温度は、何箇所かに制御付きヒーターを取り付けることによってほぼ一定の温度にする。

② 燃料噴射弁および可視化窓付きシリンダヘッドの設計および製作

3 方向に噴射することができる燃料噴射弁を中央に取り付ける。これは、実機と対応させるためと、エンドガス部を明確にして確実に自着火が生じる部分の観測を可能にするためである。図3に示すような可視化領域の配置になる。

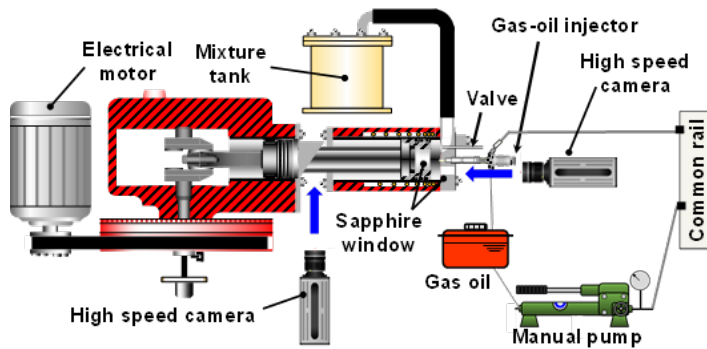


図2 圧縮・膨張装置の概要（ピストン下部からと上部からの可視化が可能）

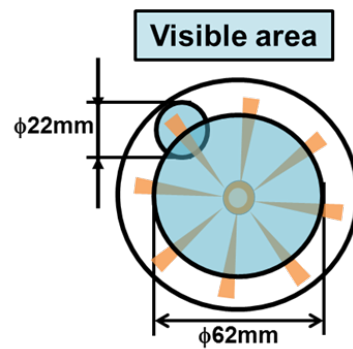


図3 可視化領域（下部と上部）

③燃料噴射システムの設置：コモンレール式の噴射装置を設置した。噴射圧力制御は1回だけの噴射であり、また噴射量が少ないので手押しポンプで対応した。

④PREMIER 燃焼を実現するための実験条件の把握：壁面温度は燃焼によってほとんど上昇しないので、ヒーターによって壁面温度を制御した。軽油噴射時期、初期圧力、初期温度をパラメータとした。

(2) 3次元CFDシミュレーション

本研究では流動計算手法として、オープンソースフリーソフトウェアであるGTTコードを利用する。GTTコードは、エンジンにおける吸気ポート、シリンダおよび燃焼室内におけるガス流動と混合気拡散過程を数値解析する高精度スキームと効率の良いアルゴリズムによるエンジンCFDコードであり、脇坂らにより開発されたものである。

吸気流動を考慮した数値計算を行うために、吸気管を考慮する流れ場について、市販の熱流体汎用解析ソフトウェアであるSTAR-CDを用いて計算し、その結果をGTTにおける数値計算の初期条件として使用した。

GTTコードには、離散液滴モデル(DDM: Distance Droplet Model)に基づいて、種々の噴霧サブモデル、すなわち液滴の分裂モデル、相互衝突・合体モデル、蒸発モデル、壁面衝突モデルが組み込まれている。乱流モデルはk-εモデルを使用した。

4. 研究成果

(1) 画像処理

判別分析法で二値化処理することにより、画像が白と黒の二階層で表され、この要素数を計算することで面積を算出する際に使用した。本研究では、エンドガス領域の面積を算出するため、エンドガス領域を黒、それ以外(火炎部、可視化域外)を白としている。さらに、フィルタ処理、エッジ処理を施している。また、エンドガス自着火火炎面積を算出する際には1自着火直前の画像、2自着火時の画像、3自着火発生後1枚目の画像3枚に対して二値化処理を行い、それぞれ火炎面積を算出し、2枚目の画像から1枚目の画像の面積を差し引いた値に撮影速度[fps]をかけた値を火炎面積広がり速度と定義した。

(2) PREMIER 燃焼の実現

吸気圧力を上げて実験を行ったところ、最大筒内圧が上昇し圧縮膨張機関においても熱発生率が2段階形状を持つ燃焼結果が得られた。ピストンボトムビューからの高速度カメラを用いた筒内撮影により、PREMIER燃焼の発生を確認することができた。

当量比に関わらず、圧縮膨張機関においても、ヘッド側可視化領域を含む3つのエンドガス領域いずれにおいても自着火を確認した。

(3) ピストン下部および上部からの画像と圧力、熱発生率

当量比を0.9とした実験から通常燃焼、PREMIER燃焼、ノッキング3つの燃焼形態を含む実験結果が得られた。噴射時期進角化に伴い通常燃焼からノッキングになるにつれて筒内圧の上昇、燃焼期間が減少する傾向が見られた。また、自着火してから最高圧に達するまでの圧力上昇はPREMIER燃焼に比べノッキングの方が急激であることがわかった。

PREMIER燃焼では壁面側からのみの自着火であるのに対し、ノッキングでは火炎面前面からも自着火が見られた。自着火火炎面積の広がり速度を算出した結果、PREMIER燃焼に比べノッキングの方が3~4倍速い傾向を示した。また、ノッキングではその後の未燃焼ガス領域における燃焼において、初期の自着火火炎からの火炎伝播ではなく多点で連続的に自着火が発生していることが分かった。

図4、図5に、PREMIERおよびノックの場合の、ボトムからの可視化画像、上部からの可視化画像および時間分解能が高く自着火の様子が分かる画像、圧力および熱発生率を示す。条件は、当量比0.9、軽油噴射圧力40MPa、吸気温度75度、吸気圧力120kPa、壁面温度130度とした。上部からの可視化画像では、自着火の生じる様子がよく分かる。確かにエンドガス部に

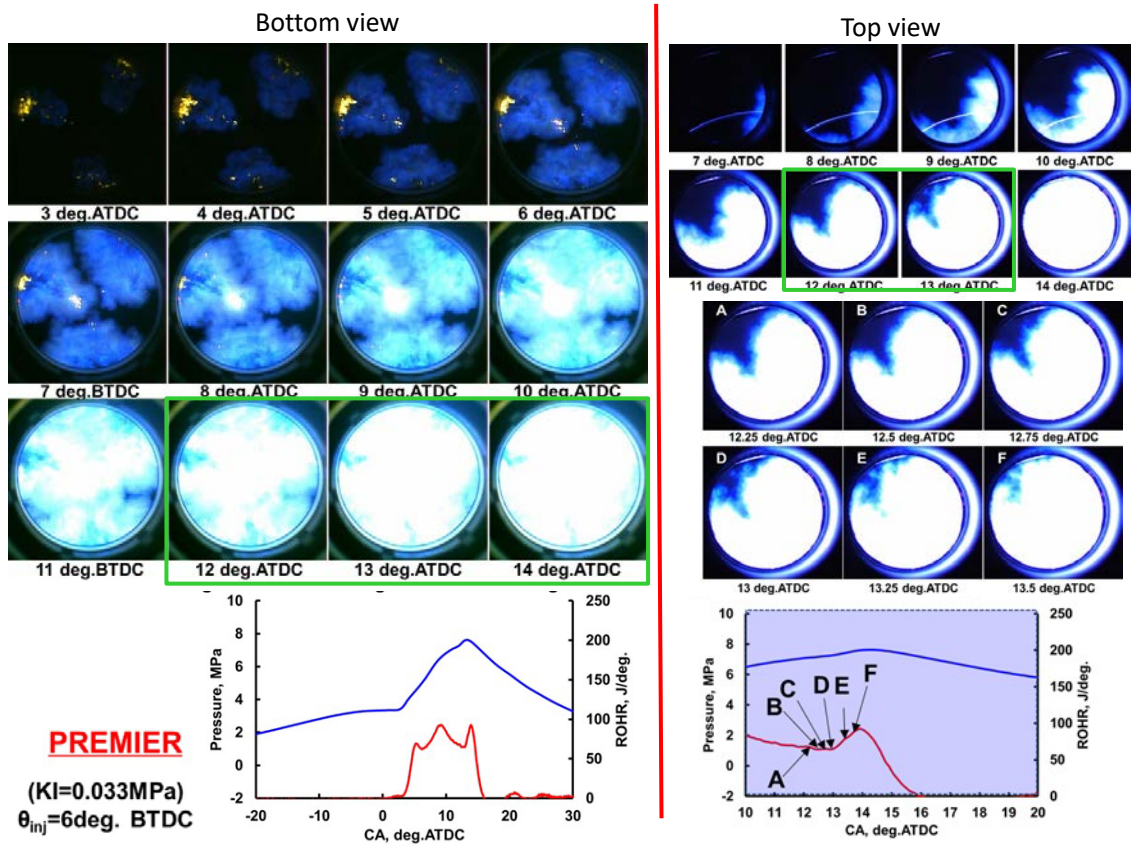


図4 REMIER 燃焼におけるエンドガス部自着火画像と熱発生率との比較

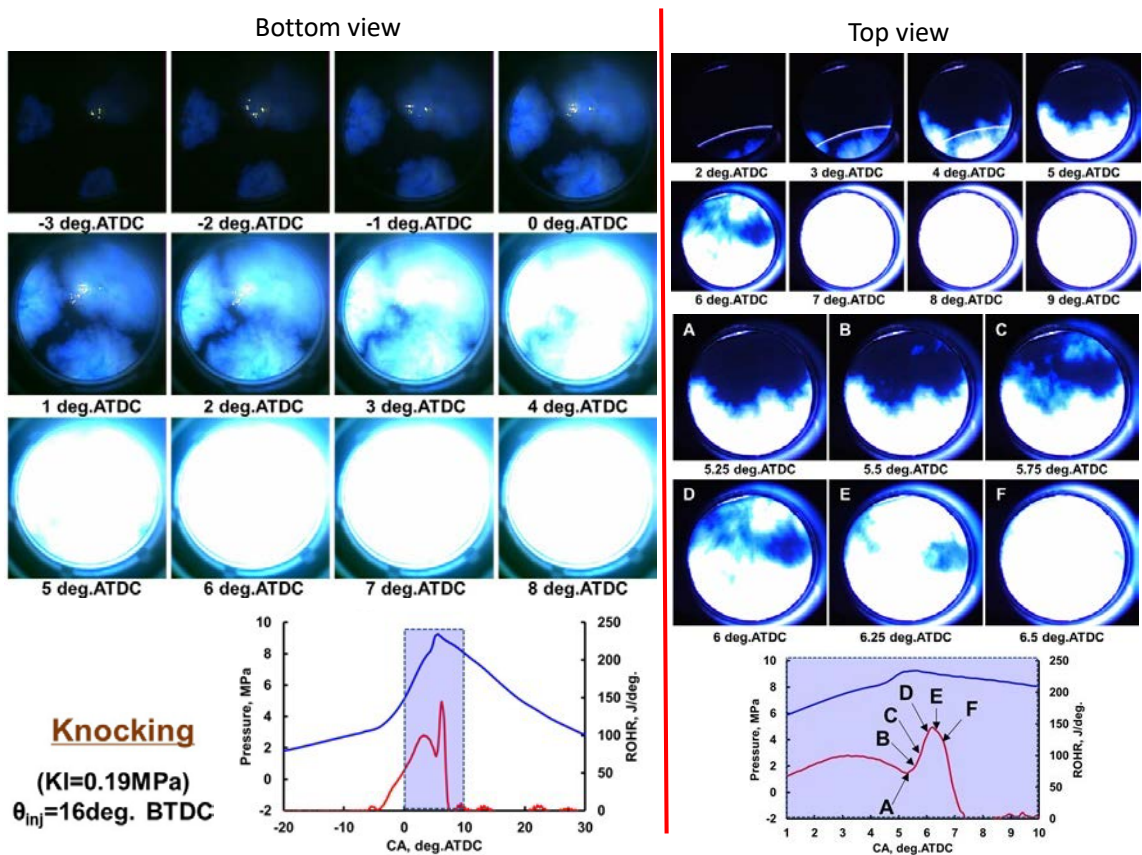


図5 ノッキングにおけるエンドガス部自着火画像と熱発生率との比較

いて自着火が生じて燃焼部分が増加している。ノックの場合と比較して、PREMIER 燃焼の場合は、ゆっくりと自着火による燃焼部分が広がっている。

図6に、画像処理によって得られた燃焼部の拡大速度とノック強さ KI の関係を示す。ノック強さは圧力履歴に 4-20kHz のバンドパスを通して得られた信号の最大振幅を表す。KI が 0.08 以下であればノイズレベルとさほど変わらないので、それ以上をノックと定義している。PREMIER の場合には広がり速度が遅いが、ノックの場合には速いことが分かる。ノックの場合でも広がり速度が遅い場合もあったが、自着火が観察している部分以外で生じている可能性もあり、今後の課題である。

(4) 3次元 CFD シミュレーション

本研究では、乱流混合の影響を表す燃焼モデルとして、Kong らの乱流混合燃焼モデルに修正が加えられたものを導入している。この修正が加えられているものは、二元燃料ガスエンジンの燃焼に合うように修正が加えた。

化学反応計算には SpeedCHEM を用いた。SpeedCHEM は、燃焼計算において、詳細化学反応速度論を組み込み、効率的に計算を行うことができる Fortran ライブラリである。

また、遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) を用いて、前指数因子を変化させて、着火遅れおよび層流燃焼速度の両方の値を実験値と合わせこむようにした。

本研究では、GTT-SpeedCHEM コードを用いて軽油着火式二元燃料ガスエンジンにおける筒内燃焼現象の数値解析を行うにあたり、Golvitchev らが提案した軽油模擬燃料(C₁₄H₂₈)の詳細化学反応機構(71species,291reactions)を簡略化したもの(47species,86reactions)を使用している。

Syngas 化学反応機構を導入するにあたって、パイロット燃料の化学反応をより詳細に考慮するために、先ほどの syngas 化学反応機構と前節で述べた Golvitchev の C₁₄H₂₈ 簡略化化学反応機構を合成し、重複した反応を省略することで独自の C₁₄H₂₈-syngas 化学反応機構 (48 species, 103 reactions) を構築した。

過去の研究において、C₁₄H₂₈-syngas 素反応スキームを用いた C₁₄H₂₈ と CH₄ の着火遅れについては実験値と合わせこまれている。しかし、層流燃焼速度については合わせ込みが行われていない。構築された C₁₄H₂₈-syngas 素反応スキームにおける C₁₄H₂₈ と CH₄ の着火遅れ、CH₄ の層流燃焼速度を計算し、実験から得られた値と比較すると、着火遅れはそれほど変化せずに、メタン-空気混合気の希薄条件でかなり一致するようになった。

メタン 100% の場合の実験値と計算値に関して、圧力および熱発生率を図7に示す。軽油噴射時期 15° BTDC の場合は、かなり良く一致しているが、8° BTDC の場合には、燃焼後半が少しずれてきている。燃焼後半での自着火も含めて、さらなるモデルの検討が必要である。

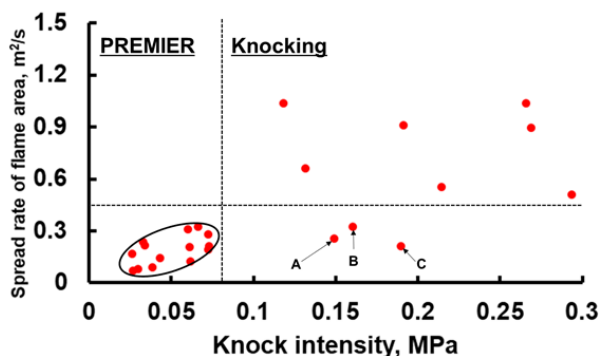


図6 エンドガス自着火面積広がり速度と KI 値の関係

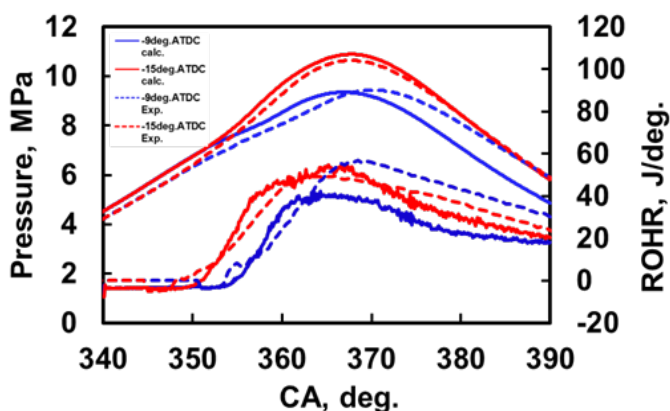


図7 燃料組成 CH₄:100% における圧力および熱発生率 (軽油噴射時期 8 (青) および 15° (赤) BTDC: 実験値 (破線) と計算値 (実線) の比較)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- 1) Nobuyuki Kawahara, Yungjin Kim, Hisashi Wadahama, Kazuya Tsuboi, Eiji Tomita, Differences between PREMIER combustion in a natural gas spark-ignition engine and knocking with pressure oscillations, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.37, Issue 4 (2019), pp.4983-499, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.08.055> (査読有)
- 2) Nearchos Stylianidis, Ulugbek Azimov, Alireza Maheri, Eiji Tomita, Nobuyuki Kawahara, Chemical kinetics and CFD analysis of supercharged micro-pilot ignited dual-fuel engine combustion of syngas, Fuel, Vol.203(2017), pp.591-606. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.125> (査読有)

- 3) Yungjin Kim, Nobuyuki Kawahara, Kazuya Tsuboi, Eiji Tomita, Combustion characteristics and NOx emissions of biogas fuels with various CO2 contents in a micro co-generation spark-ignition engine, *Applied Energy*, Vol.182 (2016), pp.539-547. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.152> (査読有)
- 4) Cagdas Aksu, Nobuyuki Kawahara, Kazuya Tsuboi, Morio Kondo, Eiji Tomita, Extension of PREMIER combustion range using split micro pilot fuel injection in a dual fuel natural gas compression ignition engine: A performance-based and visual investigation, *Fuel*, Vol.185 (2016), pp.243-253. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.120>. (査読有)

[学会発表] (計 7 件)

- 1) 肥田大雅, 河原伸幸, 富田栄二, 軽油着火式二元燃料ガスエンジンにおける PREMIER 燃焼-メタン価による評価-, 第 29 回内燃機関シンポジウム (京都, 2018)
- 2) Alireza VALIPOUR, Nobuyuki Kawahara, Kazuya Tsuboi, Eiji Tomita, A Study of PREMIER combustion in a pilot ignited dual fuel biogas engine, 第 56 回燃焼シンポジウム (堺, 2018)
- 3) Eiji Tomita, Characteristics of PREMIER (PREmixed Mixture Ignition in the End gas Region) combustion- End gas auto-ignition without pressure oscillation, 2018 SAE China Conference and Exhibition (上海, 2018) (招待講演)
- 4) Nobuyuki Kawahara, Yungjin Kim, Kazuya Tsuboi, Eiji Tomita, Differences between PREMIER combustion in a natural gas spark-ignition engine and knocking with pressure oscillations, 37th International Symposium on Combustion (Dublin, 2018)
- 5) Apoorv Talekar, Ming-Chia Lai, Eiji Tomita, Nobuyuki Kawahara, Ke Zeng, Bo Yang Numerical Investigation of Natural Gas-Diesel Dual Fuel Engine with End Gas Ignition, SAE World Congress, (Detroit, 2018), Paper No.2018-01-0199.
- 6) Nobuyuki Kawahara, Norihiro Takeda, Eiji Tomita, Simulation of Diesel Spray Combustion Using Chemical Kinetics, Proceedings of the 9th International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems, (岡山, 2017)
- 7) 坂下啓介, 河原伸幸, 富田栄二, 圧縮膨張機関での二元燃料燃焼におけるエンドガス自着火の可視化, 第 55 回燃焼シンポジウム, (富山, 2017)

[図書] (計 1 件)

- 1) Ulugbek Azimov, Nobuyuki Kawahara, Kazuya Tsuboi, Eiji Tomita, Chapter 8: Advanced Combustion in Natural Gas-Fueled Engines, in “Natural Gas Engines for Transportation and Power Generation, (Eds.) Srinivasan, K.K., Agarwal, A.K., Krishnan, S.R., Mulone, V”, pp.215-250, (2019), Springer Nature Singapore Pte Ltd. (ISBN 978-981-13-3307-1) (doi: 10.1007/978-981-13-3307-1_8)

[その他]

ホームページ等 <https://powerlab.mech.okayama-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：河原 伸幸

ローマ字氏名：KAWAHARA, Nobuyuki

所属研究機関名：岡山大学

部局名：大学院自然科学研究科

職名：研究教授

研究者番号 (8 桁)：30314652