

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04327

研究課題名（和文）燃料組成が初期火炎核成長および最小着火エネルギーに及ぼす影響の解析

研究課題名（英文）Effects of Fuel Composition on Initial Flame Kernel Growth and Minimum Ignition Energy

研究代表者

堀 司 (Hori, Tsukasa)

大阪大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：40744066

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、燃料組成が初期火炎核成長および最小着火エネルギーに及ぼす影響を調べることを目的とした。まず、定容容器を用いて、火花放電による球状伝播火炎の計測装置を構築した。燃料はメタン、アンモニア、水素、ヘプタンの単体とそれらの混合燃料とした。火炎核の成長速度と層流燃焼を計測し、混焼時における反応機構の検証を実施するデータを取得した。次に熱プラズマを考慮した火花放電および火花放電から火炎核成長を計算する手法を構築し、流動下における火花放電の伸長、再放電、短絡現象の予測に成功した。さらに、反応機構を用いて、最小着火エネルギーに及ぼす燃料組成の予測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、メタンに加えて、カーボンフリー燃料である水素やアンモニアを組み合わせた場合の燃焼特性を実験により計測するとともに、プラズマを含む多成分系での燃焼の数値解析手法を開発した。本成果により、反応計算の精度改善が期待できるとともに、これまで実現が難しかった最小着火エネルギーを計算により予測できるようになった。本研究の成果により、内燃機関の効率改善に最適な燃料の組み合わせの机上検討が実施できるようになり、内燃機関における水素、アンモニア、合成燃料の燃焼利用促進が期待される。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study was to investigate the effects of fuel composition on initial flame growth and minimum ignition energy. First, a sphere-propagating flame measurement system was constructed using a fixed volume vessel. The fuels used were methane, ammonia, hydrogen, heptane, and their mixtures. The growth rate of the flame kernel and laminar flame speed were measured, and data were obtained to verify the reaction mechanism in the case of co-combustion. Next, we developed a method to calculate the flame kernel growth from spark discharges considering thermal plasmas, and succeeded in predicting the extension, re-discharge, and short-circuit phenomena of spark channel under flow. Furthermore, we succeeded in predicting the fuel composition on the minimum ignition energy by using the reaction mechanism.

研究分野：燃焼工学

キーワード：火花点火 プラズマ 数値解析 層流燃焼速度 内燃機関 火花点火機関 火炎核

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動車用内燃機関の燃費改善のため、従来よりも希薄な燃料と空気の混合気を燃焼させる方式(超希薄燃焼)が注目されている。超希薄燃焼は比熱比向上と火炎温度低下に起因した冷却損失の低減によって、内燃機関の熱効率が改善される。超希薄燃焼の実用化には、希薄燃焼によって不安定化する点火や火炎伝播の過程を安定化する手法が必要となる。このため、点火エネルギーの増加や周囲気体流動の最適化が実施されている。さらに、再生可能エネルギー由来の電気から合成燃料の活用が期待されている。これによると、ガソリン以外の炭化水素、アルコール、含酸素燃料、アンモニアやそれらを混合した燃料利用が検討され、数種類の燃料を混合した場合に、内燃機関の効率が改善されることが報告されている。点火は火花点火機関の効率改善に重要な技術であるが、定量的な数値解析がなく、それを検証する実験データが不足している。

2. 研究の目的

実機ではピストン圧縮による高密度場で放電がなされるため、放電経路が周囲流動により伸長する。ある一定まで放電経路が伸長されると、新しい放電経路が形成(再放電、短絡)される。この現象は一回の放電期間に複数回生じる。量論燃焼(ストイキ燃焼)の火花放電機関では、放電開始後すぐに火炎が成長するため、放電経路の伸長、再放電、短絡の三次元的な挙動は燃焼特性に影響しない。超希薄燃焼では燃焼速度が低下しているため、放電経路の三次元的な挙動が燃焼に影響を及ぼす。火花放電機関の熱効率改善には、火花放電による点火現象の理解や数値予測が重要となる。一方、火花放電過程はプラズマを伴う複雑な現象であること、量論燃焼では火花放電過程の三次元的な挙動は燃焼特性に影響しなかったことなどから、火花放電に関する研究は進んでいるとはいえない。数値解析においては、プラズマや放電経路を考慮することはほとんどなく、火花放電の現象熱爆発理論に基づくモデルや熱供給など、プラズマを考慮しない方法で数値解析がなされてきた。火花放電の計算方法は、火花点火機関の性能を示す、サイクル変動、失火の計算に直結する。

本研究では、異なる燃料を用いた点火実験と数値解析から、燃料組成が初期火炎核成長速度と最小点火エネルギーに及ぼす影響を把握することを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 火炎核成長および層流燃焼速度の計測

実験においては、定容容器を活用し、静止場中で火花放電により予混合気を火花点火させて、球状の火炎伝播過程を観察する計測装置を作成した。図1に実験装置の概略図を示す。実験装置は定容燃焼容器、ガス供給・排気系、点火系、シュリーレン光学系からなる。定容燃焼容器の燃焼室は一辺100 mmの立方体で、側面にシュリーレン計測用の石英ガラス窓が設けられている。容器上部には混合気攪拌用のファンが取り付けられており、気密性を保つため、マグネットカップリングでモータと接続されている。また、液体燃料の沸点以上に雰囲気温度を変更するため、ヒータが取り付けられており、PID制御で任意の温度に設定できる。燃焼室内へのガス供給は分圧方式で行った。真空ポンプで真空引きした後、流路中の圧力センサによって所定のモル分率になるよう燃料および空気を充填した。予混合気の着火は定容容器側面から挿入した針状電極によって行った。シュリーレン光学系の光源は、ハロゲンランプを使用し、ピンホールにより点光源とした。レンズで平行光にし、燃焼室を通過したのち再び集束、アイリスによって火炎面の密度差で屈折した部分の光を遮り、明暗のコントラストによって火炎を可視化した。ハイスピードカメラで、火炎の成長を撮影した。カメラ(Vision Research社製、Phantom V12.1、21000 fps)の分解能は約0.12 mm/pixelである。図2に示すように計測結果から、火炎領域を画像処理によって同定し、火炎核の径や層流燃焼速度を計測した。

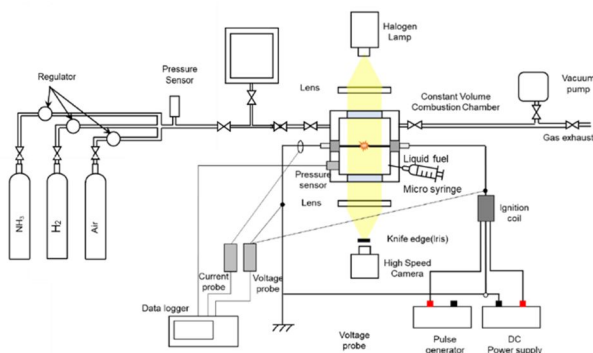


図1 実験装置

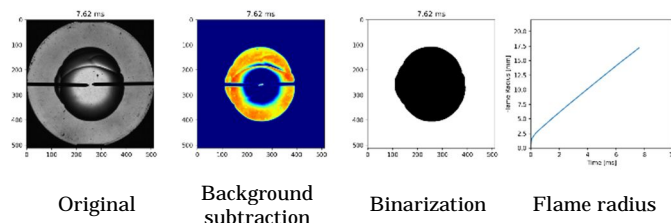


図 2 火炎核の計測

本研究における，層流燃焼速度の計測，解析手法の妥当性の確認のため，n-ヘプタンおよび既往研究で多く計測されている水素の専焼条件を行った．また常圧条件においてはアンモニア/水素/空気，アンモニア/n-ヘプタン/空気予混合気を当量比，混合割合を変化させた．高压条件においては当量比を1とし層流燃焼速度の計測を行った．

(2) プラズマを考慮した火花点火解析手法

放電経路の伸長過程を数値解析によって考慮するため，プラズマを考慮した計算手法を開発した．プラズマを厳密に解く場合，電子の振る舞いを追跡する必要があり，計算負荷が膨大となる．そこで，電子，イオン，原子の温度が局所で同じ（局所熱平衡）と仮定し，熱プラズマを考慮した熱プラズマの考慮でプラズマの組成が計算されるため，その組成に基づいて熱伝導率，比熱，拡散係数，粘性係数，電気伝導率などの物性を2万Kまで計算するコードを開発した．さらに，素反応を考慮した燃焼解析コードに対して熱プラズマと電磁場の計算手法を組み込んだ．また，放電経路の伸長や再放電を考慮する計算手法を開発した．

4. 研究成果

主な研究成果

(1) 混焼条件を含む火炎核成長速度と層流燃焼速度

定容容器を用いた実験により，メタン，水素，アンモニア単体の燃料を用いて，層流燃焼速度に及ぼす当量比の影響を計測し，他の研究と同程度の結果が得られることを確認した．さらに，これらの燃料の混焼条件における層流燃焼速度のデータを計測した．図3に水素アンモニア混焼の結果を示す．これらのデータは，混焼条件での反応機構の検証データとして活用が期待できる．

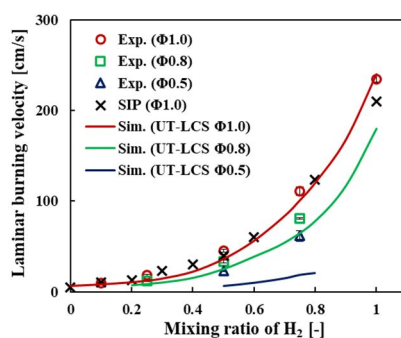


図 3 水素アンモニア混焼の層流燃焼速度

(2) 放電経路伸長過程の数値解析手法の構築

火花放電の放電経路伸長，再放電を含む計算を実施した．周囲気体の流動や圧力を変化させた場合の計算を実施し，火花放電の伸長速度や再放電が生じる時間における放電経路長などが実験とよく一致することを確認した．

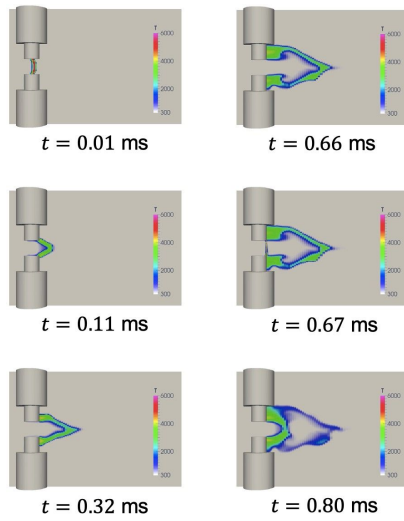


図4 空気中での放電経路伸長の解析

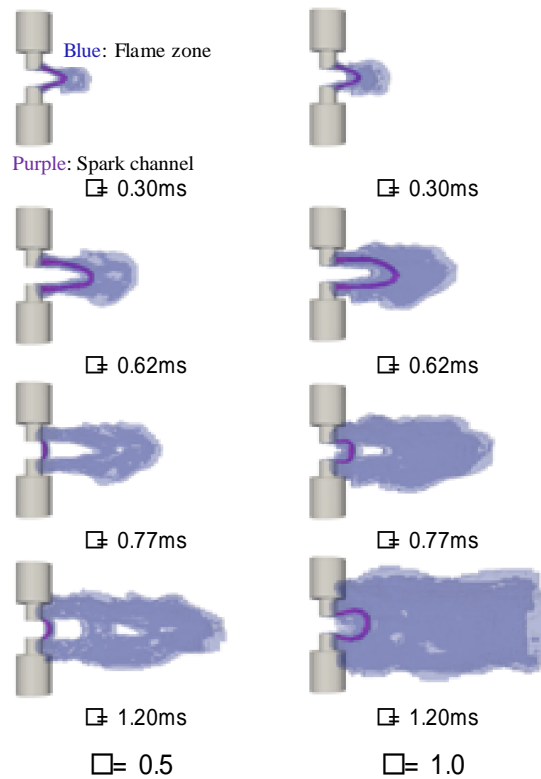


図5 メタン空気予混合気中での燃焼解析

(3) 最小点火エネルギーの数値予測手法

熱プラズマを考慮して最小点火エネルギーを予測することに成功した。放電直後に生成される噴流で、トロイダル型の火炎核の過程が計算された。層流燃焼速度については実験と同様の傾向が得られた。図6に最小点火エネルギーの予測値を示す。選択的拡散によって燃料ごとに最小点火エネルギーが最小値となる当量比が変化する現象の計算に成功した。本手法は混合燃料についても適用できる。

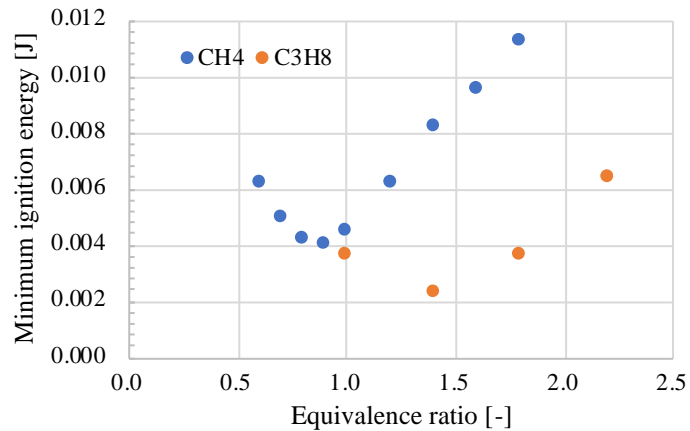


図6 数値解析による最小点火エネルギーの予測

得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

混焼条件における層流燃焼速度に関しては、計測例がすくなく、貴重なデータといえる。放電の計算に関しては、実験値の再現性が高く、国内外を通じて研究例はない。熱プラズマから火炎の計算までを実行している例についても国内外でほとんどないと考えられる。本手法は計算負荷も比較的低いことから、実機を対象とした計算においても、点火の1つの計算方法として活用できる。

今後の展望

最小点火エネルギーの数値予測の定量性を改善すること、乱流中での点火予測を確かめること、より幅広い燃料や温度、圧力条件で精度を検証することなどが今後の課題と考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 今橋裕, 堀司, 赤松史光
2. 発表標題 プラズマ物性を考慮した火花点火機関における放電経路伸長と短絡のモデリング
3. 学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yu Imahashi, Daiki Kudo, Ryuichi Murai, Tsukasa Hori, Fumiteru Akamatsu
2. 発表標題 Modeling of spark channel elongation and short-circuit in SI engine considering plasma properties
3. 学会等名 Heat Transfer Society of Japan, Science Council of Japan (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今橋裕, 村井 隆一, 堀 司, 赤松 史光
2. 発表標題 スーパーリーンバーンを適用した火花点火機関における火花放電挙動のプラズマ燃焼シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第97期定時総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今一記, 森本巖, 堀司, 赤松史光
2. 発表標題 初期化火炎核成長過程に及ぼす燃料組成の影響
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第96期定時総会講演会
4. 発表年 2021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
---------	---------