

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04940

研究課題名（和文）ガス機関における副室から噴出する燃焼ガスの着火・燃焼メカニズム解明とモデル化

研究課題名（英文）Ignition and combustion mechanism elucidation and modeling of combustion gases ejected from the pre-chamber in gas engines

研究代表者

河原 伸幸（Kawahara, Nobuyuki）

岡山大学・自然科学学域・教授

研究者番号：30314652

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）：副室内点火プラグ近傍燃料・空気混合気計測結果を基に副室燃焼ガスジェットの可視化および3次元CFDによるモデルの解析結果より、副室内混合気への着火特性および副室から噴出される燃焼ガスジェットの燃焼メカニズムの解明に取り組んだ。副室式ガスエンジンにおいて、SIBS計測を行い、理論空燃比時に燃焼ガスジェットの噴出時期が最も早く、そのため燃焼開始時期が早いことが分かった。LESと詳細化学反応機構を組み合わせた数値解析手法により、中間生成物を含む化学種から火炎構造の解析を行うことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱機関においては、天然ガス、バイオガス、水素などのガス燃料の利用はますます盛んになると考えている。このようなガスを主燃料とする種々の中・小型熱機関における熱効率向上のための基礎研究としての高い雰囲気圧力・温度におけるガス燃料の着火・燃焼メカニズムの詳細な把握が必要である。熱効率向上のためには、着火・燃焼という観点からは、どのような燃焼形態が最適であるかを見極める必要がある。いままで詳細なメカニズムが不明であった副室式ガスエンジンにおける副室内混合気への着火特性および副室から噴出される燃焼ガスジェット流の形成過程を明らかにし、モデル化することが本研究の目的である。

研究成果の概要（英文）：Based on the results of fuel/air mixture measurements near the spark plug inside the pre-chamber, the ignition characteristics and the combustion mechanism of burned gas jet from the pre-chamber inside the main chamber were investigated with a high-speed visualization and analyzed by 3-D CFD using Large Eddy Simulation (LES) turbulent model with the detailed chemical kinetics. SIBS measurements around the spark plug inside the pre-chamber gas engine showed that the combustion gas jet is ejected earliest under the stoichiometric mixture around the spark plug, and therefore the combustion timing inside the main chamber becomes earlier. The numerical analysis method combining LES and detailed chemical reaction mechanisms was used to analyze the flame structure of the burned gas jet from the pre-chamber using the chemical species including intermediate products.

研究分野：船用海洋工学

キーワード：燃焼 熱機関 分光計測 燃焼CFD 副室式ガスエンジン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、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おり、化石燃料の燃焼は議論の中心にある。特に船舶において、国際海事機構(IMO: International Maritime Organization)は、国際海運全体から排出される二酸化炭素の大幅な削減を目指し、温室効果ガス削減戦略を採択している。船舶用の熱機関あるいは陸上の発電用熱機関は、コストや運用の観点から二酸化炭素の排出の少ない天然ガスや二酸化炭素排出をゼロとカウントできる水素やバイオ燃料を主燃料とする機関が考えられており、熱機関以外の動力源(例えば、燃料電池やバッテリー駆動電気モータ)にすぐに代替されるものではない。そのため、天然ガスや水素や主燃料としたガス燃料熱機関の熱効率向上が二酸化炭素排出抑制効果として期待され、社会的意義も高い。

天然ガス、水素、バイオガスなどのガス燃料は、自着火温度が高いという特性から船舶で一般的に用いられる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。現在、着火方式としては、火花点火方式、軽油着火二元燃料方式、副室式がある。船舶用の場合は、高出力を得るために過給が必須となっている。火花点火方式の場合、過給によって点火時の雰囲気圧力が高くなり、火花放電(絶縁破壊)のための要求電圧が高くなり、放電エネルギーを高める必要がある。その場合には点火プラグが極度に消耗してしまう課題がある。主燃料を水素とする場合、燃焼室に直接燃料を噴射し、層状混合気を形成し、火花点火により点火し、燃焼を開始する。研究代表者も点火プラグ近傍の燃料～空気混合比が燃焼・排気ガス特性に与える影響を評価し、熱効率向上に寄与している。軽油などをパイロット燃料とする二元燃料方式の熱機関は、ディーゼル機関用の燃料噴射装置を利用できるため、比較的簡便に対応することができる。研究代表者も二元燃料ガス熱機関の研究に従事しており、熱効率向上に寄与している。しかし、軽油とガス燃料という二種類の燃料を有する点は課題となる。一方、燃焼室に主体となる主室とは別に小さな体積を有する副室を形成する副室式も以前から用いられてきた。副室式は、副室内に燃料過多の混合気を形成し、火花点火することで燃焼ガスジェットを噴出させ、シリンダ内の希薄な混合気への着火を実現する。この場合、全体として希薄燃焼が実現でき、過給への対応性も高く、高熱効率が実現できる。しかし、シリンダ内の希薄混合気を安定して着火するためには、副室内のガス燃料と空気の混合比が重要となる。副室内に流入する空気流とガス燃料の混合比が不明であるため、その着火安定性に影響を与える。副室内のガス燃料と空気の混合比がどのように希薄熱機関の着火安定性に影響を与えているのかが学術的問いである。

2. 研究の目的

熱機関においては、天然ガス、バイオガス、水素などのガス燃料の利用はますます盛んになると考えている。このようなガスを主燃料とする種々の中・小型熱機関における熱効率向上のための基礎研究としての高い雰囲気圧力・温度におけるガス燃料の着火・燃焼メカニズムの詳細な把握が必要である。熱効率向上のためには、着火・燃焼という観点からは、どのような燃焼形態が最適であるかを見極める必要がある。いままで詳細なメカニズムが不明であった副室内混合気への着火特性および副室から噴出される燃焼ガスジェット流の形成過程を明らかにし、モデル化することが本研究の目的である。

本研究の学術的な特色・独創的な点は、(1) 密閉空間である副室内における点火プラグ近傍空燃比計測手法の構築を行い、(2) 副室内混合比が副室から噴射される燃焼ガスジェット噴流に与える影響を評価し、(3) 副室からの燃焼ガス拡散ジェットの予混合気への着火性をモデル化、することにある。そのため、点火プラグに光ファイバを組み込み、火花放電プラズマの分光スペクトルを解析し、ガス燃料～空気の混合比を計測可能な火花誘起ブレイクダウン分光法(以下、SIBS: Spark-induced breakdown spectroscopy)により副室内空燃比を計測する。熱流体解析プログラムを用い、数種類の副室形状における点火プラグ近傍の燃料～空気混合気形成過程を評価し、SIBS法の計測精度評価を行う。高温・高圧環境を作成し、燃焼室内が可視化可能な圧縮膨張装置を用いることで、副室から噴射される拡散燃焼ジェットの可視化および主燃焼室の予混合ガス着火特性を調査する。また、副室からの燃焼ガスジェット火炎から主燃焼室の予混合ガスへの着火の様子をモデル化することで、燃焼ガスジェットの着火メカニズム解明に取り組む。

3. 研究の方法

(1) 点火プラグに光ファイバを組み込んだ SIBS 光学系を用い、副室内ガス燃料～空気混合比を計測し、(2) 圧縮膨張装置において、副室からの拡散燃焼ジェットの噴射形態への影響を可視化する。(3) 副室からの拡散燃焼ジェットによる予混合ガスへの着火メカニズムをモデル化し、(4) 研究の総括を行う。

(1) SIBS 光学手法の構築および副室形状の決定

すでに光ファイバ組込型点火プラグの概略は構築できており、分光器も所有している。天然ガスを主燃料として、数種類の予混合気を作成し、異なる雰囲気圧力・温度条件における水素/窒素(もしくは酸素)原子発光強度比とガス燃料～空気混合比の関係を調査する。このデータベースを構築することで、密閉空間である副室内点火プラグ近傍でのガス燃料～空気混合比計測が

可能となる。圧縮膨張装置において数種類のガス燃料～空気混合比率の予混合ガスを吸入し、実際の火花点火条件となる高圧・高温環境下での SIBS スペクトル計測を実施する。また、噴孔数、ガス噴射弁の配置等を変更した数種類の副室形状を熱流体解析プログラムによる燃料～空気混合気形成過程の観点から評価する。

(2) ガス熱機関を模擬した副室の構築および圧縮膨張装置による副室燃焼ガスジェットの可視化

所有する圧縮膨張装置の燃焼室内上部を改良し、熱流体解析プログラムによる解析結果を基に副室を構築する。点火プラグに(1)で構築した SIBS 光学系を組み込み、副室内点火プラグ近傍ガス燃料～空気混合比計測を実施する。圧縮膨張装置主室に取り付けた可視化サファイア窓より、副室からの拡散燃焼ガスジェットの様子を可視化する。これらにより、主室内の異なるガス燃料～空気混合比、雰囲気圧力・温度における拡散燃焼ガスジェットの様子を詳細に把握する。

(3) 副室からの拡散燃焼ガスジェットおよび主室予混合ガスの着火メカニズムのモデル化

当研究室では、3次元 CFD シミュレーションコードとして、GTT コードを使用している。このコードは、オープンソースであり、各種モデルを自由に組み込むことができる。副室内ガス燃料～空気の混合過程および副室内着火から副室からの拡散燃焼ガスジェットおよび主室予混合ガスの着火、火炎伝播という複雑な現象をシミュレーションを実施する。今回、天然ガスの詳細化学反応機構を GTT コードに組み込み、「副室内着火から副室からの拡散燃焼ガスジェットおよび主室予混合ガスの着火、火炎伝播」をモデル化し、副室から拡散燃焼ガスジェットの着火メカニズムを把握する。

4. 研究成果

(1) SIBS 光学手法の構築および副室形状の決定

燃料濃度の計測は、火花放電により生じるプラズマからの発光スペクトルを計測する手法である、SIBS 法を利用している。Fig.1 に本研究で用いた SIBS プラグの断面図と概略図を示す。M12 無抵抗点火プラグの中心に直径 1.2mm の貫通穴をあけ、コア径 1,000 μ m の光ファイバを挿入できるように加工を施してある。SIBS プラグの陽極先端には、筒内の高温高圧場に対応するためサファイア窓を装着している。これを用いて、光ファイバを通して火花放電の発光スペクトルを分光計測することが可能となる。スペクトル計測には小型で短い露光時間での計測が可能な分光器である OCEAN FX (OCEAN PHOTONICS 社) を使用した。燃料濃度は、燃料由来の水素原子と空気由来の酸素原子の発光強度比 (IH/O) と当量比との関係を通し、その関係を用いて、発光強度比から燃料濃度を計測することが可能となる。原子や分子、ラジカルの発光はプラズマ状態に起因している。そのため、ターゲットとなる原子発光スペクトルを獲得するためには、分子発光スペクトルなどの余計なスペクトルが含まれないプラズマ状態で分光計測を行う必要がある。そこで、圧縮膨張機関において SIBS プラグで計測するにあたり、露光時間の最適化を行った。露光時間は 200, 150, 100, 50, 10 μ s の 5 条件に設定しており、プラズマ状態によって取得されるスペクトルがどのように変化するかを調査する。当量比は 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 の 5 条件として調査を行った。シリンダ内には均一混合気である天然ガスと空気の予混合気を吸気圧力 100kPa で充填して分光計測を行った。

計測したスペクトルの一例 (当量比 0.8) を Fig.2 に示す。スペクトルは露光時間ごとに色分けされており、3 回ずつ計測されたスペクトルを平均して示している。どの露光時間においても燃料由来 H α (656nm)と空気由来 O(777nm)の発光スペクトルを取得することができた。また、露光時間 10 μ s 以外では、K(770nm)の発光スペクトルが取得された。このカリウム原子発光はエンジンオイル由来のものであると考えられる。露光時間を短くすることで、O(777nm)付近の K(770nm)の発光スペクトルが抑えられることが分かった。これは、酸素原子がカリウム原子より早く発光していることを表している。各原子の発光はプラズマ放電状態に起因し、ターゲットとなる水素や酸素原子の発光はプラズマ初期状態のアーチ放電、カリウムはその後のグロー放電中に発光していることが考えられる。露光時間を短くすると、発光強度比を算出する際の誤差要因 (バックグラウンド) となるカリウム原子の発光スペクトルを除くことができるため、本実験の SIBS 計測において露光時間 10 μ s が最適であると判断した。この後の実験においては、露光時間を 10 μ s に設定して、分光計測を行った。

数値解析プログラムを用い、圧縮膨張機関に設置する副室形状を決定した (Fig.3)。M12 点火プラグを用いた、簡略な構造とした。ノズル径は 2.0mm とした。

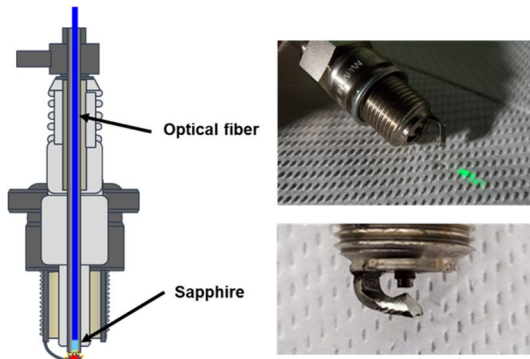


Fig. 1 SIBS spark plug

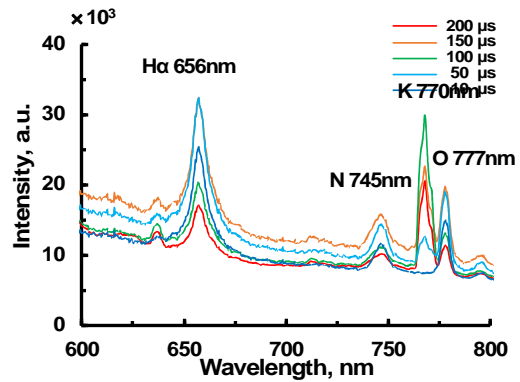


Fig. 2 Effects of exposure time

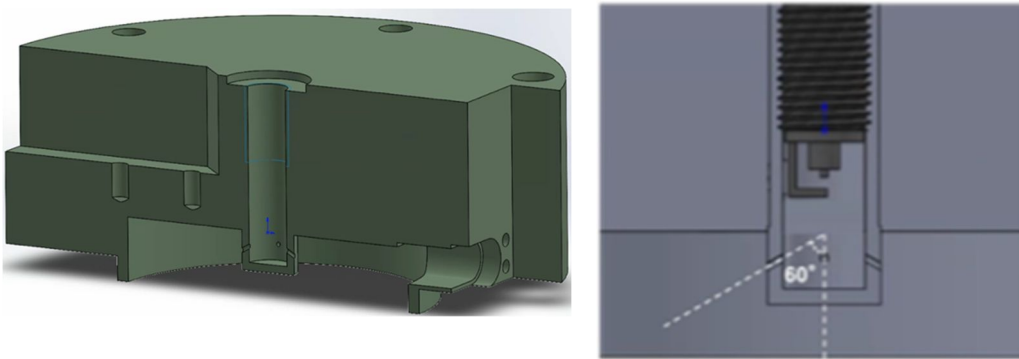


Fig. 3 Shape of the pre-chamber

(2) 圧縮膨張装置による副室燃焼ガスジェットの可視化

圧縮膨張機関に副室を取り付け、ボトムビューで副室からの燃焼ガスジェットの可視化を行った (Fig. 4). カメラの撮影速度は画角とトレードオフの関係であるため、副室から主室へ噴出する 4 つのジェット全体が映る画角かつ、時間分解能を高めるために早い撮影速度になるようにした結果、14,400fps に設定した。吸気バルブにシュラウドを設置しているため、反時計回りのスワール流動が形成される。カメラの露光時間は撮影画像の輝度を高めるため、オープンに設定した。その結果、生画像で火炎ジェットが確認できるほどの輝度で計測することができた。

設定した当量比を変更し、副室内において、SIBS 点火プラグを用いて燃料～空気当量比計測を行った (Fig. 5)。今回開発した SIBS 点火プラグにより、副室内にて精度良く当量比計測が実施できていた。

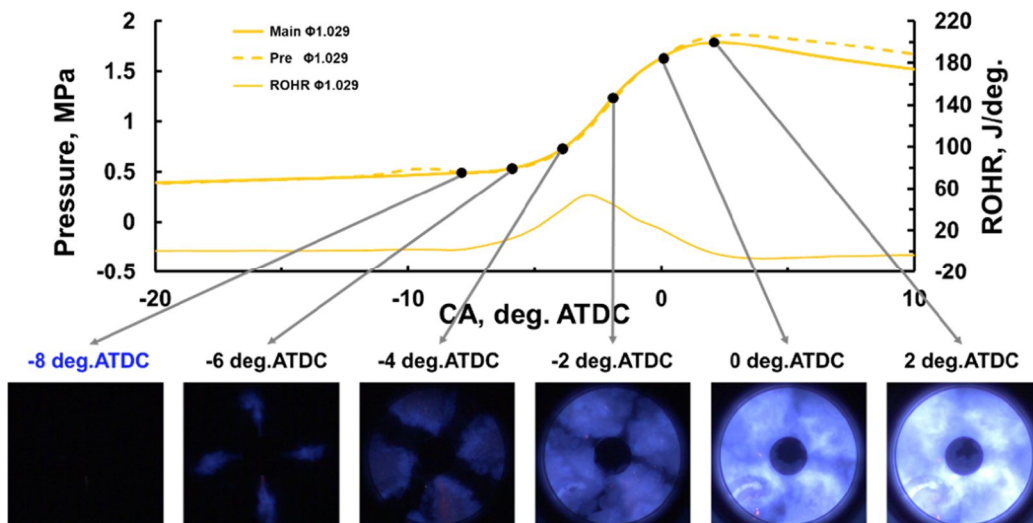


Fig. 4 Combustion jet from pre-chamber with pressure histories and ROHR.

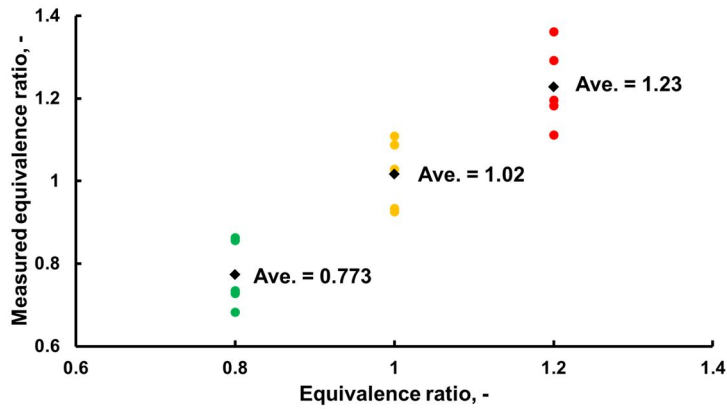


Fig. 5 Measured equivalence ratio inside pre-chamber

(3) 副室からの拡散燃焼ガスジェットおよび主室予混合ガスの着火メカニズムのモデル化

副室式ガスエンジンにおける副室内の火炎伝播, 主室への乱流ジェット, および主室内の火炎伝播について, 詳細化学反応機構を組み込んだ LES により数値解析を行った. 本研究では, 副室内に燃料供給システムを持たず, 燃料を含んだ混合気を主室側から供給するパッシブ方式の副室式ガスエンジンを対象としている. 燃料には CH_4 を使用し, 化学反応機構には層流燃焼速度および着火遅れに関する実験結果を良好に再現するため, 反応速度定数を調整したモデルを用い, 中間生成物を考慮した計算を可能にした. 実験結果と比較することで LES 解析の妥当性を検証し, 温度・化学種の輸送により火炎伝播を評価することで, 副室からの火炎ジェットによる主室での着火メカニズムを考察した.

Fig. 6 に副室式ガスエンジンの中央-断面における, クランク角度ごとのシリンダ内の温度分布, CH_4 , CH_2O , OH の質量分率を示す. 点火プラグのギャップ間において点火エネルギーが与えられ, クランク角が進むにつれて温度, 化学種の輸送が起こっており, 燃焼による副室内の火炎伝播を再現することができたと考えている. 副室内火炎伝播の様子をみると, 点火プラグの影響を受けながら火炎伝播が進行していき, ノズルを通して主室に高温のジェットが流入する様子, そして主室側でも燃焼が起こり, 温度分布が広がっていく様子を確認できる. また, ジェットによって発生している強い乱れの影響で, 火炎は非常に複雑な形状となって主室内を伝播していることがわかる. $\text{CA}352.5\text{deg.}$ の温度分布を見ると, 副室から主室へと主室内予混合気 of 温度より高いジェットが流入していることがわかるが, 同クランク角度の CH_2O の分布を見ると, 燃焼の中間生成物として生成される CH_2O は高温の領域ほど広く分布していないことがわかる. これは, 未だ燃焼反応は起こっていないが, 副室内の火炎伝播により温度が高くなった未燃ジェットが, 副室内の燃焼反応が起こり高温となった既燃ジェットに押されるようにして主室内に流入してきているためであると考えられる.

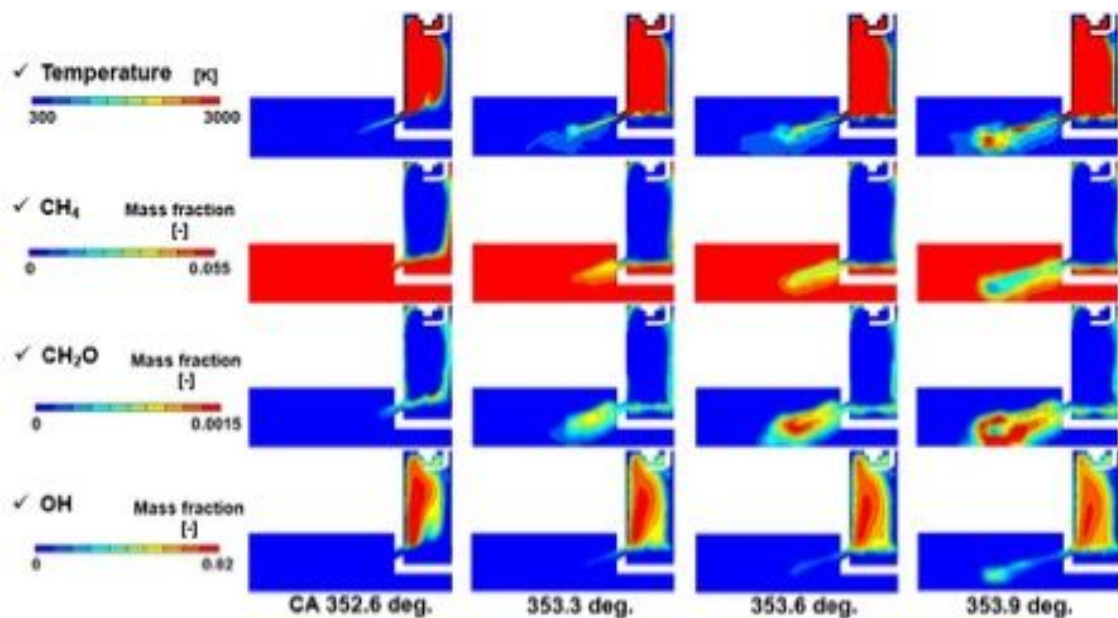


Fig. 6 Temperature, fuel, and intermediate species behavior in the pre-chamber gas engine

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮尾康平, 河原伸幸
2. 発表標題 副室式天然ガスエンジンにおける不均一場の局所当量比計測
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 藤田友輝, 河原伸幸
2. 発表標題 ガスパーセル法を用いた天然ガス噴流挙動の数値解析
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 岡本一真, 河原伸幸
2. 発表標題 副室式ガスエンジンにおける火花放電と初期火炎核形成過程(高速度カメラを用いた火花放電挙動と初期火炎核形成過程の可視化)
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 大泉寿広, 河原伸幸
2. 発表標題 副室式ガスエンジンにおける火花放電と初期火炎核形成過程(放電パーセルモデルを用いた火花放電挙動の数値解析)
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 川島彰裕, 河原伸幸
2. 発表標題 副室式ガスエンジンにおける火炎伝播のLES解析 (詳細化学反応機構による火炎伝播と火炎構造)
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 西村 匠, 河原伸幸, 小橋好充
2. 発表標題 火花点火機関における火炎面伝ば速度と未燃混合気速度の同時計測
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第61期講演会
4. 発表年 2023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