

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：33302

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760195

研究課題名(和文) 異着火性二燃料による圧縮着火燃焼制御法の開発とその応用

研究課題名(英文) Development of Compression Ignition Combustion Control by Use of Two Different Reactivity Fuels and Its Application

研究代表者

小橋 好充 (KOBASHI, Yoshimitsu)

金沢工業大学・工学部・講師

研究者番号：80469072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：着火性の異なる二燃料を用いる予混合圧縮着火型のレシプロ機関を対象に、熱効率にとって重要な燃焼進行度と有害排出物の制御法を検討した。その一つは、着火性の低い燃料を予混合吸気して、着火性の高い燃料を直接噴射する系である。ここでは、二燃料の着火特性と燃焼進行度の関係について知見を得るとともに、予混合吸気した燃料の化学反応が直接噴射燃料の着火に影響することを明らかにした。もう一つは、着火性の高い燃料を予混合吸気して、着火性の低い燃料を直接噴射する系である。この場合、上の方法で問題であった未燃成分の排出が大幅に抑制されること、排気ガス再循環と組み合わせた高効率・低有害排出物化の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：This study has explored the possibility of combustion control in premixed charge compression ignition engines which use two different reactivity fuels. One candidate is a system in which less reactive fuel is supplied from intake port while more reactive one is directly injected into a combustion chamber. In this system, we developed an understanding of the relation between reactivity of two fuels and overall combustion rate in a chamber and in addition, the experimental result shows that the chemical reaction of premixed fuel affect the ignition of directly-injected fuel. Another candidate is one in which more reactive fuel is used as pre-mixture and direct injection is used to supply less reactive fuel. It is found that this system can dramatically reduce unburned emissions yielded from pre-mixture and simultaneous higher thermal efficiency and lower pollutant emissions can be achieved by combining with exhaust gas recirculation.

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：内燃機関 予混合圧縮着火 燃料

1. 研究開始当初の背景

非定常噴霧の燃焼を利用する熱機関においては、高熱効率化と排気清浄化を目的に、希薄混合気の圧縮着火燃焼が国内外において精力的に研究されてきた。しかし、この燃焼法には未燃成分の排出抑制、燃焼位相ならびに燃焼進行度の制御といった課題が残っている。

ところで最近、これらの解決策として、着火性の異なる二燃料を機関の燃焼室内に成層分布させる燃焼方式が提案され、活発に研究されている。ただし、この方式は不均一に分布する各燃料の当量比分布と二燃料の化学反応が関わる複雑な系である。そのポテンシャルを有効に活用するためには、より基礎的な視点にたった現象解明とその知見に立脚した燃焼改善指針の提案が求められる。

2. 研究の目的

本研究では着火性が異なる二燃料を用いる圧縮着火機関を対象に、次の点の解明を目的とした。

- ・二燃料機関の燃焼進行度に及ぼす当量比と化学反応特性それぞれの影響度
- ・既に化学反応の進行中にある予混合気が圧縮上死点付近に供給された燃料の着火に及ぼす影響

また、その知見も勘案して、次の可能性を検討した。

- ・高着火性予混合気による未燃炭化水素の排出抑制

3. 研究の方法

実験には、吸気管噴射と筒内直接噴射が可能なように改造を施した単気筒ディーゼル機関を用いた。噴射装置はそれぞれ電子制御式であるため、噴射時期と噴射量の設定が容易である。機関のシリンダヘッドにはピエゾ式圧力センサを取り付けられているため、圧力履歴のサンプリングと熱発生率の解析が可能である。排気管には排気ガス測定装置とともに、排気管をしぼるためのバルブが取り付けられており、比較的高い割合で排気ガスを吸気へ再循環することができる。

一部では化学反応動力学を利用した数値解析を実施した。この際、ローレンス・リバモア研究所の Curran らの Primary Reference Fuel モデルを利用した。

4. 研究成果

- (1) 当量比と化学反応特性が燃焼進行度に及ぼす影響

図1の系を想定して、当量比と化学反応特性がエンジン燃焼室全体の燃焼進行度に及ぼす影響を調べた。この図は、ガソリン予混合気中に軽油を噴き込む状況を示しており、軽油割合が高い空間ほど当量比も高い。ガソリンと軽油をそれぞれオクタン価の等しい i-オクタンと n-ヘプタンで代替し、当量比 0.30 の i-オクタン予混合中に n-ヘプタンを噴射し

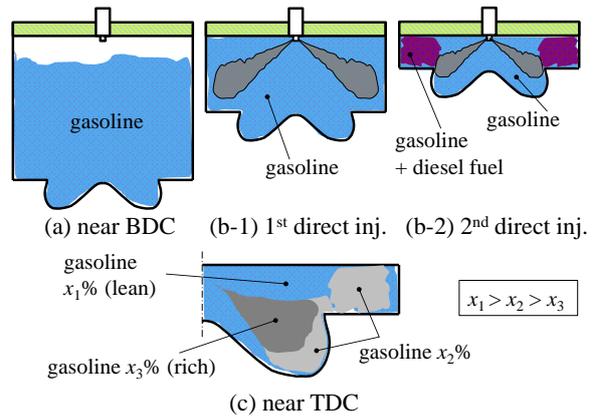


図1 想定したガソリンと軽油の二燃料のエンジン燃焼室内の分布

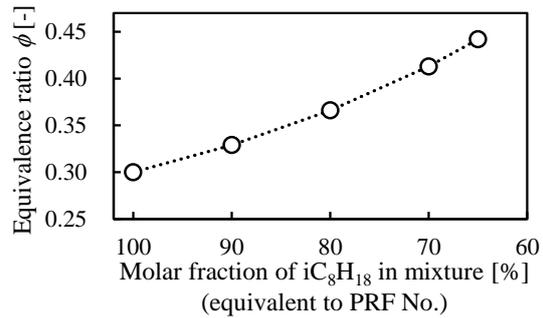


図2 i-オクタン予混合気(当量比 0.30)中に n-ヘプタンを噴射した場合の i-オクタン割合と当量比の関係

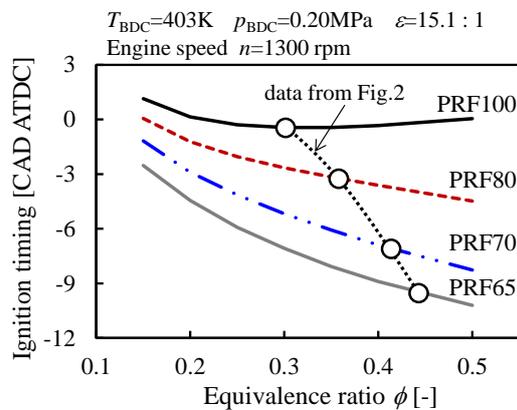


図3 燃料の種類と当量比による着火時期の変化

た場合を考えると、混合気中の i-オクタンの割合と当量比の関係は図2のようになる。

ここで、図3はエンジンサイクルにおける数種の n-ヘプタン/i-オクタン混合燃料 (PRFXX の XX は i-オクタン割合) の着火時期を示す。PRF100 以外の燃料では当量比によって着火時期が変化することから、二燃料を用いずとも、燃焼室内に当量比の分布を与えるだけで各所の着火時期が離散化され、燃焼進行度を遅らせることができる。一方、図3に白丸でプロットされた図2の計算点に着目すると、二燃料成層混合気では狭い当量比の分布範囲でも大幅に着火時期が離散化されることがわかる。

このことから、二燃料成層混合気では NOx

の生成が多い高当量比や未燃成分の排出が多い低当量比を含まない混合気で、燃焼進行度を調整可能であることが示された。

(2) 予混合気の化学反応が直接噴射された燃料の着火に及ぼす影響

基本的に(1)は完全に混合された二燃料の圧縮膨張行程を模擬する計算において得られた着火に関する知見であるが、実際の二燃料機関では、既に化学反応が進行する予混合気中に新たな燃料が投入されることになる。一般に、低着火性燃料の予混合気中に高着火性燃料を直接噴射する場合、その着火は直接噴射燃料に支配されると考えられているが、予混合気が生産する化学種の活性は無視できない可能性もある。

そこで、予混合気の化学反応が直接噴射に及ぼす影響を調べるため、直接噴射燃料を市販軽油に固定して、PRF90、それとオクタン価のほぼ等しい市販レギュラーガソリン、ならびにPRF100、それとオクタン価のほぼ等しい市販プレミアムガソリンの四種類の燃料を吸気管噴射とした。

その圧力と熱発生率の履歴を図4に示す。この図から、直接噴射された軽油の着火は、予混合気の燃料に多大な影響を受けることが明らかになるとともに、後続の燃焼率も大きく変化することがわかった。さらに、同じオクタン価でもその影響度は異なることも明らかとなった。

これを合理的に説明する知見はまだ得られていないため、本研究ではこの要因について現在も継続的に調べることにしている。

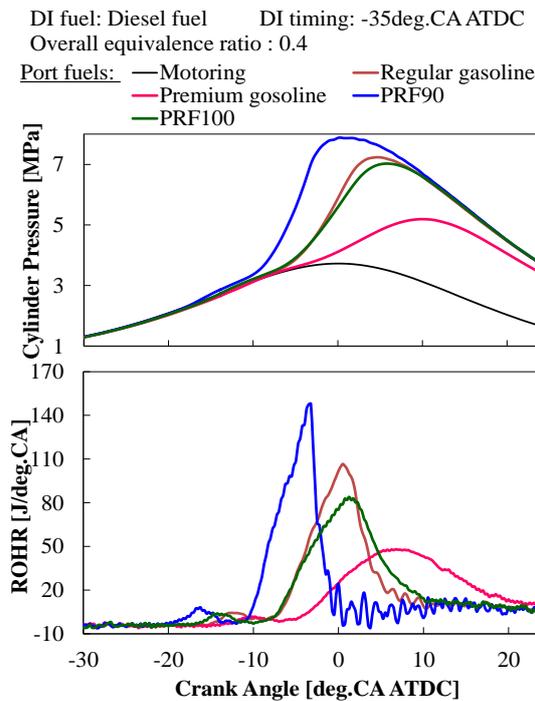


図4 予混合気の燃料が直接噴射された軽油の着火に及ぼす影響

(3) 高着火性予混合気による未燃炭化水素の排出抑制

既に述べた(1)のような利点があり、(2)で暗示されたように早くから予混合気の化学反応が進行する「吸気管噴射：低着火性燃料+直接噴射：高着火性燃料」のシステムにおいても、未燃成分の排出は回避し難い。図5のCaseAは「吸気管噴射：低着火性燃料+直接噴射：高着火性燃料」システムの未燃炭化水素 THC と一酸化炭素 CO 排出濃度を示しており、3000ppmCを超える高い THC や95%を下回る低い燃焼効率が確認されている。これに対し、図5のCaseBは「吸気管噴射：高着火性燃料+直接噴射：低着火性燃料」システムの結果であり、THC、燃焼効率ともに大幅に改善されることがわかった。

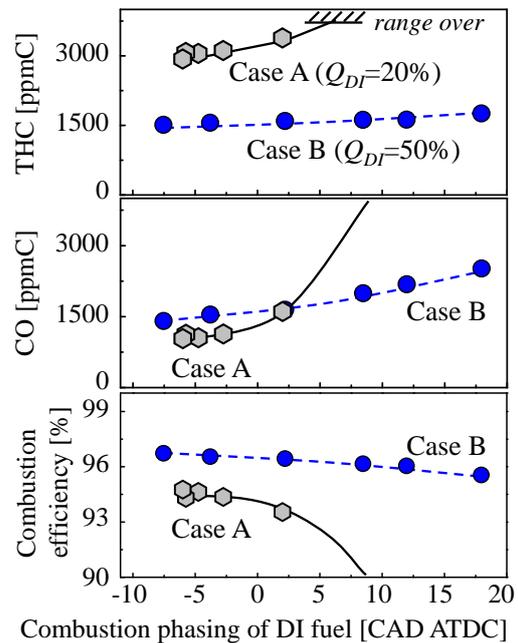


図5 CaseA「吸気管噴射：低着火性燃料+直接噴射：高着火性燃料」とCaseB「吸気管噴射：高着火性燃料+直接噴射：低着火性燃料」の比較 (図示平均有効圧≒0.5MPa)

ところが、CaseBでは着火性の高い予混合気が過早期に着火し、燃焼の等容度を低下させることがある(図6参照)。そこで、CaseBと排気ガス再循環(Exhaust Gas Recirculation: EGR)を組み合わせ、吸気酸素濃度の低下による燃焼時期の制御を試みた。EGRによる熱発生率の変化を図6に、エンジン性能と排気特性の変化を図7に示す。EGR率0%では上死点前20度付近に見られる予混合気の低温酸化反応を経て、上死点前10度付近から予混合気の高温酸化反応が開始され、その後、上死点から直接噴射燃料の高温酸化反応が始まる。EGR率を高くすると、直接噴射燃料の高温酸化反応を除くいずれの反応の時期も遅くなり、等容度が向上する。このとき、EGR率36%以下であれば燃焼効率の低下も起こらないので、高い燃焼効率が維

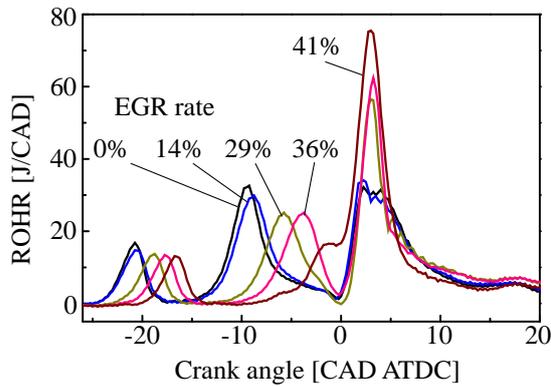


図 6 CaseB 「吸気管噴射：高着火性燃料＋直接噴射：低着火性燃料」における排気ガス再循環 (EGR) と熱発生率の関係

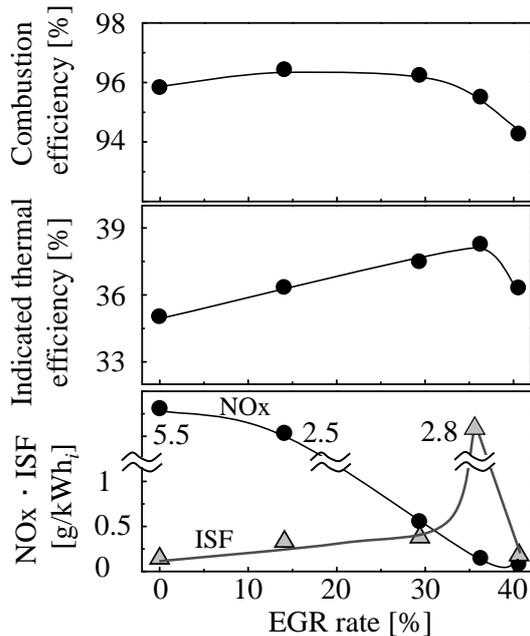


図 7 CaseB 「吸気管噴射：高着火性燃料＋直接噴射：低着火性燃料」における排気ガス再循環 (EGR) と各効率・有害排出物量の関係

持される。したがって、図示熱効率は EGR 率 36% で最大となる。一方、EGR 率の増加により NOx は低下するが、そのほとんどがススである粒子状物質 (PM) 中の不溶成分 (ISF) は増加する。ただし、EGR 率 30% では NOx, ISF ともに低いレベルを維持している。したがって、CaseB と EGR の組み合わせのような最適方法も存在することがわかった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 2 件)

- ① Yoshimitsu Kobashi, Daijiro Tanaka, Teppei Maruko, Satoshi Kato, Masato Kishiura and Jiro Senda, Effects of Mixedness and Ignition Timings on PCCI Combustion with a Dual Fuel Operation, SAE 2011-01-1768, 2011. 査読有
- ② 小橋好充, 田中大二郎, 丸小鉄平, 加藤

聰, 二燃料の混合気濃度と燃焼位相が圧縮着火機関の性能・排気特性に及ぼす影響, 日本機械学会論文集 (B), 78 巻, 788 号, pp. 939-947, 2012. 査読有

〔学会発表〕 (計 4 件)

- ① 丸小鉄平, 田中大二郎, 小橋好充, 加藤聰, 高着火性燃料の希薄予混合気を用いた二段噴射式圧縮着火燃焼に関する研究, 日本機械学会北陸信越支部 第 49 期総会・講演会講演論文集, 講演 No. 0209, 2012 年 3 月 10 日. 金沢工業大学.
- ② 丸小鉄平, 小橋好充, 加藤聰, ポート噴射と直接噴射による層状混合気とその燃焼位相が圧縮着火燃焼に及ぼす影響, 日本機械学会 2012 年度年次大会講演会論文集, G070041, 2012 年 9 月 12 日. 金沢大学.
- ③ 小橋好充, 二燃料による圧縮着火燃焼の制御 —米国 RCCI 研究のレビューと二成分混合燃料による制御法の紹介—, JSAE シンポジウム, No. 12-13, pp. 54-59, 2014 年 1 月 27 日. 発明会館ホール.
- ④ 武藤涼, 小橋好充, 加藤聰, 二燃料 PCCI 燃焼の燃料噴射条件が着火および熱発生率履歴に及ぼす影響, 日本機械学会北陸信越支部 第 51 期総会・講演会講演論文集, No. 1308, 2014 年 3 月 8 日. 富山県立大学.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www2.kanazawa-it.ac.jp/motore/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小橋 好充 (KOBASHI, Yoshimitsu)

金沢工業大学・工学部・講師

研究者番号：80469072