

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760175

研究課題名(和文) 高圧・超希薄予混合気の自着火燃焼機構研究

研究課題名(英文) A Study of Auto-ignited Combustion Mechanisms of Ultra-lean Mixture under Elevated Pressure

研究代表者

飯島 晃良 (IIJIMA, Akira)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：50434121

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：希薄予混合気の自着火燃焼機構を明らかにするため、燃焼室内全域が可視化された機関を用いた実験及び燃焼解析を行った。特に、以下の点を調査した。(1)希薄予混合圧縮着火(HCCI)における急激な燃焼と燃焼室内圧力振動を伴う異常燃焼機構(2)フーリエ変換赤外分光(FT-IR)式ガス分析及び素反応数値解析を用いた、希薄予混合気の自着火燃焼過程。その結果、異常燃焼発生時の、燃焼室内での火炎の発現挙動の特徴を明らかにした。また、自着火燃焼時の反応プロセスとして、各温度場における燃料の消費、中間生成物の生成と消費、最終生成物の生成挙動とその素反応プロセス明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Combustion analyses were conducted with an optically accessible engine that allowed the entire bore area to be visualized for the purpose of making clear the characteristics that induce autoignition of lean air-fuel mixture. Specifically, we investigated as follows, (1) Characteristics of rapid combustion and knocking accompanied by in-cylinder pressure oscillation in homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion. (2) Reaction processes of autoignition and combustion in lean air-fuel mixture by using FT-IR gas analyses and chemical kinetic simulation. The results revealed that in extremely rapid HCCI combustion, the autoignited flame was dispersed in the cylinder in its initial stage, but the remaining unburned end gas rapidly autoignited at a certain point. That gave rise to knocking combustion accompanied by cylinder pressure oscillations. In addition, autoignition and combustion reactions were identified by gas analyses and chemical kinetic simulation.

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：燃焼 自着火 分光測定 可視化 圧力振動 異常燃焼 予混合圧縮着火 HCCI

1. 研究開始当初の背景

現代社会において、自動車、発電などの主要なエネルギー変換の多くを占める燃焼現象には、二酸化炭素等の温室効果ガスの排出及びエネルギー資源の大量消費等の課題が存在する。そのため、燃焼によるエネルギー変換を行う機器類（往復動式内燃機関、ガスタービン、ボイラー等）においては、エネルギー効率の徹底的な向上が常に求められている。

燃焼によるエネルギー変換プロセス（次世代火力発電、自動車、航空機等）は、高効率化のために高い圧力比での燃焼が必要になる。

熱力学サイクル論的に、当該装置の熱効率を向上させるには、圧力比と比熱比の向上が必須である。圧力比と比熱比の向上に対して、以下の課題が存在する。

< 圧力比の向上に対する課題 >

- (1) ガスタービンではタービン入口温度上昇に伴う耐熱問題と窒素酸化物 (NO_x) 生成問題
- (2) 自動車などでは、ノッキング、デトネーション等の異常燃焼の発生

< 比熱比の向上に対する課題 >

- (1) 比熱比向上のために超希薄化を行うと、予混合火炎伝播が成立しない

NO_x の生成は、局所的な高温部によって支配されるため、超希薄域で高圧の予混合燃焼が成立出来れば、高効率かつクリーンなエネルギー変換が実現される。しかし、希薄予混合気を火炎伝播により燃焼させることは、失火の発生により困難である。

2. 研究の目的

上記で示した、超希薄予混合気を燃焼させるための有望な手法として、自着火による燃焼に着目した。当該方式は、予混合圧縮着火 (HCCI) 燃焼等として知られる。火炎伝播限界を超えた希薄領域においても、自着火によって燃焼させることが可能である。しかし、失火や急激な燃焼を起こしやすく、その制御が困難なことが課題となっている。

つまり、高圧場における超希薄予混合気の圧縮自着火燃焼のメカニズムを詳細に理解することが、その制御にとって重要である。

3. 研究の方法

本研究では、連続急速圧縮燃焼装置を用いて、実際に超希薄予混合気の自着火燃焼実験を行った。当該燃焼を詳細に調べる手法として、燃焼室内の高速写真撮影と燃焼室内の分光計測、フーリエ変換赤外分光 (FT-IR) 法を用いた排ガス成分分析を実施し、自着火の発生、失火の発生、反応の完結性、許容できない急激な燃焼 (異常燃焼) の発生機構などを解析した。それらの一連の研究によって、高

圧場における超希薄予混合気の自着火燃焼機構を詳細に調べた。

連続急速圧縮燃焼装置を用いた実験システムの概略を図 1 に示す。

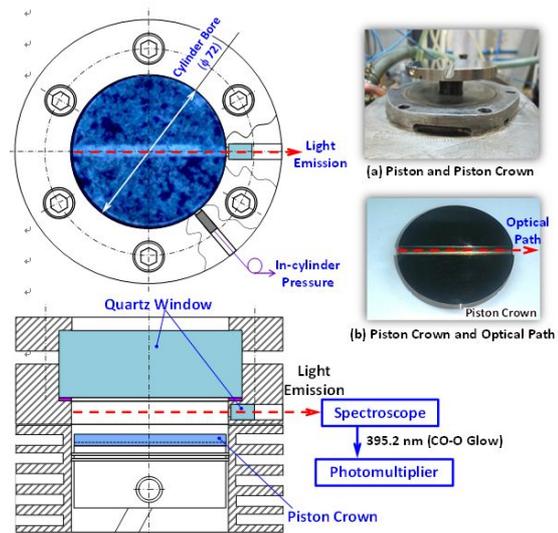


図 1 燃焼可視化及び分光測定システム

4. 研究成果

(1) 燃焼室内全域可視化エンジンを用いた、燃焼室内圧力振動を伴う自着火燃焼の発生挙動の解明

高圧場における希薄予混合自着火燃焼により、エンジンの熱効率の飛躍的な向上が期待できる。しかし、条件によっては燃焼室内の圧力の異常な振動が生じることがある。これまでに、特に海外の研究において、圧力振動が生じることや、圧力振動の特性はある程度理解されていたが、圧力振動が生じるときの燃焼火炎の発生挙動は知られていなかった。そこで本研究では、図 1 に示した燃焼室内全域が可視化されている燃焼装置を用いて実際に異常燃焼運転を行い、高速度カメラによって毎秒 54000 コマの高速写真撮影を行った。その結果、異常燃焼が生じていない場合と生じている場合とで、燃焼室内での自着火の発現挙動が大きく異なることが明らかになった。図 2 に、燃焼室内の圧力等の測定結果を示す。横軸がクランク角度であり、TDC が圧縮の上死点である。縦軸は、シリンダ内圧力 (Pressure)、圧力上昇率 (Pressure Raise Rate) 等である。図 2 の圧力波形 (Pressure, P) に着目すると、1 番の圧力波形では、圧力が滑らかに変化している。これは、正常な燃焼に伴う圧力上昇の曲線である。一方で、図 2 の波形 3、4、5 においては、頂点付近で圧力が振動しているのが分かる。これは、燃焼室内圧力振動を伴う異常燃焼が生じているためである。この時、燃焼室内の火炎の発生挙動にどのような違いがあるのかを明らかにするため、燃焼を可視化し高速度撮影を行った結果を示す。図 3 が、正常な燃焼時の可視化結果。図 4 が異常燃焼発生時の可視化結果である。図 3 の正常燃焼時においては、輝

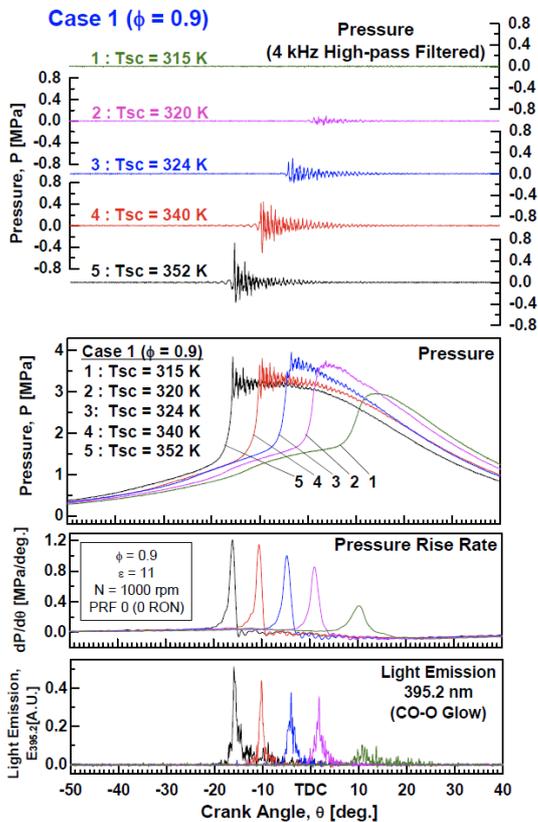


図2 燃焼室内の圧力等の測定結果

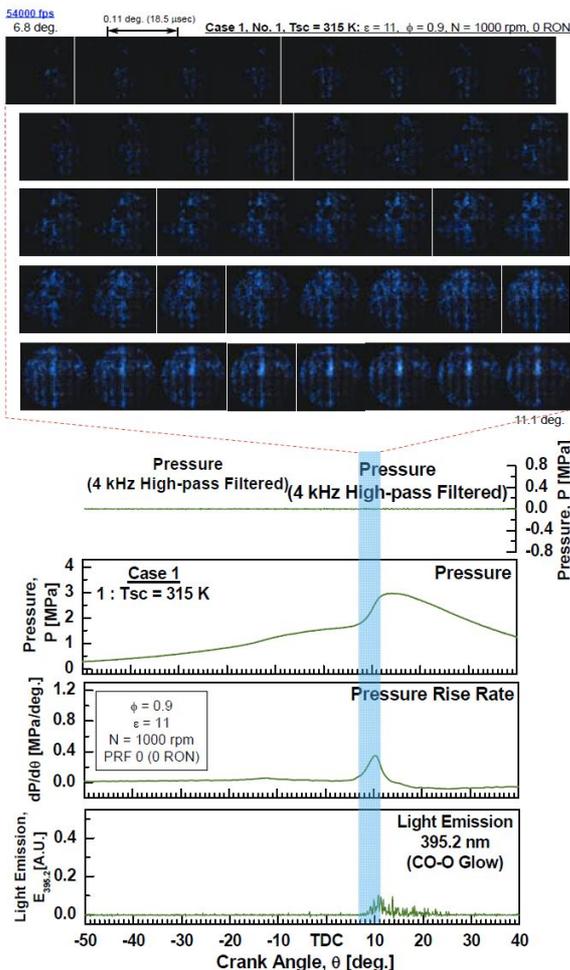


図3 正常燃焼時の可視化結果

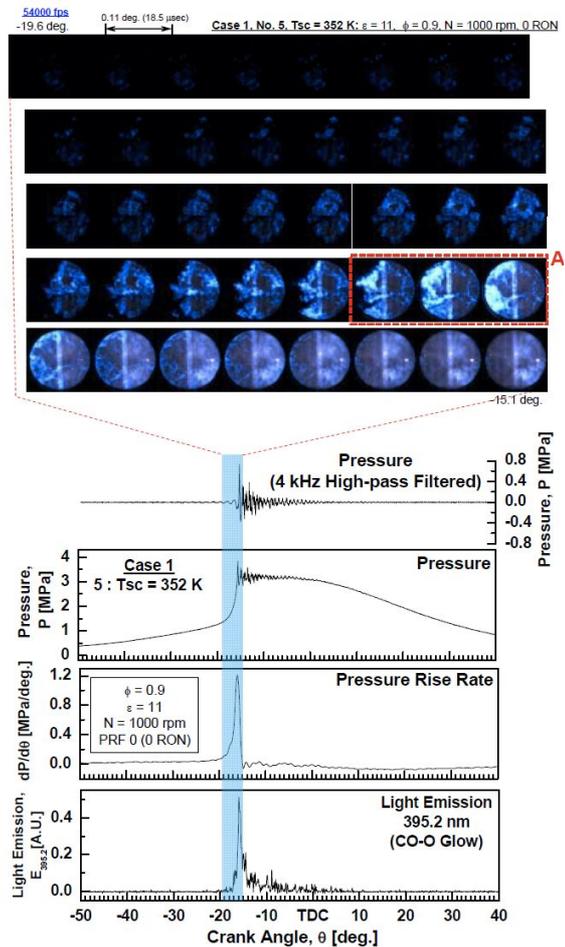


図4 異常燃焼時の可視化結果

度の低い青い火炎が燃焼室内で分散して生じているのが分かる。一方で、図4の異常燃焼時においては、初期の段階では局所で生じた青い火炎が徐々に他の部分でも生じていくが、燃焼の後半においては、輝度の高い火炎が燃焼室内で急速に発生していることが分かる(図4の領域A)。その局所的かつ急速な発熱の結果、燃焼室内に圧力振動をもたらしたものと理解できる。

以上のように、高圧場における希薄予混合気の自着火燃焼によって生じる、燃焼室内圧力振動を伴う異常燃焼が発生するメカニズムを可視化によって明らかにした。

(2) フーリエ変換赤外分光 (FT-IR) 法ガス分析及び反応数値解析を用いた高圧・超希薄予混合気の自着火燃焼反応の解析

自着火は、温度・圧力の上昇に伴い、複雑かつ低速・高速様々な化学反応が進行し、やがて爆発的な燃焼(自着火)に至る現象である。その途中段階においては、低温酸化反応と呼ばれる自着火前の複雑な反応現象や、自着火後には燃料が分解して一酸化炭素 CO や二酸化炭素 CO₂ に変化して完全燃焼に至るプロセスなどが含まれる。十分な温度場が得られなければ、未燃の燃料成分や CO 等の有害排出ガスが生じる。一方、必要以上の高温場を与えると、前述のような「急激な燃焼や

異常燃焼」が生じてしまう。そこで、燃焼室内の反応ガスを分析することで、どのような反応が進行しているのかを解析しつつ、化学反応の数値解析によってその際の素反応（一つの化学反応）プロセスを解析した。図5に、ガス分析の結果の一例を示す。天然ガスの主成分であるメタンと、次世代燃料の一つであるジメチルエーテル（DME）の混合燃料を用いて、様々な初期圧力場で急送圧縮自着火燃焼を行った結果である。横軸が吸気圧力（初期圧）である。初期圧が高いほど、多くの空気を吸入しているため、燃焼時の温度が低下する。その結果、急激な完全燃焼から緩慢かつ二段階に発熱する現象、部分的に反応した段階で不完全に燃焼が終了する現象、低温酸化反応のみが生じた段階で反応が終了する現象などが確認された。それらの各条件において、FT-IR でガス分析を行えば、どのような反応が起きていたかが推定できる。推定の結果、低温酸化反応でジメチルエーテルからホルムアルデヒド（HCHO）が生じる。自着火発生時にジメチルエーテルや HCHO が一酸化炭素 CO に変化する。その後、メタンが反応する。最終的に、CO が CO₂ に変化して完全燃焼に至る。という一連の反応プロセスを観測することができた。また、CO₂ に変化する温度（約 1500 K 程度）以上の温度場で燃焼をさせると、異常燃焼及び有害排出ガスである窒素酸化物（NO_x）を生じるリスクが高くなるため、自着火燃焼を行うべき最適な温度範囲が存在することを示した。

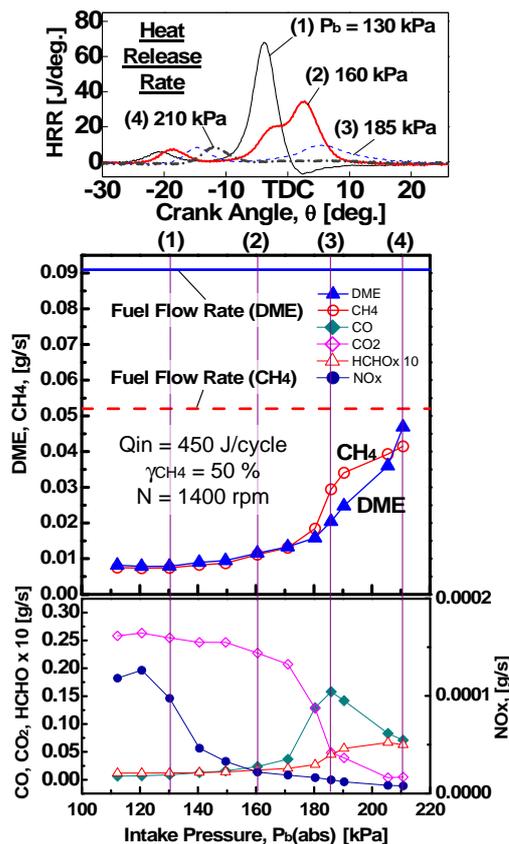


図5 メタン・DME 混合燃料の反応ガス分析

これらの結果を模擬した化学反応の数値解析を行い、燃焼反応プロセスを調べた結果を図6~8に示す。温度に応じてジメチルエーテル（DME）、ホルムアルデヒド（HCHO）、メタン、CO、CO₂ への反応が確認できる。その際の、反応の進行を素反応レベルで解析し、図7及び図8に示すような反応過程を示した。

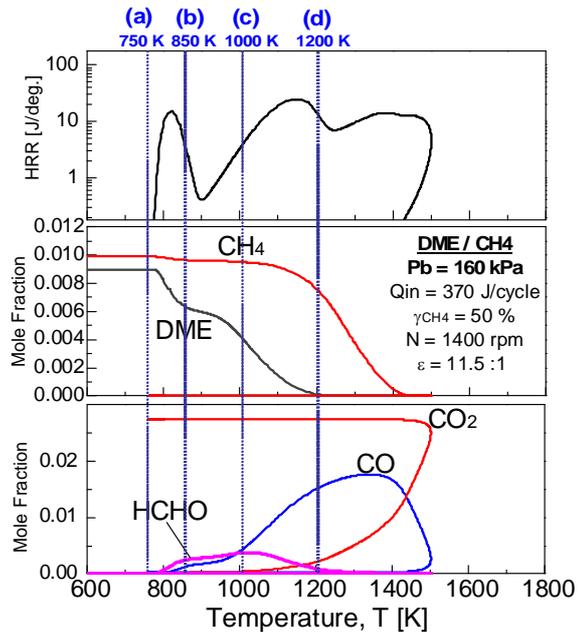


図6 メタン・DME 自着火反応の数値解析

Low-temperature Reaction

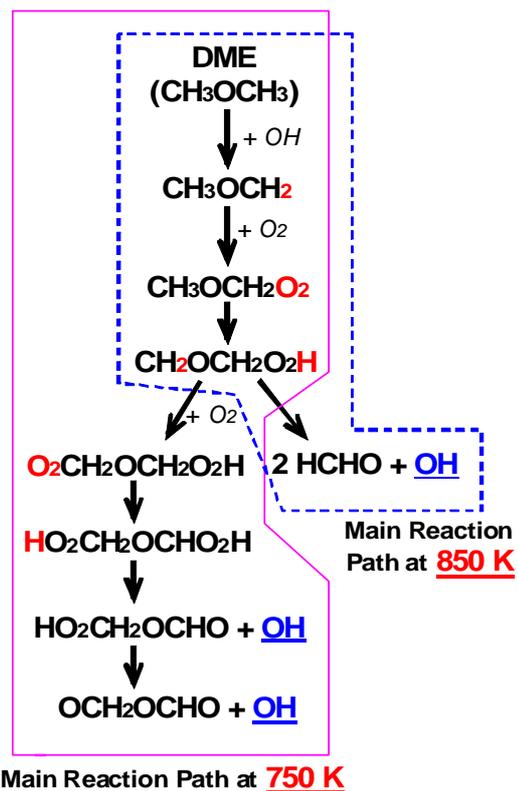


図7 低温酸化反応時の主たる反応機構

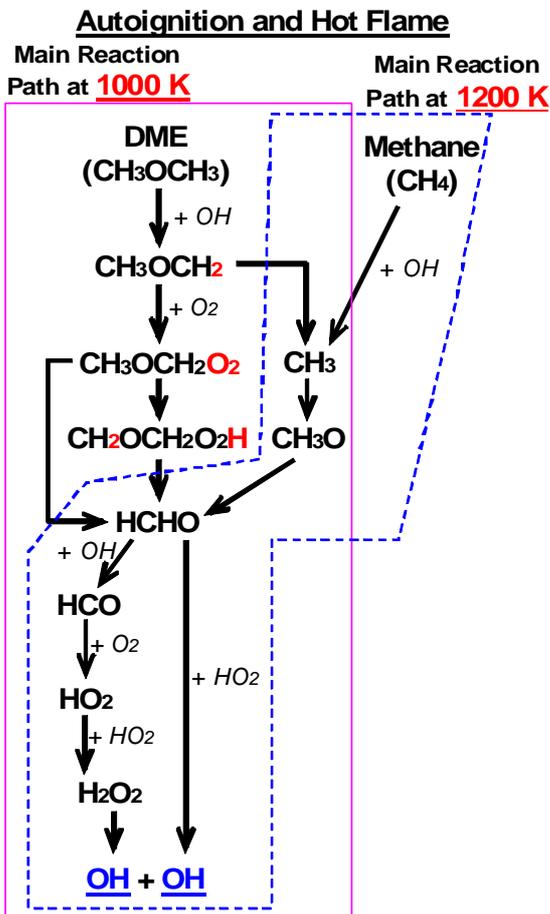


図 8 自着火から完全燃焼までの主たる反応機構

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2件)

飯島晃良, 伊藤直也, 寺島昂, 東條智也, 須山謙太, 田辺光昭, 吉田幸司, 庄司秀夫, ボア全域可視化による筒内圧力振動を伴うガソリン HCCI 燃焼の研究, 自動車技術会論文集, 査読有り, Vol. 45, No. 1, 2014, pp. 49-54.

Akira Iijima, Mitsuaki Tanabe, Koji Yoshida, Hideo Shoji, Naoya Itoh, Akira Terashima, Tomoya Tojo, Visualization and Spectroscopic Measurement of Knocking Combustion Accompanied by Cylinder Pressure Oscillations in an HCCI Engine, SAE International Journal of Engines, 査読有り, Volume 6, Issue 4, 2013, pp. 2150-2163, DOI: 10.4271/2013-32-9166.

[学会発表](計4件)

石川芳広, 望月啓佑, 飯島晃良, 吉田幸司, 庄司秀夫, 吸気圧がガス燃料を用いた HCCI 燃焼に及ぼす影響, 第 51 回燃焼シンポジウム, 2013 年 12 月 4 日, 大田区産業プラ

ザ PiO.

Akira Iijima, Mitsuaki Tanabe, Koji Yoshida, Hideo Shoji, Naoya Itoh, Akira Terashima, Tomoya Tojo, Visualization and Spectroscopic Measurement of Knocking Combustion Accompanied by Cylinder Pressure Oscillations in an HCCI Engine, JSAE/SAE 2013 Small Engine Technology Conference, 2013 年 10 月 9 日, Taipei International Convention Center (本国際会議で口頭発表した論文が, SAE International の国際ジャーナルに掲載された. [雑誌論文の文献])

飯島晃良, 伊藤直也, 寺島昂, 東條智也, 須山謙太, 田辺光昭, 吉田幸司, 庄司秀夫, ボア全域可視化による筒内圧力振動を伴うガソリン HCCI 燃焼の研究, 自動車技術会 2013 年度春季大会, 2013 年 5 月 22 日, パシフィコ横浜

(本会議で口頭発表した論文が, 査読の後自動車技術会論文集に掲載された. [雑誌論文の文献])

飯島晃良, 石川芳広, 江森剛, 浅沼光雄, 庄司秀夫, 第 51 回燃焼シンポジウム, 2012 年 12 月 6 日, 愛知県産業労働センターウイंकあいち

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯島 晃良 (IIJIMA, Akira)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号: 50434121