

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 5 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560196

研究課題名（和文） エタノールの低温酸化反応抑制効果による急速圧縮間欠噴霧の燃焼制御

研究課題名（英文） Combustion control of intermittent fuel spray under rapid compression with reaction inhibitor effect on low temperature oxidation with ethanol

研究代表者

小川 英之 (OGAWA HIDEYUKI)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40185509

研究成果の概要（和文）：

エタノールをディーゼルエンジンの吸気から導入することで、筒内に直接噴射する軽油の着火遅れを確保して予混合化を図った際の排気特性および機関性能について検討を行った。その結果、エタノール吸気ポート噴射によって黒煙の大幅な低減が可能であり、その効果にはエタノールの着火抑制効果および軽油噴射量の減少による噴射期間短縮による予混合化期間の増加が大きく寄与していることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

Improvement of diesel combustion by ethanol intake port injection for the promotion of premixing of the in-cylinder injected diesel fuel, and by increased EGR for the reduction of combustion temperature. The smoke emission was reduced with promotion of premixing due to longer ignition delay and shorter injection period of diesel fuel with ethanol port injection, and the NOx was reduced with decreases in intake oxygen content by EGR regardless of ethanol quantity. When ethanol quantity was set to 20% of the total energy supply and intake oxygen was reduced to 15% with EGR, smokeless and low NOx operation was established over a wide load range.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
2012 年度	0	0	0
2013 年度	0	0	0
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：ディーゼルエンジン，エタノール，着火，排気エミッション

1. 研究開始当初の背景

ディーゼルエンジンに見られる間欠噴霧燃焼では、噴霧中心部に過濃領域が存在するためスートの生成が避けられなかったが、最近着火遅れを適度に増大させて希薄予混合化を促進することによりスートの生成を抑えることが可能になっている。しかし、能動的な着火制御が困難であることに加えて、過度に予混合化が進行した場合には急激燃焼

や失火などのため適用条件範囲が限定されることが課題になっている。それに対して、低級アルコール類を高着火性燃料の急速予混合圧縮着火燃焼場に導入することにより低温酸化(冷炎)反応が抑制され、ひいては主燃焼発現時期の制御および衝撃的燃焼の緩和が可能であること、この反応抑制効果がアルコール類のラジカル消費によるものであることが示されている。

2. 研究の目的

低級アルコール類の中でもエタノールを急速圧縮間欠噴霧燃焼場に導入することで着火を制御して適度な予混合化を図ることにより、清浄で高効率の燃焼法を確立することを最終目的とした。エタノールはバイオマスとして製造可能であることから、その成果は二酸化炭素抑制および再生可能エネルギー利用拡大に対しても多大なる寄与が期待できる。

3. 研究の方法

実験にはコモンレール噴射系を有する単気筒・無過給・四サイクル直噴式ディーゼル機関（ボア： $\phi 98$ mm, ストローク：110 mm, 行程体積：830 cm³）を使用した。圧縮比は16.5を基本としたが、キャビティ容積の異なるピストンを用いて18.5とした場合についても検討した。軽油の噴射圧力は120 MPaを原則としたが、その影響を検討するため60 MPaまで低下させた実験も行った。噴射ノズルには噴孔径0.16 mm, 噴霧間角度が133°の六噴孔ノズルを用い、噴射時期は着火が上死点で生ずるように適宜設定した。そのほか回転速度は1500 rpm, 冷却水温度は80°Cとした。エタノールは吸気管からガソリン自動車用小型インジェクタにより導入した。EGRは排気管から分流した実排気を冷却して吸気に還流することによって行い、吸気酸素濃度 (O_{2in}) は磁気式酸素計で測定した。排気中の黒煙 (Smoke) はボッシュ式スモークメータにより、窒素酸化物 (NOx) は化学発光法 (CLD) により、全未燃炭化水素 (THC) は加熱型水素炎イオン化検出器 (HFID) により、一酸化炭素 (CO) は非分散型赤外線分析計 (NDIR) により、アセトアルデヒドはフーリエ変換赤外分光法 (FTIR) によりそれぞれ測定した。アセトアルデヒドについては酸化触媒を排気主流に設置し、その前後の濃度を計測するとともに、出入口の温度をK熱電で計測した。酸化触媒は、金属担体に白金およびゼオライトを担持したセル密度が400 cpsiの量産ディーゼル乗用車に搭載されているものである。

4. 研究成果

図1に、予混合化期間（燃料噴射終了から着火までの期間） θ_{pre} , 最大圧力上昇率 $dp/d\theta_{max}$, および排気エミッションをEGRによって変化する吸気酸素濃度に対して示す。予混合化期間は、エタノール吸入の有無にかかわらず吸気酸素濃度の低下に伴って増加しており、さらにいずれの吸気酸素濃度においてもエタノール吸入によって増加している。これは、後にも述べるとおりエタノール吸入による着火遅れ増大効果に加えて、軽油噴射量の減少にともなう噴射期間の短縮によるものである。そのため、軽油のみによる運転では吸気酸素濃度の低下にともなって黒煙が増加

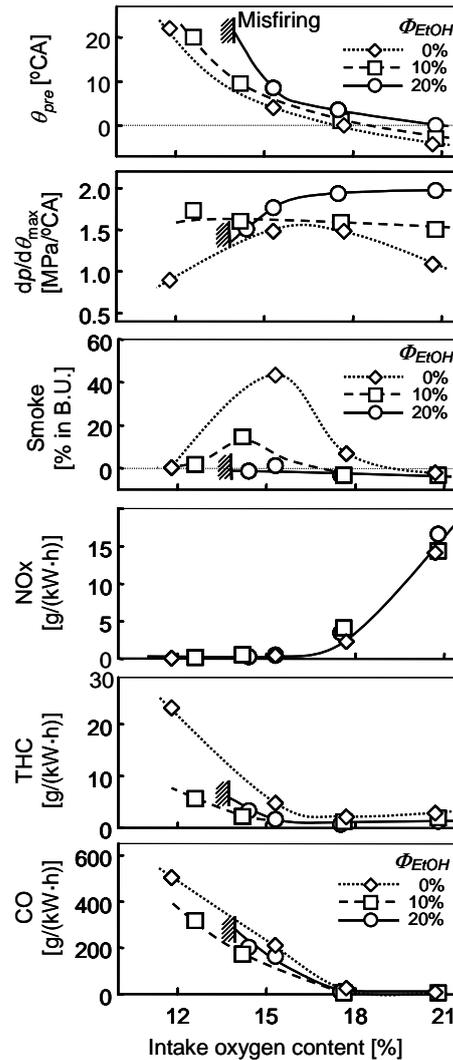


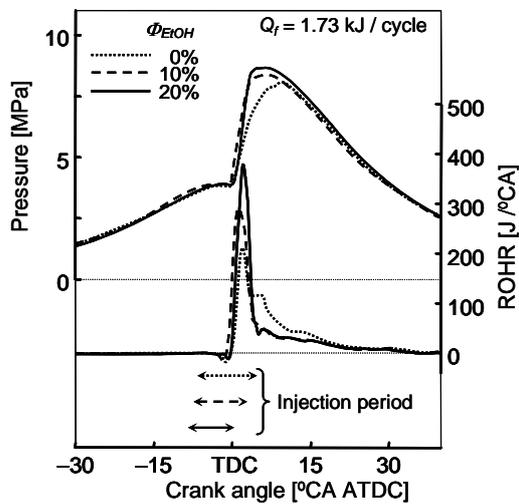
図1 EGRによる吸気酸素濃度低下時におけるエタノール吸入の効果

($Q_f = 1.73$ kJ/cycle, $\varepsilon = 16.5$, $p_{inj} = 120$ MPa)

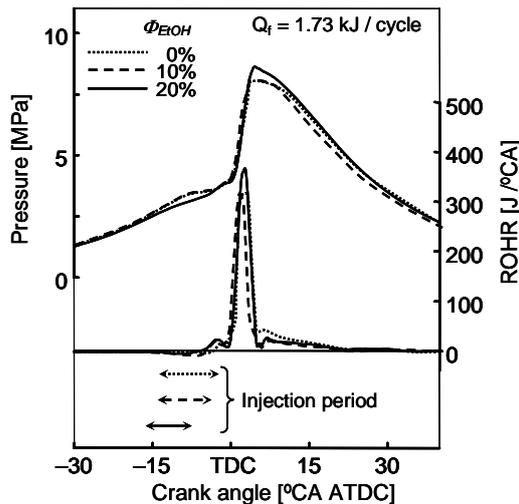
するのに対し、エタノールによる黒煙低減効果は広い吸気酸素濃度範囲において顕著に現れ、特に Φ_{EtOH} が20%では、いずれの吸気酸素濃度においても極めて低い黒煙濃度となっている。これは前述した予混合化期間の増加による予混合化効果に加えて、エタノール自体の低発煙性にも起因しているものと考えられる。一方、エタノールの有無によるNOxの差異は小さく、いずれも吸気酸素濃度の低下にともなって顕著に低下しており、 Φ_{EtOH} が20%では、吸気酸素濃度が15%と比較的高い酸素濃度で無煙・低NOx燃焼を実現し得る。THCおよびCOは吸気酸素濃度低下による排出濃度の増加が著しいが、エタノールによりその増加が若干抑えられている。一方、エタノールを吸入するといずれの吸気酸素濃度でも圧力上昇率が增加している。とくに Φ_{EtOH} が20%では低EGR・高吸気酸素濃度時に圧力上昇率が大きく、しかも比較的高

い吸気酸素濃度で失火に至るため、 Φ_{EtOH} は 20%程度が限界となっている。圧力上昇率の抑制と失火の防止がこの燃焼法の課題と考えられるが、3.4 節で述べるとおり、吸気酸素濃度が 15%でこれよりも低い IMEP ではエタノールの吸入により圧力上昇率はむしろ低くなっている。

図 2 に、各 Φ_{EtOH} における指圧線図および熱発生率を (a) 吸気酸素濃度 21% および (b) 同 15% の二通りについて示す。吸気酸素濃度が 21% で軽油のみの場合には明確な拡散燃焼が認められるのに対し、エタノールの吸入により初期の予混合的燃焼部分が増加するとともに拡散燃焼が著しく減少し、筒内最大圧力および初期熱発生率の最大値が増加している。図の下方に燃料噴射期間を示すが、軽油のみの場合には、燃料噴射が予混合的燃焼の終了する付近まで継続しているのに対



(a) Intake oxygen content: 21%



(b) Intake oxygen content: 15%

図 2 エタノールの吸入が指圧線図および熱発生率 (ROHR) に及ぼす影響 ($Q_f = 1.73 \text{ kJ/cycle}$, $\xi = 16.5$, $p_{inj} = 120 \text{ MPa}$)

し、 Φ_{EtOH} が 20%では噴射終了時期が着火時まで早期化している。これは、前述したとおりエタノールの吸入による着火遅れ増大効果に加えて、軽油噴射量の減少による噴射期間の短縮効果がさらに強く作用したためである。一方、吸気酸素濃度が 15%の場合においても、 Φ_{EtOH} の増加に伴って着火遅れが増大するとともに燃料噴射期間が短縮し、予混合化期間が増大している。この場合も筒内最大圧力および初期熱発生率最大値が Φ_{EtOH} の増加に伴って若干増加しているが、吸気酸素濃度 21%の場合ほど顕著ではなく、 Φ_{EtOH} による熱発生率波形の差異は吸気酸素濃度 21%の場合に比べて小さい。軽油のみの場合でも拡散燃焼部分は非常に少なくなっているが、この場合図 1 に示すとおり黒煙が 40%以上になっていることから、ある程度予混合化は進行しているものの、まだかなりの過濃混合気が燃焼していることが推察される。一方、エタノールを吸入した場合には無煙となっていることから、希薄化がより進行しているものと考えられる。なお、エタノール吸入による初期熱発生率の増加の程度は、いずれの吸気酸素濃度においても図 3 に示した高負荷に比べて部分負荷では減少する。

図 3 に、エタノール吸入の有無が予混合化期間 θ_{pre} 、最大圧力上昇率 $dp/d\theta_{max}$ 、図示熱効率 η_i 、および排気エミッションに及ぼす影響を示す。予混合化期間は、軽油のみの場合には IMEP の増加に伴って減少するのに対し、エタノールを吸入することにより IMEP の増加に伴う予混合化期間の減少を抑えることが可能になっている。最大圧力上昇率は、エタノールを吸入することにより予混合化期間が増加しているにもかかわらず、高負荷を除いて広い負荷範囲においてむしろ低くなっている。図示熱効率は、エタノール吸入により低負荷では若干低下するが、高負荷では改善している。黒煙は、軽油単体では高負荷において排出が著しいが、エタノール吸入によって、この高負荷における黒煙の排出が大幅に低減している。NOx はエタノールの有無による大きな差異は見られないが、EGR により吸気酸素濃度を 15% としているため、広い負荷範囲において $0.6 \text{ g/(kW}\cdot\text{h)}$ 以下と極めて低いレベルに保たれている。本実験条件においては、EGR によって吸気酸素濃度を 15% とし全投入熱量の 20% 程度のエタノールを吸入することによって、IMEP が 0.8 MPa まで無煙・低 NOx 燃焼が実現し得る。なお、同様な改善特性はメタノールの吸入でも得られる。THC は、エタノールによって増加しており、その程度は低負荷ほど著しい。CO は、エタノールの有無による差異は小さいが、高負荷ではエタノールにより低減している。

図 4 に、エタノール吸入時 ($\Phi_{EtOH} = 20\%$) における排気中のアセトアルデヒド濃度を酸

化触媒の有無について示す。なお、図の下段は酸化触媒の入口および出口の温度である。未規制有害物質に指定されているアセトアルデヒドは広い IMEP 範囲において高濃度で排出されており、特に低負荷において増加が顕著である。この場合低負荷を除いて酸化触媒により低濃度まで浄化が可能であるが、無負荷に近い IMEP が 0.2 MPa 付近では酸化触媒の入り口温度が 100°C 近くまで低下するため、まったく浄化されなくなる。したがって、低負荷ではエタノールの吸入を停止するなどの方策が必要になると思われる。

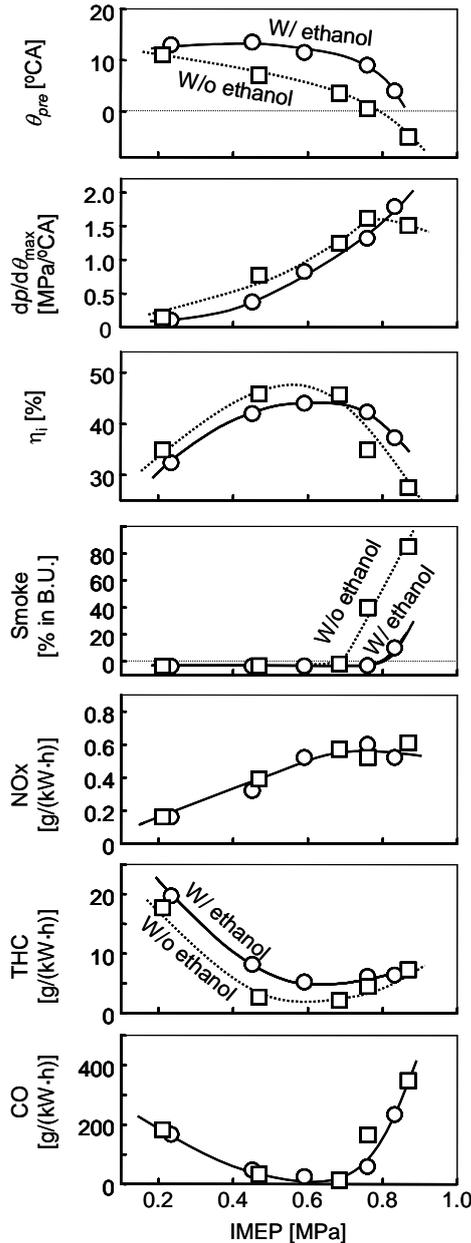


図3 エタノール吸入の有無が予混合化期間 θ_{pre} 、最大圧力上昇率 $dp/d\theta_{max}$ 、図示熱効率 η_i 、および排気エミッションに及ぼす影響 ($\varepsilon = 16.5, p_{inj} = 120 \text{ MPa}, O_{2in} = 15\%$)

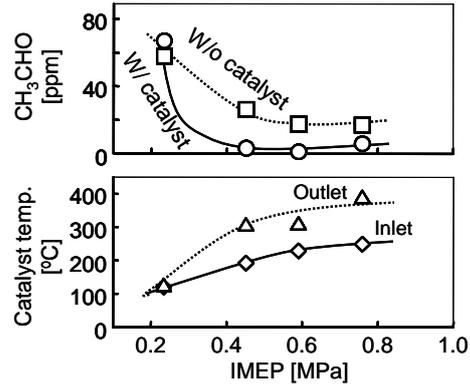


図4 エタノール吸入時におけるアセトアルデヒドの排出特性および酸化触媒の浄化特性 ($\varepsilon = 16.5, p_{inj} = 120 \text{ MPa}, \Phi_{EtOH} = 20\%, O_{2in} = 15\%$)

以上本研究では、エタノールの吸気ポート噴射によるディーゼル燃焼の改善効果について検討した。その結果、エタノール吸気ポート噴射によって黒煙の大幅な低減が可能であり、その効果にはエタノールの着火抑制効果および軽油噴射量の減少による噴射期間短縮による予混合化期間の増加が大きく寄与していること、全投入熱量の 20% 程度のエタノールを吸気ポートから噴射して導入することにより、比較的低 EGR 率 (吸気酸素濃度 15%) で無煙・低 NOx 燃焼を広い IMEP 範囲で実現可能であること、およびエタノール吸入によりアセトアルデヒドが高濃度で排出されるが、ごく低負荷を除いて酸化触媒による浄化が可能であるが明らかとなった。

記号および略号

$dp/d\theta_{max}$: 最大圧力上昇率 [MPa/°CA]

O_{2in} : 吸気酸素濃度 [%]

p_{inj} : 燃料噴射圧力(軽油) [MPa]

Q_f : 全投入熱量 [kJ/cycle]

ε : 圧縮比

Φ_{EtOH} : 全投入熱量に占めるエタノールの割合 [%]

η_i : 図示熱効率 [%]

θ_{pre} : 予混合化期間 (燃料噴射終了から着火までの期間) [°CA]

CO: 一酸化炭素

EGR: 排気再循環

IMEP: 図示平均有効圧力

NOx: 窒素酸化物

THC: 全炭化水素

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

- ① 小川英之, 中村俊洋, ハリ セティアプラジャ, エタノールの吸気ポート噴射によるディーゼル燃焼の改善特性, 自動車技術会論文集, 査読有, 40巻, 2号, 2009, 343-348
- ② 小川英之, 中村俊洋, メタノールの吸気ポート噴射による予混合化ディーゼル燃焼の改善, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 75巻, 756号, 2009, 152-157
- ③ Ogawa, H., Hari, S., Nakamura, T, Improvements to Premixed Diesel Combustion with Ignition Inhibitor Effects of Premixed Ethanol by Intake Port Injection, SAE Paper, 査読有, 2010-01-0866, 2010, 1-9
- ④ 小川英之, 松本淳, 予混合圧縮着火燃焼におけるエタノールの着火抑制効果に対する化学反応解析, 日本機械学会論文集B編, 査読有, 76巻, 771号, 2010, 302-308
- ⑤ Zhang, H., Hasegawam, R., and Ogawa, H., Improvement in DME-HCCI Combustion with Ethanol as a Low-temperature Oxidation Inhibitor, SAE Int. J. Fuels Lubr., 査読有, 2012 5: 41-50
- ⑥ Hari, S., Ozawa, t., Hara, K., Yamazaki, K., and Ogawa, H., Combustion Characteristics of Emulsified Blends of Aqueous Ethanol and Diesel Fuel in a Diesel Engine with High Rates of EGR and Split Fuel Injections, SAE Paper, 査読有, 2011-01-1820, 2011, 587-593
- ⑦ ハリ セティアプラジャ, 原孝佑, 小澤琢磨, 山崎賢治, 小川英之, ブタノール-エタノール混合軽油のディーゼル燃焼特性, 自動車技術会論文集, 査読有, 42巻, 5号, 2011, 1087-1092
- ⑧ ハリ セティアプラジャ, 小澤 琢磨, 原 考佑, 山崎 賢治, 小川英之, 含水エタノール-軽油エマルジョン燃料によるディーゼル燃焼の改善, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 78巻, 785号, 2012, 142-149
- ⑨ ハリ セティアプラジャ, 原考佑, 柴田元, 小川英之, アルコールと植物油の混合燃料のディーゼル燃焼特性, 自動車技術会論文集, 査読有, 43巻, 2号, 2012, 461-466

[学会発表] (計9件)

- ① 松本淳, 小川英之, 予混合圧縮着火燃焼におけるエタノールの着火抑制効果に対する化学動力学的解析, 第47回燃焼シンポジウム, 2009
- ② Ogawa, H., Hari, S., Nakamura, T, Improvements to Premixed Diesel Combustion with Ignition Inhibitor Effects of Premixed Ethanol by Intake Port Injection, 2010 SAE World Congress, 2010

- ③ 小澤琢磨, Hari Setiapraja, 原孝佑, 小川英之, 山崎賢治, 第21回内燃機関シンポジウム, 2010
- ④ Hu ZHANG and Hideyuki OGAWA, Ignition control for DME-HCCI combustion with ethanol as a low-temperature oxidation inhibitor, 第21回内燃機関シンポジウム, 2010
- ⑤ 原 考佑, ハリ セティアプラジャ, 小澤琢磨, 山崎賢治, 小川英之, ブタノール-エタノール混合軽油のディーゼル燃焼特性, 自動車技術会 2011 年春季学術講演会, 2011
- ⑥ Zhang, H., Hasegawam, R., and Ogawa, H., Improvement in DME-HCCI Combustion with Ethanol as a Low-temperature Oxidation Inhibitor, 2011 SAE Powertrain, Fuels and Lubricants Meeting, 2011
- ⑦ Hari, S., Ozawa, t., Hara, K., Yamazaki, K., and Ogawa, H., Combustion Characteristics of Emulsified Blends of Aqueous Ethanol and Diesel Fuel in a Diesel Engine with High Rates of EGR and Split Fuel Injections, 2011 SAE Powertrain, Fuels and Lubricants Meeting, 2011
- ⑧ ハリ セティアプラジャ, 原 考佑, 柴田元, 小川英之, アルコール・非エステル化植物油混合燃料のディーゼル燃焼特性, 自動車技術会 2011 年秋季学術講演会, 2011
- ⑨ 長谷川諒, 張虎, 柴田元, 小川英之, エタノールの反応抑制効果を用いた DME 予混合圧縮自己着火エンジンの燃焼制御, 第22回内燃機関シンポジウム, 2011

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 英之 (OGAWA HIDEYUKI)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40185509