

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05832

研究課題名(和文) 火花放電におけるプラズマ形成から熱核へ至る着火過程のモデル化

研究課題名(英文) Modeling of the spark discharge ignition process in the spark-ignition engine

研究代表者

河原 伸幸 (Kawahara, Nobuyuki)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：30314652

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：火花放電におけるプラズマから周囲ガスへの熱移動を時系列計測し、モデル化した。希薄燃焼条件では、火花放電挙動には移動方向に毎サイクル違いがみられ、初期火炎核形成位置も変化し、サイクル変動の原因となる。OH*より求めた回転温度は、点火時期では6,500K程度であったものが、初期火炎核形成時では2,000K程度であり、高いプラズマ温度から周囲予混合気への熱移動を把握できた。火花放電をプラズマ点が線状に連なった集合体としてモデル化した。プラズマ点から流体メッシュ側にエネルギーを与えることで、初期火炎核形成位置を精度良く示すことが可能になった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to model the spark discharge ignition process in the spark-ignition engine under lean-burn conditions. Spark discharge and initial flame kernel development were visualized. The larger displacement of spark discharge under lean conditions affects the cyclic fluctuation of initial flame kernel. We were able to measure a time series of emission spectra from the spark discharge and initial flame kernel. The plasma temperature of the spark discharge was nearly 6,000 K and that thermal energy was transferred from the spark plasma channel to the combustible mixture. The gas temperature of the initial flame kernel approached that of the adiabatic flame temperature.

The modeling of the spark ignition process is examined from a spark discharge to a flame kernel growth. The spark channel behavior is modeled by particles movement. It is possible to estimate the thermal energy transfer from the spark channel behavior to the gaseous mixture.

研究分野：熱工学

キーワード：燃焼 プラズマ 熱機関 分光計測 燃焼CFD

1. 研究開始当初の背景

化学反応領域の微細構造を光学的、電気的に調査する研究は今までに多くあるが、近年、数値計算の進展により、直接数値計算手法 (DNS) 等を用いて基礎的な現象把握が可能になってきた。しかし、点火プラグやグロープラグなどの強制着火の場合、着火前の状態、すなわち、プラズマの生成から熱核になり着火に至るプラズマ形成からの化学反応過程は、火花放電挙動も含め、不明な過程が多く、数値計算も未だ手の届かないところである。プラズマ形成から熱核になり着火に至る過程をナノ秒、マイクロメートルオーダで計測された例もほとんど見られない。レーザや火花放電を用いることで、ナノ秒でのエネルギー投入、プラズマ形成過程からガス温度へ遷移する熱移動現象過程を把握することで、化学反応現象にプラズマ工学を取り入れて見直す機運が高まっている。

火花放電を着火に用いる熱機関においては、熱効率向上、異常燃焼抑制のために燃焼室内の高乱流化が行われている。高乱流化に伴い、火花放電挙動は影響を受け、着火の不安定性につながっている。さらに燃料噴霧や強い空気流動の影響により、火花放電は引き伸ばされ、着火位置の変更を余儀なくされる。希薄燃料混合気においては、この火花放電挙動が着火位置を変更し、火炎伝播特性に影響を与える。熱機関における数値計算においては、この火花放電挙動をモデル化していないことで、希薄燃料混合気における計算結果精度が不十分な原因となっている。そのため火花放電挙動ならびにプラズマ形成から熱核への熱移動現象をモデル化することで、着火位置、着火時期を把握することが可能となり、精度が高い数値計算を可能とする。

研究代表者らは、上記のような背景に基づき、今までに火花放電による微小領域における化学反応や着火に関して、ナノ秒オーダの分光手法等によって研究を開始している。火

花放電過程は、ナノ秒でのブレイクダウンからマイクロ秒オーダでの着火に至る過程と考えられている。その結果、大気圧、室温状態における着火過程では、ある程度のプラズマ強度が形成され、その後 100 マイクロ秒程度経過した後にガスの化学反応が開始していることが分かってきた。また、燃焼室内流れ場によって、火花放電の挙動が影響を受ける様子を可視化し、その後の火炎伝播に与える影響を評価してきた。

2. 研究の目的

熱機関における着火・点火は、ナノ秒で生成される火花放電などの非平衡プラズマによりプラズマ電子温度が上昇し、周囲への熱移動によりガス温度が上昇し、化学反応が開始する。本研究では、シリンダ内流動により火花放電が影響を受け、熱核形成に至る過程を明らかにする。そのため、火花放電におけるプラズマから周囲ガスへの熱移動現象を時系列計測し、モデル化することを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 圧縮膨張機関を用い、高温・高圧環境下での火花放電から初期火炎核形成に至る過程を高速度カメラにより可視化する。この際、超高速カメラに超距離顕微鏡を組み合わせることで、スプレイガイド方式筒内直噴機関において燃料噴霧が点火プラグに衝突する様子を局所・高速可視化を行う。また、噴霧により引き伸ばされる火花放電を可視化する。

(2) 予混合気において、火花放電から形成される初期火炎核の様子を時系列可視化する。この際、光ファイバを組み込んだ点火プラグおよび高応答検出器を組み込んだ分光器を用い、火花放電ならびに初期火炎核からの分光スペクトルを時系列にて計測する。これにより、火花放電からプラズマ形成に至る非平衡熱バランス、着火そして火炎核形成から持

続的燃焼への遷移過程について、これらの非線形物理・化学現象を把握する。

(3) 実験的に得られた火花放電挙動ならびにプラズマ形成から熱核へ至る着火過程をモデル化し、熱機関における着火位置、着火時期を評価する。火花放電をプラズマ点が線状に連なった集合体としてモデル化する。プラズマ点から流体メッシュ側にエネルギーを与えることで素反応モデルにより着火現象を表現した。点火プラグ近傍の乱流構造を予測するために、LES (Large Eddy Simulation) を用いた。これにより、噴霧等の影響を受ける条件でも火花放電挙動を予測し、着火位置、着火過程を再現できるものと考えている。

4. 研究成果

(1) 実験機関として、モータにより所定の回転数まで駆動後、1 度だけ燃焼を行う圧縮膨張機関を用いた。シリンダには混合気タンクがつながっており、真空ポンプを用いてシリンダおよび混合器タンク内を真空にする。その後、均一予混合気を所定の圧力で充てんし、600rpm でモータ駆動後、バルブを瞬間的に閉じ、所定の点火時期に一度だけ点火して燃焼させることにより燃焼時の放電の様子および火炎の撮影を行った。燃料は C_3H_8 と空気の混合気を用い、初期圧 90kPa、初期温度 90 で実験を行った。この機関の特徴として、残留ガスの影響を考慮する必要がないため、高い再現性を持った実験を行うことができる。シリンダ壁面には可視化窓が設けられており、それによってサイドビューからの火花放電の撮影が可能となっている。また、拡張ピストンのヘッドはボア径 78 に対して 52 が可視化窓になっており、ミラーで反射することで、ボトムビューからの火炎の可視化も可能となっている。図 1 にサイドビューならびにボトムビューから見たプラグおよび吸気バルブの位置関係を示す。ボトムビューの画像に対してサイドビューは左下からス

パークプラグを撮影する位置関係となっている。また、筒内直噴機関を構成するために、シリンダヘッド部に燃料噴射インジェクタを設置した。

火花放電および火炎伝播の撮影にはナックイメージテクノロジー製高速度カメラ MEMRECAM GX-8 および MEMRECAM GX-1 を使用した。撮影速度は火花放電を 60,000fps、火炎伝播を 4,000fps とした。点火プラグはプラグギャップ 1.1mm のものを使用し、実験は各条件につき 10 回ずつ行った。点火プラグの放電電圧を調査するためにテクトロにクス社製 P6015A 型 1000:1 高電圧プローブを用いた。

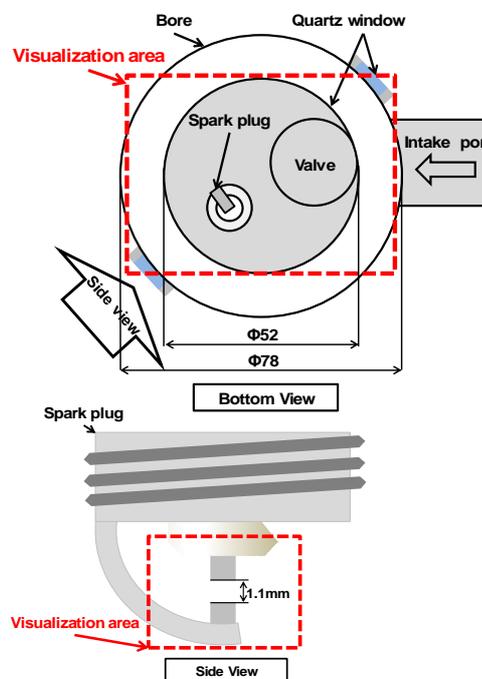


図 1 圧縮膨張機関における点火プラグならびにバルブ等の位置関係

まず、希薄燃焼時における火花放電と火炎伝ばの様子を可視化した。図 2, 3 に当量比 0.6 の同じ条件において同時撮影された火花放電および火炎の画像の例を示す。図 2 より希薄燃焼時には、火花放電が流れの影響を受けて大きく左方向に流されていることがわかる。火炎画像と比較してみると、放電が流された方向と同じ方向に初期火炎が

形成されていることがわかった．図3の画像では火花放電の初期形成位置からの移動は少なく，初期火炎もプラグを中心として形成されていることが確認できる．他の方向に関しても放電の移動方向と初期火炎の形成位置に相関が確認できた．そこで，次に当量比0.6の燃焼のばらつきが大きい条件で火花放電の移動量が大きい場合と移動量が少ない場合において燃焼特性に影響を与えるかを調査した．サイドからみて放電が左方向に移動しているものと同時にボトムからの火炎の形成が同様に左方向に移動しているものをピックアップして火花放電の最大移動量とMFBmax(燃焼質量割合の最大値)の関係を図4に示した．燃焼質量割合が低くなると火花放電の最大移動量が比較的大きくなることがわかった．これより火花放電の移動により初期火炎核の位置が変化し，火炎伝播の中心位置に影響を与えることが分かる．希薄燃焼時には，燃料濃度が低いために，混合気の誘電率が下がり，要求電圧が高くなる．この場合，火花放電は安定せず，点火プラグまわりの流れの影響を強く受け，火花放電から初期火炎核形成位置が不安定になる．この不安定な火花放電からの初期火炎核形成位置の影響により，燃焼質量割合は影響を受け，サイクル変動の要因になる．

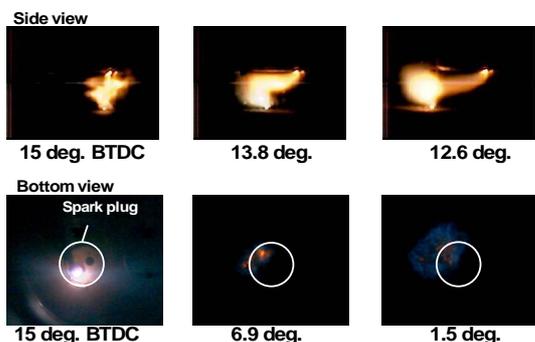


図2 火花放電並びに初期火炎核の可視化
($\phi=0.6$, Case 1, MFBmax=16%)

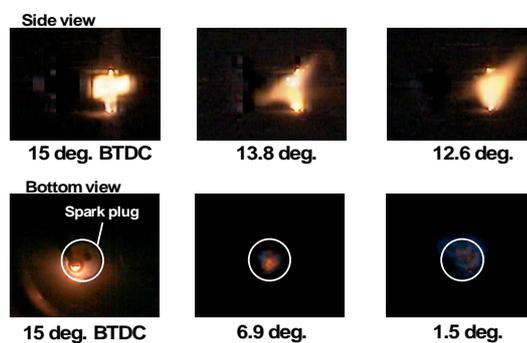


図3 火花放電並びに初期火炎核の可視化
($\phi=0.6$, Case 2, MFBmax=14%)

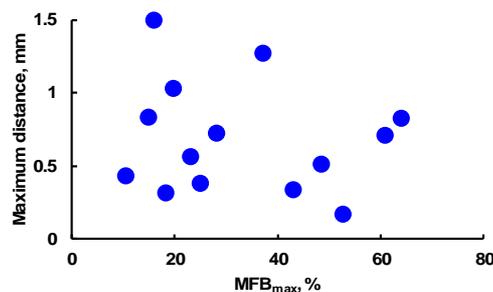


図4 燃焼質量割合の最大値と火花放電移動量

次に筒内直噴時における燃料噴霧と火花放電の干渉の様子を可視化した．可視化には，撮影速度1Mfpsの超高速モノクロカメラに長距離顕微鏡を組合せることで，噴霧ならびに火花放電の可視化を実現した．図5に点火プラグに衝突する噴霧ならびに噴霧に影響を受け，引き伸ばされ，不安定になる火花放電を示す．左から右に噴射される燃料噴霧が点火プラグに衝突する様子ならびに点火プラグギャップ間に燃料噴霧に入り込み，火花放電が不安定になり，左から右に引き伸ばされている様子が分かる．超高速ビデオカメラと長距離顕微鏡を組合せることで，噴霧に影響を受けて引き伸ばされる火花放電の様子を可視化することができた．

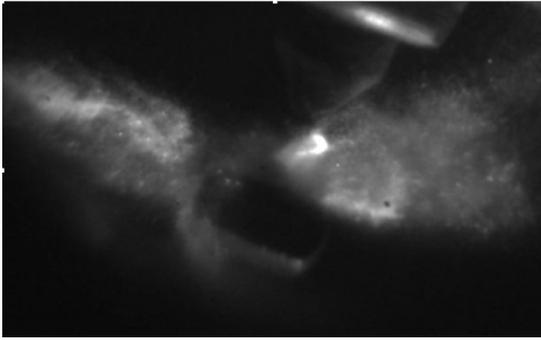


図5 燃料噴霧と火花放電の干渉

(2)光ファイバを組み込んだ点火プラグおよび高応答検出器を組み込んだ分光器を用い、火花放電ならびに初期火炎核からの分光スペクトルを時系列にて計測する。本研究ではM12の点火プラグに改良を施し、コア径1000 μm の光ファイバ(三菱電線製,STU1000H)を挿入している。光ファイバの先端はサファイア窓で保護し、筒内圧による光ファイバの損傷を防いでいる。分光器には、Andor社製EMCCDを取り付け、Fast kinetics modeにより最大5.2kHzでの時系列分光計測を可能にした。

図6に開発した光ファイバ組込型点火プラグならびにEMCCD分光器により得られた火花放電からの自発光スペクトルを示す。火花放電期間中の点火から0.42msにおいては、CN*の2つのピークスペクトルが得られた。初期火炎核形成時(2.11ms)には、OH*に2つのピークが見られ、初期火炎核からのCH*スペクトルも観察できた。これらの火花放電ならびに初期火炎核からの自発光スペクトルを用いて、プラズマ温度ならびに火炎温度を算出した。図7に希薄燃焼時において得られたCN*スペクトルを用いたプラズマ温度ならびにOH*スペクトルを用いた火炎温度を示す。プラズマ温度は6,000K以上の温度を示している。初期火炎核の温度は、2,000K程度であり、おおよそ断熱火炎温度と一致している。これらの温度は、Malyら⁽¹⁾によって説明されているプラズマ温度ならびに初期火炎核温度と一致している。火花放電は電氣的に励起

された高いプラズマ温度で形成され、その熱が周囲の混合気に伝わり、化学反応が開始する。化学反応が開始されることで火炎の温度は断熱火炎温度に到達し、火炎伝ばへと推移する。

⁽¹⁾Maly, R., and Vogel, M., Proc. Combust. Inst. 17 (1976) 821-831.

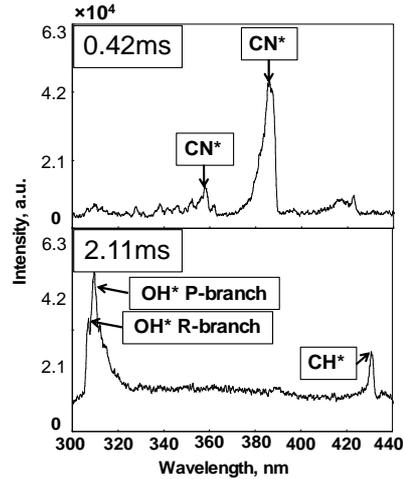


図6 火花放電ならびに初期火炎核からの自発光スペクトル

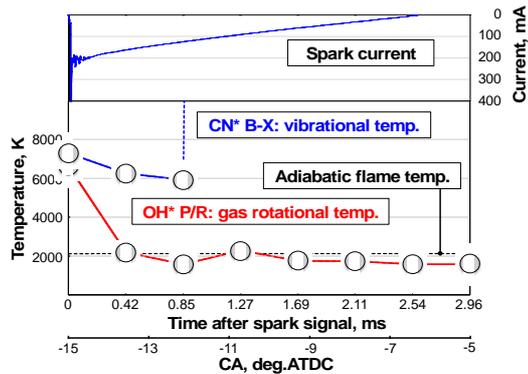


図7 プラズマ温度ならびに初期火炎核温度の時間変化

(3)実験的に得られた火花放電挙動ならびにプラズマ形成から熱核へ至る着火過程をモデル化する。本研究では、GTTコードを使用して開発したモデルを組み込んだ。火花放電をプラズマ点が線状に連なった集合体としてモデル化する。ここで、放電粒子の移動速度は、その粒子が存在する計算セルでのガスの速度を用いて表される。プラズマ点から流

体メッシュ側にエネルギーを与えることで素反応モデルにより着火現象を表現した。点火プラグ近傍の乱流構造を予測するために、LES (Large Eddy Simulation)を用いた。GTTコードにSmagorinskyのSGSモデルを導入し、LESを実現した。

図8に点火プラグ後流に形成される乱流渦の様子を示す。点火プラグ中心部の断面と点火プラグギャップ間中央部の流動場を示している。点火プラグ上部からの流れの影響により点火プラグギャップ間を通った後の主流部の流れが下方に蛇行する様子が再現することができた。火花放電の様子を時系列に並べたものを図9に示す。RANSでは矩形に伸びていく放電挙動を示すが、LESで流動場を計算することで複雑な流動に放電が影響され変化の様子が再現できた。

最後に火花放電から混合気側にエネルギーを与え、着火する様子を再現した。着火後は、火炎伝ばモデル(G方程式)により火炎が伝ばする。図10に燃焼ガス温度を示す。火花放電から混合気に熱エネルギーを与え、着火させることで、実験による火炎伝ばの様子を再現することができた。

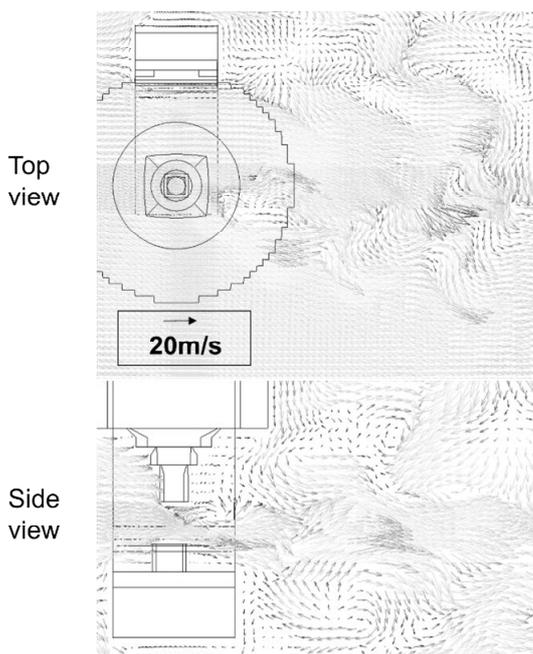


図8 LESによる点火プラグ後流の流れ場

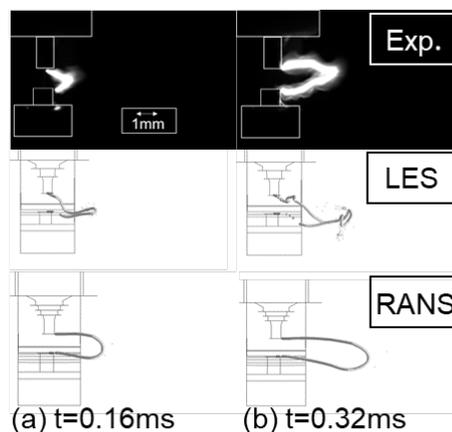


図9 火花放電の様子 (LESとRANSの比較)

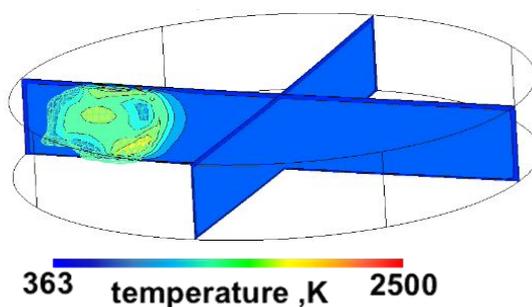


図10 火花放電からの火炎伝ば (CFD結果)

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 1 件)
河原伸幸, 富田栄二, 「火花点火機関における希薄燃焼時の火花放電・火炎伝播の同時可視化」, 自動車技術会 2016 年度春季大会

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河原 伸幸 (KAWAHARA NOBUYUKI)
岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 30314652