

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：24201
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2014～2016
課題番号：26420152
研究課題名(和文)火花放電による能動的活性化学種発生とその制御による低圧縮比自己着火燃焼の安定化

研究課題名(英文)Active generation of radical species by spark discharge and its control to stabilize self-ignition at low compression combustion

研究代表者
山根 浩二(Yamane, Koji)
滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号：10210501
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)：低圧縮比直接噴射式ディーゼル機関に高セタン価燃料を通常より早い噴射時期に高圧噴射し、その予混合気への火花放電によって噴霧の自着火を早期化・制御する新しい燃焼(SICI燃焼)に関して、その燃焼現象をボトムビュー可視化機関によって可視化し、圧縮自己着火誘発機構の解明を行った。その結果、50%蒸留温度が軽油より低いラウリン酸においては、適切な放電時期によって噴霧の自着火が早まる現象が確認できた。一方、比較的沸点が高い軽油ではSICI燃焼は観察されず、気化性の悪い燃料の場合は、量論混合気が形成されにくく、火花放電による化学種発生が生じにくいと推察された。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study was to visualize a novel combustion phenomena in which autoignition is induced by spark discharge into a premixture formed during a long ignition delay time in a direct injection diesel engine with a low compression ratio. The fuel used was lauric acid methyl ester that is relatively volatile and exhibits higher ignition quality than standard diesel fuel(gas oil). It was shown that spark-induced compression ignition, SICI, combustion was obtained with a low volumetric efficiency and at appropriate spark timing. However, SICI combustion was not observed in gas oil. These result suggest that relatively poor volatile fuel is difficult to form stoichiometric mixture around the spark plug. So that SICI combustion was not observed in case of gas oil.

研究分野：熱工学

キーワード：圧縮自着火 低圧縮比 ディーゼル 火花放電 ラウリン酸メチル

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、これまでに低圧縮比直接噴射式ディーゼル機関に高セタン価燃料を通常より早い噴射時期に高圧噴射し、その予混合気への火花放電によって噴霧の自着火を早期化・制御できる新しい燃焼方式、すなわち、火花放電誘発自己着火燃焼 (Spark-Induced Compression Ignition; SICI) を提案し、これまで実機を用いた実験によって実証した。さらに、定容燃焼容器を用いた OH 活性化学種などの発光分光計測結果から、OH ラジカルが火花放電によって生成され、それが噴霧によって流されることで噴霧先端付近で自着火が誘発することなどを明らかにし公表した。

2. 研究の目的

本研究は、ボトムビュー可視化機関および定容燃焼容器を用いた噴霧形成および着火状況の可視化によって、火花放電で発生する活性化学種による圧縮自己着火誘発機構の解明を行い、燃焼機構を解明することを最終目標とした。

高セタン価燃料に対する火花放電による自己着火は、「ガソリン直噴機関のような火炎伝播燃焼と異なり、点火栓で発現した活性化学種が噴霧により下流に流され、混合気の自己着火を誘発し、それがトリガーとなって噴霧全体に自己着火が多発する現象」と推定される。本研究ではこの仮説を実験的に検証し、機関の広い運転範囲で能動的に燃焼安定化をはかることが最大の目的である。

SICI 燃焼が成立する範囲は、図 1 に示す領域となるのがこれまでの研究で判明している。すなわち、燃料時期 θ_i に対して、噴射時期と火花放電時期との間隔 $\Delta\theta$ が適切な場合に限られる。これは燃料の気化性に大きく依存することが推察されたことから、この範囲を拡大するためには、使用したバイオ燃料の一つであるラウリン酸メチルエステル (LaME) と、気化性が良い軽油との SICI 燃焼方式適用時の燃焼の違いを明らかにすることが重要と考えた。

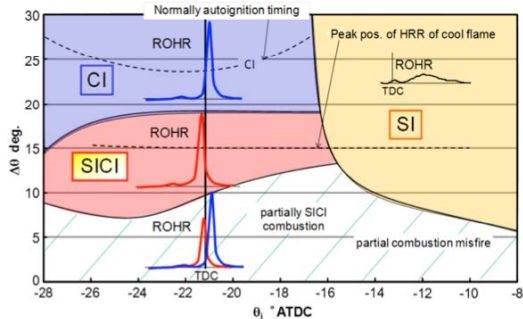


図 1 SICI 燃焼成立条件

3. 研究の方法

(1) ボトムビュー可視化機関を用いた噴霧形成および着火状況の可視化

実験では、ボトムビュー可視化エンジンを

用い、燃焼火炎を高速撮影し観察することによって、燃料の気化性が SICI 燃焼に及ぼす影響を調べた。図 2 および図 3 は、可視化エンジンの断面および燃焼室内の点火栓と噴霧の位置関係を、表 1 には、エンジン主要諸元を示している。エンジンは、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(日産ディーゼル製 FD-1 型)を可視化観察仕様にしたものである。通常のピストンとシリンダを延長し、ピストンキャビティ部に石英ガラス製の窓を装着することで、燃焼室内をピストン下方より観察する方式 (ボトムビュー方式) を採用している。燃焼室内の様子は延長ピストンの空洞部に設けたミラーを介してエンジン側面方向から観察される。また、図 3 に示すように、点火栓とピストンとの干渉を避けるため、ピストントップ形状を平坦にして、上死点時のクリアランスを大きくして圧縮比 14 とした。燃料噴射装置には、コモンレール式燃料噴射装置(デンソー製 ECD-U2)に、噴孔数 5、噴孔径 0.18mm の噴射ノズルを使用した。

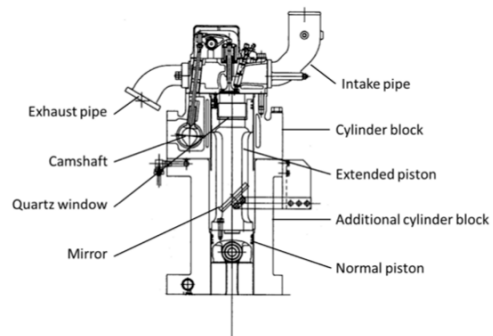
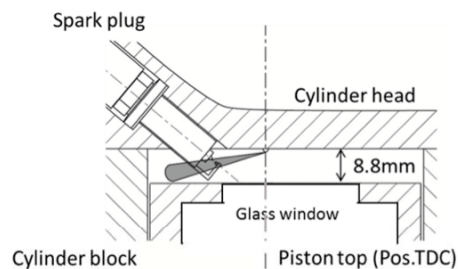
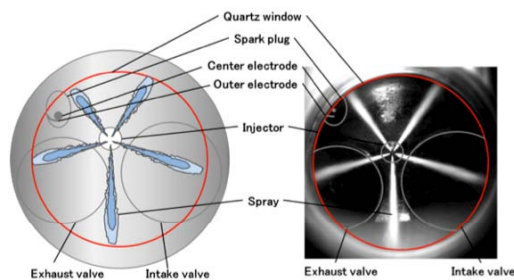


図 2 ボトムビュー可視化機関と可視化装置配置



(a) 燃焼系横断面



(b) 噴霧の位置

図 3 点火栓と噴霧の位置関係および可視化範囲

実験は、冷却水温度 40℃、エンジンオイル温度 40℃ ± 1℃ 以内、エンジン回転数 900rpm、燃料噴射圧力 90MPa の一定条件で行い、体積効率、放電時期及び燃料噴射時期は適宜変更しながら行った。燃料を変更する際は、燃料タンクから噴射ノズルまでの間の燃料を、低速モータリングによって排出させ、その後、燃料経路を新燃料で数回共洗いし実験を行った。また、可視化仕様の状態でエンジンを暖気することは困難なことから、吸入空気にアルゴン酸素を混入することによって、エンジン筒内の圧縮端温度を上げ、燃料が自着火しやすい状態にして、暖気された通常のディーゼル機関の定常運転時の燃焼を再現して可視化観察を行った。表 2 には、使用した燃料の主要性状を示しており、脂肪酸の炭素数が 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)と JIS2 号軽油を用いた。

実験では、エンジン燃焼室内の燃料噴霧の状態および燃焼状態を観察するために、高速度カメラ(Photron 製, FASTCAM SA5/SA5RV)に、単焦点レンズ(Nikon 製, AF DC NIKKOR, $f=135\text{mm}$)を使用した。また、高速度カメラとシリンダ内に取り付けたミラーとの間には、厚さ 12mm の接写リング(Nikon, PK-12)を取り付け像の拡大を行った。撮影は、クランク角(CA)1°ごとに記録し、解像度 896×704pixels, 速度 12000fps 相当、レンズしぼり F 値 = 2 一定で行った。また、撮影時のバックライトにハロゲン光源(LPL 製, VIDEO LIGHT VL-G301)を用いて撮影を行った。

表 1 可視化エンジンの主要諸元

	FD-1(NISSAN Diesel)
Engine type	Direct-injection diesel engine Single cylinder, Water-cooled
BorexStroke	108×115mm
Displacement	1053cm ³
Compression ratio	14
Combustion chamber	Flat type, $d/D=1.0$
Fuel injection system	Common-rail injection system ECD-U2
Injection nozzle	5holes-0.18mm (DLLA155P185)

表 2 使用した燃料の主要性状

	LaME (C ₁₃ H ₂₆ O ₂)	Diesel (JIS No.2)
CN _{CFR}	61.4	56
Distillation T10 °C	-	215
T50 °C	-	272
T90 °C	-	338
Boiling point °C	266	-
LHV MJ/kg	35.2	42.7
Oxygen wt%	15.0	<0.1

(2) 定容燃焼装置を用いた噴霧形成および着火状況の可視化

図 4 に本実験に用いた定容燃焼容器を含む実験装置の概略図を示す。燃焼室は直径 160mm、

奥行き 38mm の円柱状(容積約 700cc)である。また、内部には保温用に直径 8mm の電気ヒータを燃焼室内壁に沿うように巻きつけてある。燃焼室本体の側面には直径 49.5mm、厚さ 25mm(視野φ40.0mm)の合成石英窓を取り付け、容器内部を可視化観察できるようになっている。噴射には 7 噴孔(噴口径 0.157mm, 噴射角 155°)のホースノズルを用い、噴霧一本に火花放電し、その効果を観察できるようになっている。

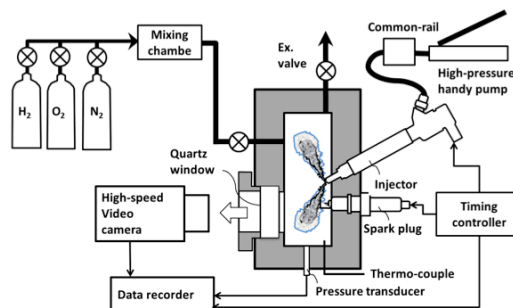


図 4 定容燃焼容器の概要

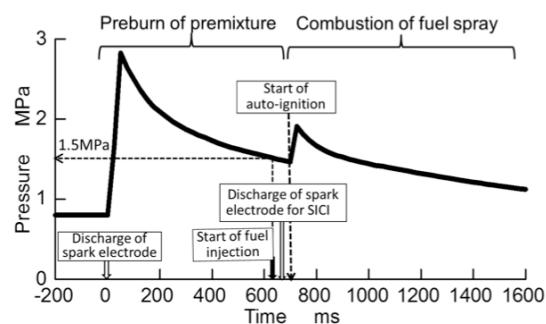


図 5 燃焼容器の圧力経過の一例

実験は、予め作成した酸素過剰の水素、酸素、窒素の希薄予混合気を燃焼室内に充填し、燃焼させることによってディーゼル機関と同様の高温高压の雰囲気を作成し、その所定の雰囲気中に噴射および火花放電して実施した。図 5 は、容器内の圧力経過の実測例を示している。

所定の圧力に蓄圧された燃料は、図 5 に示す時期に噴射され、さらに、続いて火花放電を行うことで自着火を誘発させた。なお、点火エネルギーは一回につき 30mJ、放電期間は 1.2ms 一定とした。本実験では燃焼室内に充填する希薄予混合気量を変更することにより、水素爆発後の自然冷却による圧力低下時、すなわち燃料噴射時の燃焼室内の雰囲気温度変更を行った。

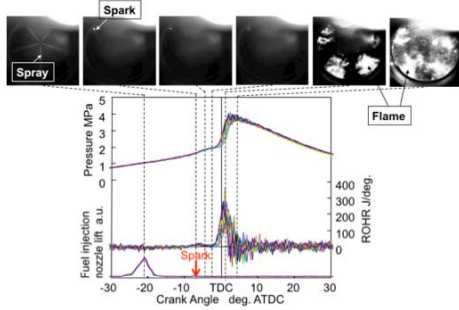
4. 研究成果

(1) ボトムビュー可視化機関を用いた噴霧形成および着火状況の可視化結果

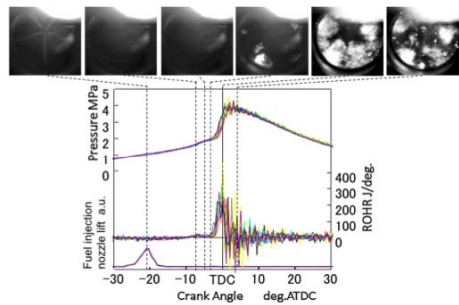
図 6 は、LaME を燃料とした場合の発火後 70~80 サイクルにおけるシリンダ内圧力 p 、熱発生率 ROHR のクランク角経過、および噴射およびディーゼル火炎の高速度撮影写真を示している。図から、火花放電の有無に関わらず、熱発生率はほぼ同じ大きさで、発現時期も放電なしの場合の方がやや早い時期となっている。また、高速度写真からは、放

電による自着火が早まる傾向も見られない。

図7は、放電時期の影響を調べた結果である。図のように、放電時期によって熱発生率の発現時期が異なり、とくに-9 deg.ATDCにおいては、他の場合よりも熱発生率の発現時期が放電によって早まっていることがわかる。



(a) 火花放電あり



(b) 火花放電なし

図6 LaME を燃料とした場合の発火後70~80 サイクルにおけるシリンダ内圧力 p 、熱発生率 ROHR のクランク角経過、および噴射、火花放電、ディーゼル火炎の高速撮影写真

なお、軽油を燃料とした場合に関しては、図8に示した非放電時における発火運転開始から70~80 サイクル目におけるシリンダ内圧力および熱発生率のクランク角経過を見ると、70~80 サイクルにおいてもなお熱発生率が小さく、火花放電有無の影響調査する燃焼過程が得られないことがわかった。この原因は、表2に示すように、軽油はT50が272°Cであるため、LaMEの沸点266°Cより高い成分が50%ほど存在することから、暖気運転を行わない可視化サイクルでは燃料の気化がなされず、噴霧の自着火に至らないものと推察した。つまり、気化性の悪い成分は混合気形成がなされないため、火花放電による自己着火の恩恵はないと考えられる。

(2) 定容燃焼装置を用いた噴霧形成および着火状況の可視化

まず、燃料噴射時の雰囲気圧力 $P_a = 1.5\text{MPa}$ 、噴射圧力 $P_j = 40\text{MPa}$ 、燃料噴射期間 $\Delta\theta_j = 1.2\text{ms}$ (噴射量 $m_f = 28\text{mg}$)、放電時の放電タイミング $\theta_{sp} = 1.1\text{ms}$ とし、ディーゼル機関としては始動時の低温時に相当する、雰囲気温度 $T_a = 590\text{K}$ のもとで、SICI燃焼の着火・燃焼過程を調査した。

燃料には軽油を用いた。

図9に放電なしの場合と放電有りの場合の容器内圧力と熱発生率の時間経過、および高速直接撮影写真を示す。図から、放電を行わない場合、熱発生率において噴射開始3msで熱発生率が立ち上がっているのが分かる。しかし、写真には噴霧の燃焼による発光は見られない。これは噴射された7本の噴霧のうち、可視化領域外の噴霧が燃えているためであると考えられる。

一方、放電を行った場合では、熱発生率において噴射開始後2msに熱発生率が立ち上がっていることが分かる。また、写真でも噴射開始後2msに点火栓付近に発光が生じ、その後着火・燃焼領域が拡大しているのが確認できる。このことから、この雰囲気温度 $T_a = 590\text{K}$ の条件では、火花放電により着火が誘発されると考えられる。

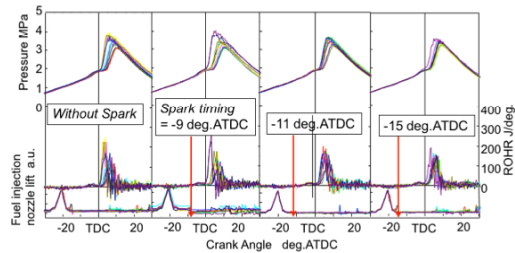


図7 LaME を燃料において火花放電時期を変更した場合の熱発生率 ROHR の変化 (発火後70~80 サイクル)

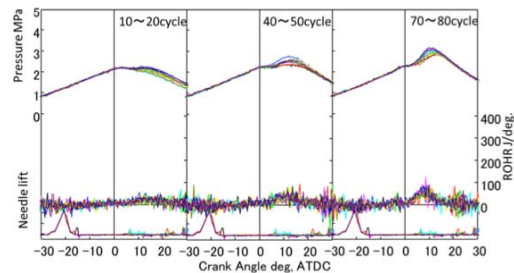


図8 軽油を燃料とした場合の非放電時における発火後燃焼過程

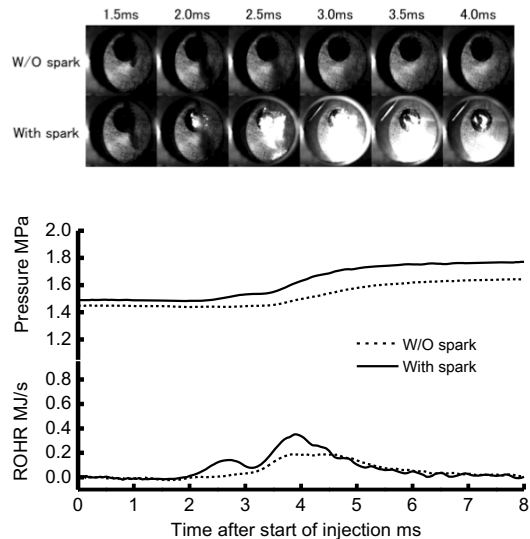


図9 放電なしの場合と放電有りの場合の容器内圧力と熱発生率の時間経過、および高速直接撮影写真(雰囲気温度 $T_a = 590\text{K}$)

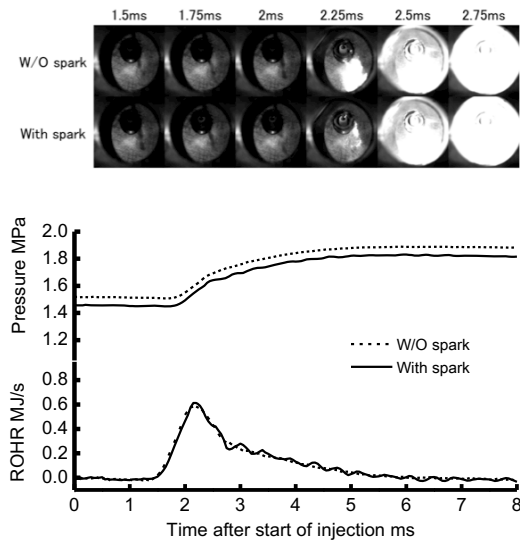


図 10 放電なしの場合と放電有りの場合の容器内圧力と熱発生率の時間経過, および高速度直接撮影写真(雰囲気温度 $T_a=840\text{K}$)

つぎに, 雰囲気温度を $T_a=840\text{K}$ に高めた場合について調べた. 図 10 に, 実験結果を示す. 図から放電の有無に関わらず, 噴射開始から 1.5ms 後に熱発生率が立ち上がっていることが分かる. また写真では, どちらの場合でも噴射開始後 2.25ms に点火栓付近に発光が生じ, その後, 急激に燃焼領域が拡大していることが確認できる. このことにより, 高温の雰囲気では火花放電による着火の誘発が起こる前に自己着火が生じていると考えられる.

そこで, 燃焼室内の雰囲気温度を種々に変更し, SICI 燃焼による自着火の誘発が起こりうる条件を調べた. なお, 実験は雰囲気圧力 $P_a=1.5\text{MPa}$, 噴射圧力 $P_j=40\text{MPa}$, 燃料噴射期間 $\Delta t_j=1.2\text{ms}$ (噴射量 $m_f=28\text{mg}$), 放電時の放電タイミング $\theta_{sp}=1.1\text{ms}$ の一定として行った. 図 11 に着火遅れと雰囲気温度の関係を, 図 12 に熱発生量と雰囲気温度の関係を示す.

図 11 より, 燃料噴射時の雰囲気温度が 700K 以下の場合において, 火花放電により着火が誘発され着火遅れが放電なしの場合に比べて短くなっていることが分かる. また, 図 12 より, 雰囲気温度が 600K 以下の場合において, 火花放電により熱発生量が放電なしの場合に比べて多くなっていることが分かる. このことから, SICI 燃焼は着火遅れが比較的長い雰囲気温度 600K 以下の条件で有効であると考えられる.

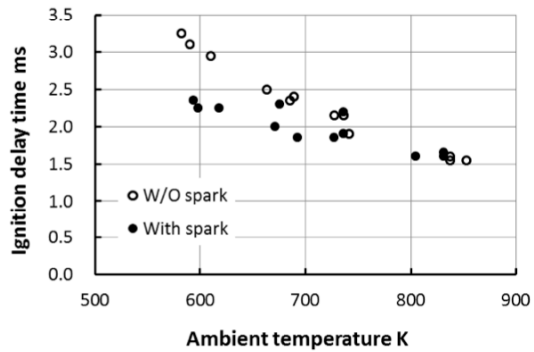


図 11 着火遅れと雰囲気温度の関係

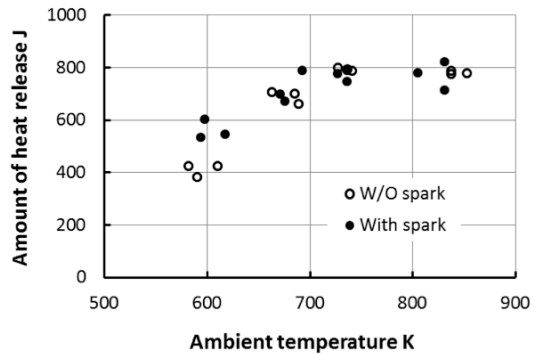


図 12 熱発生量と雰囲気温度の関係

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 1 件)

①中村浩輔, 山根浩二, 河崎澄, 低圧縮比ディーゼル機関を模擬した定容燃焼容器による火花放電誘発自着火燃焼の可視化, 第 53 回燃焼シンポジウム講演論文集 P204, つくば国際会議場 (茨城県つくば市), 2015.11.16~18

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 連携研究者

河崎 澄 (KAWASAKI, Kiyoshi)
滋賀県立大学・工学部・准教授
研究者番号: 90346099

(3) 研究協力者

中村 浩輔 (NAKAMURA, Hirotsuke)
土田 泰輔 (TSUCHIDA, Taisuke)
滋賀県立大学・大学院・学生