

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 25 年 5 月 8 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560205

研究課題名（和文）希薄予混合圧縮自己着火に対する火花放電の誘発効果

研究課題名（英文）Effect of Spark Discharge on Lean Premixed Charge Compression Ignition

研究代表者

山根 浩二（KOJI YAMANE）

滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号：10210501

研究成果の概要（和文）：小型直接噴射式ディーゼル機関を用いて、その圧縮比を通常の 18 から 14 まで低下させ、高セタン価燃料を通常より早期に噴射し、その予混合気の自己着火までの着火遅れ期間内に火花放電することで、自己着火を促進し、低負荷での安定した燃焼ができることを示した。

研究成果の概要（英文）：A novel combustion system in which autoignition is induced by spark discharge into a pre-mixture of high cetane number fuel formed during a long ignition delay time by using a direct injection diesel engine with low compression ratio of 14 was experimentally demonstrated. As the result, it was found that the combustion timing was advanced and the combustion stability at low engine load was improved by spark induced compression ignition system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	700,000	210,000	910,000
2011 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2012 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

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：燃焼，予混合圧縮自己着火

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、本研究開始以前に、天然ガスを燃料とした圧縮自己着火燃焼に関する研究成果として、点火プラグを利用して希薄予混合気の自己着火を誘発し、多シリンダ機関において課題であったシリンダ間の燃焼のバラツキをコントロールできることを示していた。これは、火花放電によって生じたわずかな火炎あるいは火炎核が圧力波を発生して、未燃焼の希薄予混合気の温度境界層を破壊して自己着火が誘発されるのに効

果があるものと推察された。

また、ディーゼル機関における圧縮自己着火現象は、燃料組成と、着火に至る境界雰囲気条件との関係が重要である。たとえば、エステル系燃料の代表である脂肪酸メチルエステル（FAME）では、ほとんどの場合、260～300℃の沸点からなる数種の脂肪酸モノアルキルメチルエステルで構成されているが、高分子かつ飽和脂肪酸であるほど自己着火性が高いことがわかっている。とくに、エステル系燃料中に着火促進効果があるハイド

ロペロオキシドが共存する場合、自己着火時期が早期化し、着火遅れが短くなる。一方、実機関では、高負荷になると燃料の自己着火性（セタン価）の違いが現われにくくなる。

以上の研究成果から、自己着火は、燃料自身の着火性よりも、着火に至る前の混合気塊の温度境界層に大きく影響するものと推察され、本研究の能動的に温度境界層を火花放電によって破壊するコンセプトが生まれた。このようなコンセプトの研究例は国内外を通してほとんど確認されない。

2. 研究の目的

近年、ディーゼル機関における高熱効率・低排気を実現する一つの方法として、乗用車を中心に低圧縮比を採用する傾向にある。すなわち、低圧縮比化すると筒内最大圧が低下することから摩擦損失が低減し高熱効率化を図ることができるとともに、筒内最大温度の低下から予混合化を促進し煤とNOxの同時低減が可能となる。しかし、低圧縮比化による筒内最高温度の低下、およびそれによる着火遅れ時間の増大に伴う予混合化は、機関始動性の悪化、低負荷での燃焼不安定を招くとともに能動的な着火時期の制御を困難とする。

そこで、本研究では上記の課題の解決方法として、低圧縮比ディーゼル機関に火花放電を適用する燃焼方式を提案し、低圧縮比化で長くなる着火遅れをあえて利用し、その間に形成された予混合気中に火花放電し着火を促進させ、始動性の改善、燃焼の安定化や能動的な着火の制御を図る。また、火花放電によって噴霧混合気の自己着火が誘発するしくみを、定容燃焼器を用いて再現し、可視化することによって、火花放電位置および時期と噴霧の自着火点との空間と時間の相互関係を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、通常のディーゼル機関の圧縮比18を14まで低下させた状態で、火花放電時期や噴射時期などを種々に変化させて、火花放電による着火促進効果が現れる運転条件を、実験的に調査し熱発生率解析結果から明らかにした。

① 供試燃料

燃料には、軽油等に含まれる炭化水素成分に比べて、化学反応性が高い脂肪酸メチルエステル(Fatty Acid Methyl Esters, FAME)を用い、その中でも気化性が高くまた自着火性も高く、脂肪酸中の炭素数が12のラウリン酸メチルエステル(ライオン(株)製パステルM-12、以降LaMEと称す)を単体で利用した。通称、バイオディーゼル燃料と呼ばれる菜種油や大豆油を原料とした一般的なFAMEに比べて、LaMEは脂肪酸中の炭素数が低く、ココナツ油由来のFAMEに約50%含まれる成分である。LaMEは沸点が低く、気化性の高い単組成FAMEである。ま

た、LaMEは軽油とほぼ同等の着火性を有する。

② 実験装置

実験には、コモンレール噴射装置(デンソーECD-U2)を備えた縦型無過給水冷四サイクル単気筒直接噴射式ディーゼル機関(日産ディーゼルFD-1、ボア×ストローク:108mm×115mm)を用いた。ピストン形状は、クエンチゾーンが少ない大口徑浅皿フラット形状(燃焼室口径/ボア径=0.86、深さ=7.0mm)とした。圧縮比はシリンダヘッドとブロックの間にスペーサを挿入することで調整し18から14に下げた。

4. 研究成果

① 火花放電による着火促進効果

実験では、比較的低負荷である投入熱量1.1kJ/cycleとなる条件で火花放電が圧縮着火に及ぼす影響を調査した。ここでは、吸気絞りをを用いて当量比 $\phi=0.93$ 、体積効率34%とした。図1は噴射時期24deg. BTDCとしたときの、シリンダ内圧力、熱発生率および噴射弁揚程のクランク角経過を示す一例である。図より、放電がない条件では低圧縮比化と吸気絞りによって圧縮端の温度・圧力が低下するため、着火遅れ期間が長期化し、通常の高圧縮比のディーゼル燃焼と異なり10deg. BTDC付近にわずかな熱発生を伴う二段の熱発生となっていることがわかる。

この一段目の熱発生のピーク付近での放電(11 deg. BTDC)では、放電しない場合に比べて全サイクルにおいて安定して着火時期が進んでいる。これは、点火栓付近の混合気に放電が行われることにより、局所的な温度勾配が大きくなり熱輸送および放電により供給された活性種の輸送が大きくなって、周囲の反応が促進、あるいは、火炎核が形成され、火炎伝播が起こり、筒内温度と圧力の上昇に伴い着火が促進されたためであると考えられる。本文ではこのように火花放電によって着火時期が1deg. CA以上進む燃焼をSICI(Spark Induced Compression Ignition)燃焼と定義する。

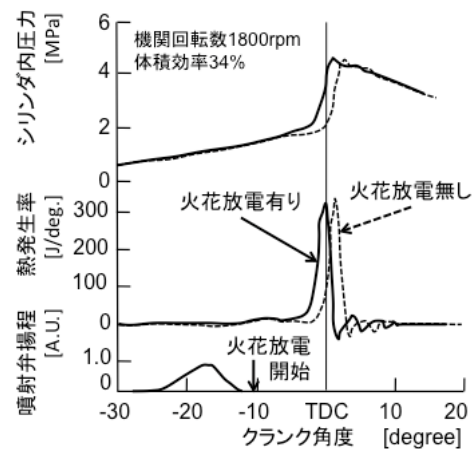


図1 火花放電による自己着火への影響

② 火花放電誘発自己着火燃焼 SICI の成立条件調査

つぎに、投入熱量 1.1kJ/cycle, 体積効率 34% とした場合に、噴射時期と放電時期を変化させ、SICI 燃焼が生じる条件を調査した。ただし、火花放電による着火時期の変化が 1deg. CA 未満である燃焼を CI (Compression Ignition) 燃焼、火花放電により伝播火炎のようなゆるやかな熱発生が見られる燃焼を SI (Spark Ignition) 燃焼と定義した。図 2 は噴射時期と放電時期の組み合わせに対して生じた燃焼形態を上記の定義に従って分類して示している。なお、噴射時期は、着火時期が概ね上死点となる時期から遅らせていき、失火を確認する時期までとした。

図より、噴射時期が -26~18 deg. ATDC, 燃料噴射時期と火花放電時期との差が 8~18deg. CA において、火花放電により着火が促進され、SICI 燃焼となることがわかる。この噴射時期において、燃料噴射時期と火花放電時期との差が 20deg. CA 以上となると、放電による燃焼の変化は確認できず、通常の CI 燃焼となる。燃料噴射時期と火花放電時期との差がおよそ 5deg. CA 以下となる場合は燃焼パターンが二つに分かれる燃焼となり、この範囲で、噴射時期が -18 deg. ATDC から遅れると、放電なしでは着火が起こらず失火するが放電を行うとゆるやかな熱発生が生じた。

③ 低圧縮比ディーゼル機関の始動性に対する SICI 燃焼の効果

図 3 は、燃料噴射開始からの図示平均有効圧力のサイクル変化を示す。

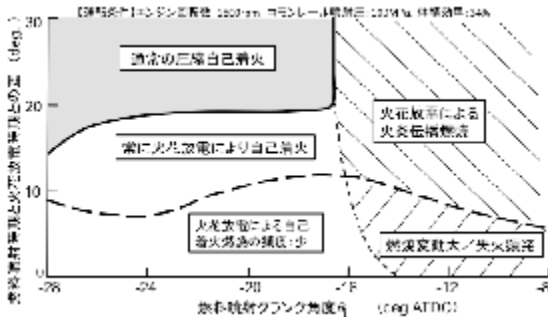


図 2 SICI 燃焼の成立条件

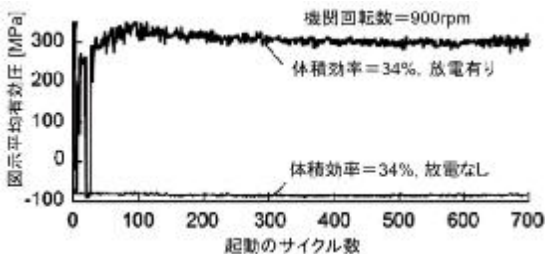


図 3 SICI 燃焼の始動性改善効果

図より、体積効率 34% の吸気を絞った条件では、放電を行った場合に、放電しない場合

に比べて速やかに燃焼が開始することがわかる。

④ 定容燃焼器を用いた SICI 燃焼の可視化

図 4 は、可視化用定容燃焼器のレイアウトを示す。図 5 は、その容器内の空気初期温度 160°C, 初期圧力 2.0MPa, 燃料噴射圧力 80MPa, 噴射量 80mg, 火花放電時期を燃料噴射開始後 2.0ms とした時の SICI 燃焼の着火・燃焼過程を高速カメラで観察した結果を容器内圧力, 熱発生率の時間経過とともに示す結果の一例である。ここで、放電時期 2.0ms は実機の場合、900rpm で噴射後約 11CA deg. 後に放電を行うことに相当する。なお、実機試験では SICI 燃焼が確認された時の雰囲気温度は 300°C と推察される一方で、本実験では装置の都合上 160°C となり、放電しても空気雰囲気では燃焼しなかったため、混合ガス (Ar 79vol%, O₂ 21vol%) を使用した。その結果、混合ガス雰囲気では放電により着火・燃焼を確認した。これは空気に比べてアルゴンの比熱比が大きいことから局所的な温度上昇が大きくなったためと捉えられる。

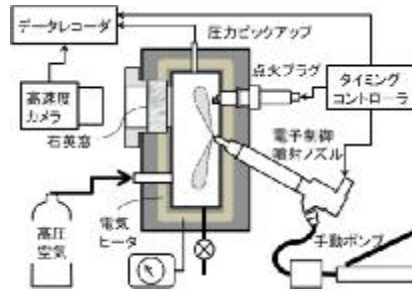


図 4 燃焼の可視化用定容燃焼器

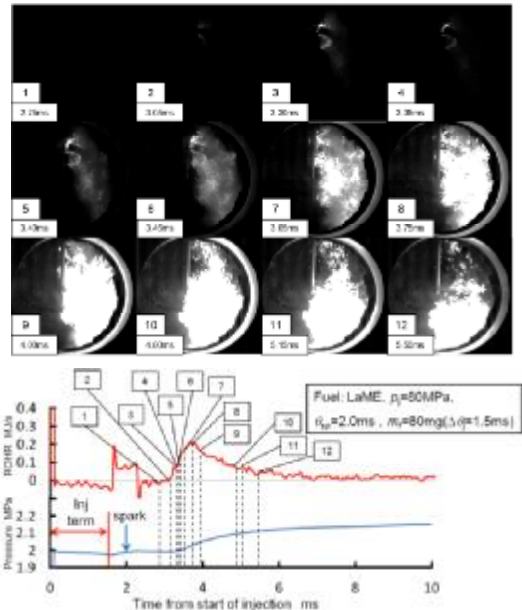


図 5 火花放電による着火燃焼過程, 筒内圧力および熱発生率の時間経過

図から、火花放電の効果によって着火に至っていることがわかる。なお、掲載していな

いが放電なしの場合は、可視化画像にも火炎は確認できなかった。図の噴射開始後 3.05ms (2 番) の画像で点火栓付近から発光を確認、着火していることが確認でき、熱発生率もこの時期から概ね立ち上がっていることがわかる。その後、火炎核が成長し噴射後 3.35ms (4 番) まで徐々に燃焼領域が拡大しているが、噴射後 3.40ms (5 番) の時に画像右下の噴霧下流からも着火、多点的に着火し、噴霧周辺部に一気に燃え広がっていることがわかる。この燃焼が伝播する速さは、条件によるが、炭化水素燃料の平均的な乱流燃焼速度 30m/s に比べて数倍以上となることから少なくとも火炎伝播による燃え広がりではなく、ディーゼルエンジンの燃焼によく似ており火花放電による自着火の促進が認められる。また、放電によって点火栓付近の局所的な反応が促進・温度が上昇したことによって火炎核が成長、着火に至ったと思われる。なお、初期火炎核の成長が火炎伝播状に拡大していくのか、あるいはラジカルが輸送されて多点的で自着火するのは、その詳細は今回明らかにできなかった。図 6 は、燃料噴射から着火に至るまでを同時に撮影した結果である。図から、噴霧が発達したのち、火花放電によって微細な火炎核が形成され、その後しばらくしてから噴霧の自着火が点火プラグ付近や噴霧下流部付近から生じることが判明した。このことから、火花放電で形成された自着火の「種」が、噴霧によって下流へ流されて混合気の自着火を誘発しているものと推察できる。

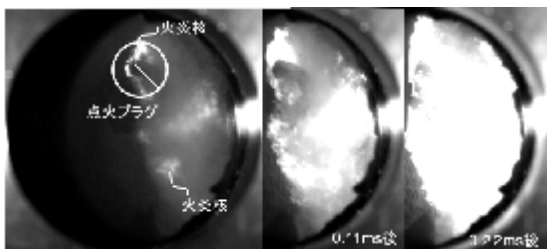


図 6 火花放電による火炎核の形成と噴霧の自己着火後の様子

⑤まとめ

以上、幾何学圧縮比 14 の低圧縮比ディーゼル機関において火花放電による着火促進の可能性を、高着火性および高酸化性を有するラウリン酸メチルエステル(LaME)を燃料に用いて調査した。得られた結果を要約すると下記のとおりである。

低負荷相当の投入熱量、機関回転数 1800rpm において、体積効率 34%とした場合に、長い着火遅れ期間中に火花放電することで着火が促進する SICI 燃焼が成立する噴射時期と放電時期の組み合わせが存在すること、その場合の着火時期は、通常の単純な自己着火時期よりも最

大 5 deg. CA 進むこと、SICI 燃焼が成立する条件では、放電時期を変化させ放電後のわずかな熱発生量を調整することで、着火時期を変化できること、投入熱量の変化があっても火花放電により着火時期を制御できること、機関の暖機が十分でなく燃焼が不安定となる条件であっても、SICI 燃焼により低圧縮比ディーゼル機関の始動性を改善できる可能性があることなどを示した。

また、定容燃焼器による着火現象の可視化の結果、火花放電によって微細な火炎核が形成されたのち、しばらくしてから噴霧自着火が噴霧下流部付近から生じることが判明した。さらに、この現象を今後は、ラジカル発光の分光計測によって明らかにする予定である。

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 3 件)

- ① 近藤千尋, 山根浩二, 熊澤直人, 河崎澄, 高セタン価 FAME を用いた低圧縮比直接噴射式ディーゼル機関の火花放電による着火促進, 査読有, 日本機械学会論文集, 78 巻, 792 号, B 編, 2012, 1441-1450
- ② Chihiro Kondo, Koji Yamane, Naoto Kumazawa, Kiyoshi Kawasaki, Induced Effect of Spark Discharge on Autoignition in Low Compression Ratio Diesel Engines, 査読有, Proc. in COMODIA2012, CII-1 2012, 176-181
- ③ 近藤千尋, 熊澤直人, 河崎澄, 山根浩二, 高着火性および高酸化性を有する FAME を用いた低圧縮比ディーゼル機関, 自動車技術会論文集, 査読有, Vol.42, No.5, 2011, 1111-1116

[学会発表] (計 2 件)

- ① 近藤大地, 近藤千尋, 山根浩二, 河崎澄, 高セタン価 FAME 予混合気の圧縮着火に対する火花放電の着火促進効果, 第 23 回内燃機関シンポジウム, 2012 年 10 月 31 日, 北海道大学 (札幌)
- ② 熊澤直人, 近藤千尋, 河崎澄, 山根浩二, 低圧縮比ディーゼル機関の自己着火に対する火花放電の誘発効果, 第 49 回燃焼シンポジウム, 2011 年 12 月 5 日, 慶応義塾大学 (横浜)

[その他]

<http://www.mech.usp.ac.jp/~prw/subjects.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

山根 浩二 (KOJI YAMANE)
滋賀県立大学工学部・教授
研究者番号：10210501

(2)研究分担者(該当なし)

(3)連携研究者

①河崎 澄 (KIYOSHI KAWASAKI)

滋賀県立大学工学部・准教授
研究者番号：90346099

②近藤 千尋 (CHIHIRO KONDO)

滋賀県立大学工学部・助教
研究者番号：90585225