

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：科学研究費補助金（基盤研究(C)）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560213

研究課題名（和文） 予混合-拡散ハイブリッド燃焼法による燃焼制御とその応用

研究課題名（英文） Combustion Control Using Premixed-Diffusion Hybrid Combustion Method

研究代表者 川那辺 洋 (Hiroshi KAWANABE)

(京都大学大学院・エネルギー科学研究科・准教授)

研究者番号：60273471

研究成果の概要（和文）：水素を燃料とした内燃機関では、予混合燃焼させる方式が一般によく用いられる。しかし、この方式では火炎伝播速度が過大となって運転条件が制限される。そこで、局所的に燃料過濃および希薄となるような濃度不均一の混合気を形成し、燃焼させることによって制御することを試みた。水素を高圧で噴射して作成した噴流に点火することによって燃焼を制御する。これにより、燃焼過程に予混合火炎伝播と拡散火炎が同時に形成されることを示すとともに、このような燃焼法をエンジン燃焼制御に適用した。

研究成果の概要（英文）：Generally, a premixed-charge spark-ignition system is used for the hydrogen-fueled internal-combustion engine. However in this combustion system, the flame propagation speed of the hydrogen mixture is excessively high, so that an operating condition is restricted. In this study, in order to control the combustion of the hydrogen mixture, non-homogeneity of fuel-air mixture concentration is applied. In the near stoichiometric region, the combustion dominated by the flame propagation speed, and in the rich or lean region the combustion dominated by mixing. Here, in order to form the non-homogeneous mixture, a high-speed unsteady-jet was used, and this system was used for a real engine.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 21 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
平成 22 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
平成 23 年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱機関、不均一燃焼、水素、数値解析、レーザ計測

1. 研究開始当初の背景

水素は二次エネルギーとして着目されており、その有効な利用が望まれている。水素から動力を取り出す場合は、例えば燃料電池による発電とモータの組み合わせが想定されているが、近年、水素を燃料とした内燃機

関が、簡便な装置により比較的高い効率を高めるために期待されている。現在、水素エンジンでは均一の予混合気を吸気ポートで作成し、火花点火する方式が主に用いられているが、この方式ではエンジン負荷が高いときに過早着火およびノッキング等の異常燃焼が生じるために、効率が制限される。これを回避するために、筒内直接噴射火花点火(DI-SI)

方式が一部採用されている。

そもそも、均一予混合火花点火方式において高負荷運転時にノッキングが生じるのは水素の燃焼速度が他の炭化水素系燃料に比べて著しく大きいためである。この点において筒内直接噴射式では、燃料噴射によって筒内において形成される混合気分布を制御するとともに、燃料噴射率によって燃焼率をコントロールしている。しかし、筒内に噴射するためには高圧の水素を準備する必要があり、噴射系等の負荷も大きい。このために、燃料供給系はできるだけ低い圧力のものが望ましいが、現在の直接噴射方式を用いる限りは困難である。

2. 研究の目的

そこで本研究課題では、予混合燃焼における火炎伝播速度がエンジン使用時には過大になってしまう水素予混合気において局所的に燃料過濃領域および希薄な領域となるような濃度不均一の混合気を形成し、そのなかを火炎伝播させることによって燃焼を制御することを試みる。すなわち、同じ総括当量比であっても分布特性を変化させることによって燃焼速度を上昇あるいは抑制して、制御することが可能となる。このとき、可燃限界内の混合気は火炎伝播し、それよりも濃いあるいは薄い混合気は混合・拡散律速となるために、基本的には拡散火炎を形成する。すなわち、これらの比率を局所的に変えることによって、燃焼を制御することを目的とする。

3. 研究の方法

このことを明らかにするためにまず、定容燃焼装置を用いて、非定常噴流により作成した不均一混合気に火花点火させた際の火炎伝播過程を明らかにする。このため、レーザ計測法を応用し、濃度分布を明らかにするとともに、ラージエディシミュレーション(LES)の手法を用いて不均一混合気火炎伝播の様子を理論的に解析し、その伝播メカニズムを明らかにする。また、この結果に基づき、レイノルズ平均型の乱流モデルの数値計算においてこのような不均一を記述する燃焼モデルを構築する。最後に、急速圧縮膨張装置を製作し、エンジン条件の燃焼に適用し、エンジン燃焼制御の可能性を検討する。

4. 研究成果

4.1 レーザ計測および数値計算による水素噴流内混合気分布の解析

レーザ計測および数値解析の手法を用いて、水素非定常噴流によって形成される混合気分布を明らかにした。

はじめに、高圧の定容容器中に形成される噴流内の燃料濃度分布をレーザ誘起蛍光法

によって計測し、混合気の瞬時分布を明らかにするとともに、平均値、変動値および可燃混合気の形成確率、等の統計量について検討し、以下の知見を得た。

(1) 周囲空気にトレーサを混入し、トレーサによる励起光吸収過程および励起光-蛍光強度の非線形性を考慮することで、噴流内燃料濃度を合理的に計測することができる。

(2) 水素噴流は、噴流内部に $\phi = 1.5 \sim 3.5$ の混合気が形成され、急激燃焼の要因となる。一方、噴流境界付近には $\phi = 0.5 \sim 1.5$ の可燃混合気が比較的広く分布している(図1)。

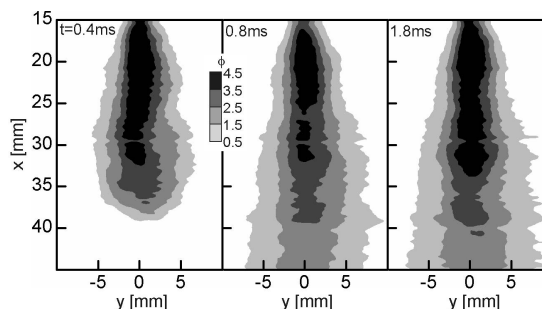


図1 非定常水素噴流における当量比分布

さらに、併せてラージエディシミュレーション(LES)を用いて、高速非定常噴流の流動および混合過程を計算し、各種噴射条件による混合気形成過程について検討した。その結果以下のことが明らかとなった。

(1) LES に仮想ノズルの考えを用いることにより、高速非定常噴流の発達・混合過程を合理的に記述できる。

(2) 周囲流体をエンタレインし湾曲した領域では歪み速度が高くなるとともに混合が活発になる(図2)。

(3) 混合が活発な領域の近傍には噴流内における濃度PDF分布で極大付近の濃度を示す混合気が多く存在する。

さらに、各種噴射条件が混合気形成に及ぼす影響について検討した結果、同時刻による比較において、

(4) 噴射圧力を低くすると、運動量分布の拡がり小さくコア領域が減少するために、混合気は速やかに希薄化する。

(5) ノズル径を小さくすると、初期に形成される渦が小さくなりせん断の効果が相対的に大きくなるために、混合気は速やかに希薄化する。

(6) 噴流密度が小さいと、乱れが物質輸送に対して相対的に弱く作用するために投入燃料あたりのエンタレイン体積は少なくなり、希薄化が遅れる。

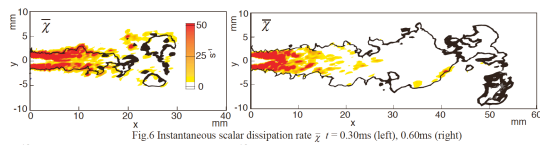


Fig.6 Instantaneous scalar dissipation rate z , $t = 0.30\text{ms}$ (left), 0.60ms (right)

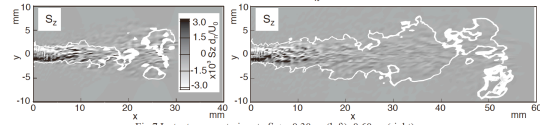


Fig.7 Instantaneous strain rate S_2 , $t = 0.30\text{ms}$ (left), 0.60ms (right)

図2 噴流内のスカラー散逸率およびひずみ速度の分布

4.2 数値計算を用いた水素噴流内燃焼の解析

定容容器内に噴射された水素噴流の流動および火花点火燃焼過程を $k-\epsilon$ 乱流モデルおよび火炎伝播モデルに基づいた CFD により解析した。これにより、実験結果をほぼ記述でき、とくに点火時刻による火炎伝播過程の変化に関して以下のことが明らかになった。

(1) 噴流発達初期において先端付近で点火をする場合、火炎は噴流先端の外縁に拡がり、その後、噴流境界を上流に向かって伝播する。これは、わずかに形成された噴流先端部の予混合気火炎伝播した後、噴流による燃料の供給に律速された燃焼になるためである。

(2) ある程度発達した噴流の中心部で点火をする場合は、燃焼初期は流動に流されるとともに、緩やかに火炎が拡がった後、急激な燃焼に至る (図3)。

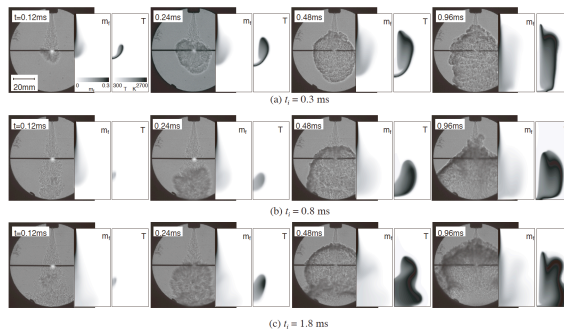


図3 種々の点火時期における燃焼過程の変化

(3) 水素の層流燃焼速度が大きいために、噴流内における火炎伝播過程においては、主に層流燃焼速度の大きい領域に向けて火炎が伝播する。

つぎに、LES (ラージエディシミュレーション) に火炎伝播モデルを組み込むことにより、水素噴流内の不均一な混合気中を伝播する火炎挙動を予測し、燃焼過程を解析する。噴射開始から点火までの期間 $t_i = 1.8\text{ms}$ における、非定常水素噴流の火花点火燃焼過程を計算した。図4に、点火からの時刻 t における混合分率 ϕ のノズル中心軸上断面分布を、

対応する可視化実験で得られたシャドウグラフ像と併せて示す。なお、 ϕ の分布には火炎面位置として $c = 0.5$ の等値線も表示する。ここで $t_i = 1.8\text{ms}$ は、ある程度混合気が形成された後に噴流の内部に点火する条件である。これによると、点火直後に火炎は噴流の内部において下流に流されるとともに拡大し、 $t = 0.48\text{ms}$ では既燃領域は噴流のほぼ全体に拡がる。その後、火炎が噴流半径方向に拡がる速度は点火直後に比べ遅くなる。この燃焼過程の特徴を理解するために、図2に、火炎の幅が最大となるノズル下流 $x = 50\text{mm}$ における熱発生率、当量比 ϕ および温度 T の分布を、火炎面位置および量論混合比の位置とともに示す。これによると、点火直後に、火炎面近傍に急激な熱発生が存在し、時間の経過とともにそのピークの値は減少する。また、火炎が量論混合比の位置よりも外側に達すると、火炎内側の量論混合比付近に熱発生が生じていることがわかる。すなわち、点火直後において、火炎は可燃混合気中を伝播するため急速に拡がり、その後は、量論混合比付近の拡散的な燃焼が主となるため、燃焼は比較的緩慢になる。

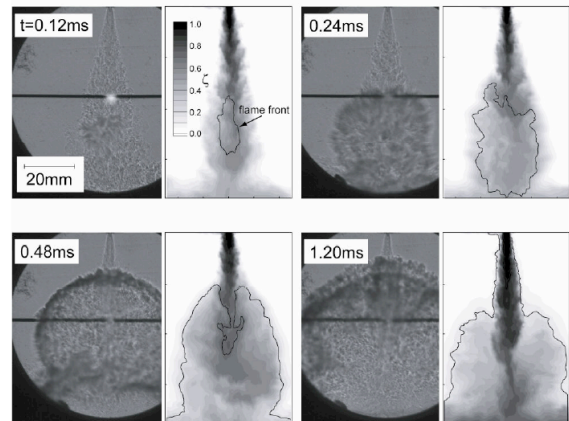


図4 混合分率 ϕ の分布および火炎面位置

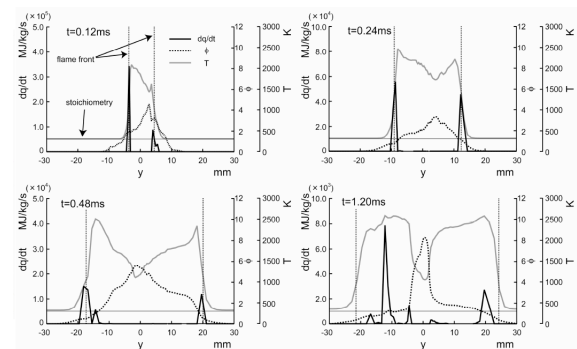


図5 噴流内の熱発生位置

4.3 筒内直接噴射火花点火 (DISI) エンジンにおける燃焼過程、性能および排気特性

DISI 水素エンジンを種々の噴射圧力の条

件で運転し、噴射時期や点火時期などの運転変数にかかる制約条件を把握するとともに、そのような制約の下でのエンジン性能および燃焼特性を明らかにした。とくに、実用的観点から低い噴射圧力における諸条件の変化に注目し、高い熱効率を実現するための運転指針について検討した。以下に得られた知見をまとめる。

(1) 水素噴射量の指定された条件においては、噴射圧力が低いほど熱効率極大となる噴射時期は早くなる。その際、噴射終了時期および点火時期は噴射圧力によらず一定となり、得られた熱効率の極大値もほぼ等しい。すなわち、低い噴射圧力でも良好な燃焼経過となるように噴射と点火の条件を選定できれば、高噴射圧力の場合と同等の高い熱効率を得られる(図6)。

(2) 高い噴射圧力では、圧縮行程の早い時期に噴射すると高負荷域においてノックにより運転が制限される。これに対し、低い噴射圧力ではノックの制限を受けないものの、噴射期間中に筒内圧力が噴射圧力を超える恐れがあるため、遅い噴射時期での運転範囲が制限される。とくに、高負荷条件において点火時期を進角できず、熱効率および負荷を増加する妨げとなる。

(3) 圧縮比を低くすると最高圧力の制約を受けずに点火時期を進角でき、とくに低い噴射圧力の場合に高負荷域が若干拡大するとともに熱効率が向上する。

(4) 深皿形燃焼室では、浅皿形と比較してガス流動が強まり燃焼が急激になる。そのため、熱損失が増加して熱効率は浅皿形の場合より低下する。ただし、低い噴射圧力の条件において高圧縮比で高負荷の場合には、深皿形の方が熱効率は高くなる。

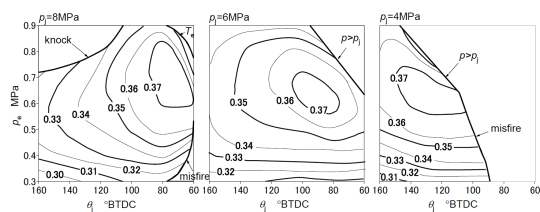


図6 噴射圧力に対する等熱効率マップの変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

①Condition or SI-CI Operation with Lean Mixture of Primary Reference Fuel and Hydrogen
Sopheak Rey, Haruo Morishita, Nobuhiro Aoyama, Toru Noda, Masahiro Shioji

International Journal of Automotive Engineering 2(2011)1-6

②水素噴流における火花点火燃焼過程のCFD解析

川那辺洋, 加藤亨, 塩路昌宏

日本機械学会論文集(B編), 76巻, 770号
1552-1557

2010-10

③種々の噴射圧力におけるDISI水素エンジンの運転条件および性能

塩路昌宏, 富田翔, 小松陽二, 伊藤章

自動車技術会論文集, Vol.40, No.5,
1279-1284

2009-9

④高速非定常水素噴流における混合気形成過程のLES解析

近藤千尋, 川那辺洋, 塩路昌宏

日本機械学会論文集(B編), 75巻, 754号,
1344-1350

2009-6

[学会発表] (計3件)

①高速非定常噴流における局所燃料濃度のLIF計測

妹尾隆志, 小坂尚司, 川那辺洋, 塩路昌宏

自動車技術会2010年秋季大会講演会

2010年9月29日

②非定常水素噴流における火花点火燃焼過程のLES解析

長谷川寛晃, 川那辺洋, 塩路昌宏

日本機械学会関西支部講演会

2010年3月17日

非定常水素噴流における自着火過程のLES解析

川那辺洋, 塩路昌宏

第48回燃焼シンポジウム

6. 研究組織

(1) 研究代表者: 川那辺洋 (Hiroshi KAWANABE)

(京都大学大学院・エネルギー科学研究科・准教授)

研究者番号: 60273471

(2) 研究分担者: 塩路昌宏 (Masahiro SHIOJI)

(京都大学大学院・エネルギー科学研究科・教授)

研究者番号: 80135524