燃料の着火性が予混合化ディーゼル燃焼の 運転可能範囲に及ぼす影響*

李 鉄^{*1}, 柿崎隆太^{*2}, 森脇理一^{*3}
小川英之^{*4}, 村瀬真人^{*5}

Effect of Fuel Ignitability on the Stable Operating Range of Premixed Diesel Combustion

Tie LI^{*1}, Ryuta KAKIZAKI, Riichi MORIWAKI, Hideyuki OGAWA
and Masato MURASE

^{*1} Div. of Energy and Environmental Systems, Faculty of Engineering, Hokkaido Univ.
N13, W8, Kita-ku, Sapporo, 060-8628 Japan

The effects of fuel ignitability on the stable operating range of premixed low temperature diesel combustion (LTC) were investigated. With the intake oxygen concentration set at 14% and the injection timing at 30 °CA BTDC, the operating load range is almost unchanged for fuels with cetane number above 40; while with cetane number below 40 both the high and low load limits increase significantly with decreasing cetane numbers, the low load limit increases more steeply, resulting in a narrowing of the load range. When keeping the combustion phasing constant at TDC by controlling the injection timing, smoke emission limits at the higher load operation for high ignitability fuels and abrupt combustion for low ignitability fuels become problems, but a decrease in the intake oxygen concentration is effective to expand the high load limit. The low load limit can be expanded with the combustion phasing held constant at TDC, and it can be further expanded when increasing the intake oxygen concentration, at the expense of increases in NO_x emissions however. Finally, the effects of fuel ignitability on the range of injection timings for stable LTC operation are also examined.

Key Words : Diesel Engine, Combustion, Combustion Products, Exhaust Gas Recirculation, Fuel Ignitability, Exhaust Gas Emissions

1. 緒 言

ディーゼルエンジンは熱効率がよく出力性能も優れるが、窒素酸化物 (NO_x) と微粒子の間にトレードオフの関係があるため、両者の同時低減が困難であるといった問題がある。それに対して近年、比較的大量の排気再循環 (EGR) のもとで着火を燃料噴射終了後に生ずるようにして燃焼の低温化と予混合化を図ることで無煙・超低 NO_x を実現できる低温ディーゼル燃焼法が注目を集めている⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。しかし、この燃焼法は高負荷では燃焼が急激化するため、比較的低い負荷に限定されるといった問題がある。

著者らは低セタン価燃料を利用することで市販軽油より高い負荷まで無煙低温ディーゼル燃焼を実現できることを報告した⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾。その中で、ディーゼルエンジン用燃料の着火性指標であるセタン価は、副室式の CFR エンジンを用いて高酸素濃度で不均一性の強い条件において測定するため、予混合化ディーゼル燃焼の着火を表現しきれないことが示唆された。一方、より高い燃料利用効率を得るため、ガソリン系燃料をディーゼルエンジンに利用する研究が行われており、その実用化の可能性が十分あるものと考えられる⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾。そのため、より広い範囲

* 原稿受付 2011 年 1 月 26 日

^{*1} 正員, 北海道大学 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

^{*2} 三菱自動車(株)

^{*3} 学生員, 北海道大学大学院工学研究科

^{*4} 正員, フェロー, 北海道大学

^{*5} (株) JOMO テクニカルリサーチセンター

E-mail: litie@eng.hokudai.ac.jp

において着火性や蒸発性などの燃料特性がエンジン燃焼および排ガスの特性に与える影響を把握する必要がある。

そこで、本研究ではより広い範囲の燃料着火性や蒸留特性が低温予混合化ディーゼル燃焼に及ぼす影響を解明することを目的とした。前報⁽¹⁴⁾では、吸気酸素濃度 $[\text{O}_2]_{\text{in}}$ を 14% に、噴射時期 (t_{inj}) を 30 °CA BTDC に固定した際に燃料のセタン価および蒸留特性が低温予混合化ディーゼル燃焼の諸特性に及ぼす影響を検討した⁽¹⁴⁾。その結果、燃料の蒸留特性による着火遅れや安定運転範囲への影響はガソリンから軽油に至る広い留分範囲でほとんど認められなかった。一方、セタン価は着火遅れと相関を有するものの、バラつきが大きく特にセタン価が 40 以下ではセタン価の低下に伴って着火遅れが急激に増加すること、および運転可能な負荷範囲がセタン価よりも実際の着火遅れに強く依存することを明らかにした。本報では、前報の結果を踏まえたうえで燃料の分子構造分析により得られた着火性指標 PCN (Predicted Cetane Number)⁽¹⁵⁾ を用いて低温予混合化ディーゼル燃焼の着火遅れおよび運転可能な負荷範囲に及ぼす燃料の影響を検討した。また、負荷一定で各燃料について低温予混合化ディーゼル燃焼の運転可能な噴射時期範囲を調べ、低温予混合化ディーゼル燃焼の燃料着火性に対するロバスト性を検討した。以下、その詳細を記述する。

2. 実験装置および方法

表 1 に供試機関の諸元および主要運転条件を示す。供試機関にはコモンレール噴射装置 (デンソー製) を有する単気筒・無過給・四行程・直噴式ディーゼル機関 (ボア 106 mm, 行程体積 1007 cm³, スワール比 2.2) を使用した。運転条件は、回転速度を 1320 rpm (定格運転時の 60% 回転速度)、噴射圧力を 60 MPa, 冷却水温度を 80 °C とした。EGR は排気管から分流した実排気を吸気温度が 30 ± 3 °C になるように冷却して吸気に還流することを行った。EGR 率は全吸入ガス中に占める再循環排気の体積割合 (標準状態) で定義した。

図 1 に供試燃料のセタン価および 50% 蒸留温度を示す。本研究では、市販のガソリン (GS), 軽油 (DF), および灯油 (KE) をそれぞれ基材とし、バイオ燃料, パラフィン, アロマチックなどを含む溶剤, あるいは試薬等を混合・調整することで得られたセタン価が 25 から 75 までの計 23 種類の燃料を用いた。なお、供試燃料の密度や粘度などの物性, および蒸留温度に関する実験結果は前報で報告した⁽¹⁴⁾。このセタン価 (CN) は JIS に基づいて CFR 機関により求めたものであるが、前報では、セタン価と予混合化ディーゼル燃焼の着火遅れとの相関にバラつきが多かったため、本報では水素核磁気共鳴分光法 (¹H-NMR) による燃料分子構造解析に基づいて得られた着火性評価指標 PCN を用いて低温予混合化ディーゼル燃焼の諸特性に及ぼす影響を検討した。図 2 に供試燃料の PCN とセタン価の相関を示す。PCN はセタン価と比較的良好な相関を有するものの、ばらつきもかなりあることからセタン価とは若干異なる指標であることがわかる。

排気各濃度の測定には、一酸化炭素 (CO) は非分散型赤外分析計 (NDIR) を、窒素酸化物 (NO_x) は化学発光法 (CLD) を、未燃炭化水素 (UHC) は加熱型水素炎検出器 (HFID) を、黒煙 (Smoke) はボッシュ式スモークメータをそれぞれ用いた。吸気酸素濃度は磁気式酸素計を用いて測定した。

Table 1 Engine specifications and operating conditions

Cylinder number	1
Displacement	1007 cm ³
Combustion chamber	DI, toroidal
Compression ratio	16.0
Swirl ratio	2.2
Intake system	Naturally aspirated
Fuel injection system	Common rail system
Nozzle hole	φ 0.20×4 -150°
Injection pressure	60 MPa
Injection quantity	Variable
Intake temperature	30 ± 2 °C
Engine speed	1320 rpm

Fig. 1 Cetane number and distillation temperature of test fuels

Fig. 2 Relation between of PCN and cetane number

3. 結果および考察

3・1 燃料着火性が低温予混合化ディーゼル燃焼の着火遅れに及ぼす影響

図3は、各燃料について図示平均有効圧力 (IMEP) を 0.3 MPa に、噴射時期を 30 °CA BTDC に、吸気酸素濃度を 14% に設定した際の着火遅れとセタン価および PCN の相関を示したものである。なお、本研究における着火時期は正規化した累積熱発生が 10% に達したクランク角度 (CA10) と定義している。上述の運転条件では、着火遅れが最も小さい GTL でも燃料噴射終了から着火まで約 6 °CA の予混合化期間があり、すべての燃料について無煙燃焼となっている。また、NO_x は吸気酸素濃度が 14% と低いため、燃料の特性にかかわらずすべて 100 ppm 以下である。図中の実線は着火遅れをセタン価および PCN に対して関数近似を行う際に決定係数 (R^2) が最も高い近似曲線を示したものである。図に示していないが、着火遅れの実験式によく使われている累乗関数や指数関数⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁸⁾を用いて着火遅れと PCN の関係を近似しても 0.9 以上の高い決定係数が得られる。セタン価と PCN の両者ともその減少に伴って着火遅れが大きくなるが、PCN のほうが明かに着火遅れとの相関が強い。特に、セタン価が 40 以下になると近似曲線から大きく外れる場合があるのに対し、PCN では強い相関が保たれている。

予混合化ディーゼル燃焼では低温酸化反応が着火に強く影響するが、低温酸化反応は燃料分子構造との相関が強いことが知られている⁽¹⁹⁾。PCN は燃料分子構造解析から予測した着火性指標であることから予混合化ディーゼル燃焼の着火遅れと強い相関が得られるのに対し、セタン価は着火遅れが従来のディーゼル燃焼に近い 13 °CA となる条件で測定されるため、物理的な要因にも左右されと考えられ、着火遅れが長くなって化学的要因が支配的となる予混合化ディーゼル燃焼で良好な結果が得られなかったものと考えられる。

Fig. 3 Ignition delay as a function of cetane number (CN) and predicted cetane number (PCN) (IMEP = 0.3 MPa, t_{inj} = 30 °CA BTDC, $[O_2]_{in}$ = 14%)

Fig. 4 Operating load range for smokeless, low-temperature combustion as a function of CN, PCN, and ignition delay ($t_{inj} = 30^\circ\text{CA}$ BTDC, $[\text{O}_2]_{in} = 14\%$)

3・2 燃料着火性が低温予混合化ディーゼル燃焼の運転可能負荷範囲に及ぼす影響

図4は、各燃料について低温予混合化燃焼の運転可能負荷範囲をセタン価、PCN、および着火遅れに対して示したものである。なお、すべての運転は、噴射時期を 30°CA BTDC で吸気酸素濃度を 14%一定としている。ここで負荷可能範囲は最大圧力上昇率 ($dp/d\theta_{max}$) が $1.0 \text{ MPa}/^\circ\text{CA}$ 以下、黒煙が 0% (ボッシュ) 以下、負荷変動率 (COV_{IMEP}) が 5%以下と定義しており、上限は $dp/d\theta_{max}$ または黒煙により、下限は COV_{IMEP} により制約される。なお、図4の各条件ではいずれの場合も無煙で黒煙による制約は受けていない。図3で示したように、PCNのほうがセタン価より実際の着火遅れと相関が高く、図4の右上に示すように運転可能負荷範囲は実際の着火遅れに強く依存することから、PCNとの相関のほうが高くなっている。とくに、セタン価あるいはPCNが40以下では、運転負荷範囲はセタン価の低下とともに大きなバラツキをともなう急激に増加しており、セタン価で運転可能負荷範囲を予測するのは困難であるのに対し、PCNの低下に対しては良好な相関を保ちながら緩やかに増加しており、PCNにより運転可能負荷範囲のおおまかな予測が可能である。いずれの着火性指標でも40以上では運転可能な負荷範囲がさほど変化しないのに対し、40以下では上限と下限とも顕著に増加するが、下限の増加が大きいため、運転範囲は狭くなる。これは、高着火性では過早着火にともなう急激燃焼に、低着火性では着火遅れの増大による燃料混合気の希薄化にともなう燃焼の不安定化に起因する。

次に、酸素濃度と噴射時期を最適化することで運転可能負荷範囲の拡大を図った。図5に、三通りの吸気酸素濃度：10%、14%、16%について噴射時期により50%熱発生 (CA50) が上死点になるように制御した際の無煙低温ディーゼル燃焼の運転可能な負荷範囲に及ぼす燃料着火性の影響を示す。図5(a)に示すように、PCNが40以下でCA50を上死点にした場合 (図中○印) には運転負荷の下限を低負荷側へ拡大することができる。これは、CA50を上死点にするために噴射時期を遅角したことにより過度の希薄均一化が抑制されたと考えられる。さらに、吸気酸素濃度を14%から16%までに高めると(●)、より低負荷での運転が可能となるが、同時にNOxは数倍に増加している。吸気酸素濃度をさらに高めることで下限負荷のさらなる拡大が期待できるが、この場合にはNOxの増加により制約される。なお、本研究で用いたエンジンが1320 rpmの条件ではIMEP 0.2 MPaは無負荷運転に相当する。

一方、図5(b)に示すように酸素濃度が14% (○)および10% (■)の両条件において、PCNで50以上の高着火性燃料を用いた場合には、最大圧力上昇率が $1.0 \text{ MPa}/^\circ\text{CA}$ に達する以前に黒煙の発生により負荷上限が制限を受ける。この条件においては、噴射時期の遅角に伴い着火遅れ期間が短縮し過濃混合気割合が増大したことで緩やかな燃焼となったことから圧力上昇率が低下し、結果として運転可能負荷範囲の上限の低下が避けられたものと考えられる。一方、酸素濃度14%でPCNが40以下の領域で噴射時期を 30°CA BTDCに固定した場合 (□) に比べ

Fig. 5 Operation load range as a function of PCN for smokeless, low-temperature combustion with combustion phasing at TDC for two intake oxygen concentrations (High load limit: $dp/d\theta_{max} = 1.0 \text{ MPa} / ^\circ\text{CA}$, low load limit: $\text{COV}_{\text{IMEP}} = 5\%$)

て CA50 を上死点に固定する際に運転可能負荷上限が低下したのは、着火遅れ期間が量論比付近の混合気を多く形成する条件となり、燃焼が急激化しやすくなったためと考えられる。PCN が 25 の燃料で酸素濃度 10% とした際 (■) には高負荷まで急激燃焼を抑制できるため、黒煙が発生するまで上限を向上できる。

一方、各上限における NOx は、酸素濃度 14% で噴射時期を 30 °CA BTDC で固定した条件 (□) では着火性のいかににかかわらず 200 ppm に近い高いレベルになっているが、CA50 を上死点に固定して着火性の高い燃料を用いることにより (○), かなり低いレベルまで低下できる。これは、噴射開始時期 30 °CA BTDC で固定して着火性が高い燃料を用いると着火が過度に進角して高温滞留時間が長くなるのに対し、CA50 を上死点とする条件では着火時期がおおむね同等となることから、着火性の高い燃料ほど両条件の高温滞留時間に差が生じるためであると思われる。酸素濃度を 10% まで低下させると (■), いずれの燃料でも排出濃度は 10 ppm 以下の非常に低いレベルになっている。

3・3 燃料着火性が低温予混合化ディーゼル燃焼の運転可能噴射時期範囲に及ぼす影響

低温予混合化ディーゼル燃焼において燃料着火性が運転可能噴射時期範囲に及ぼす影響を検討した。図 6 は、PCN を横軸に、噴射時期を縦軸に取って最大圧力上昇率、黒煙、および NOx を示したものである。なお、運転負荷は IMEP が 0.4 MPa, 吸気酸素濃度が 14% で一定である。図中の破線は上下それぞれ燃焼安定限界 ($\text{COV}_{\text{IMEP}} = 5\%$) および圧力上昇率限界 ($dp/d\theta_{max} = 1.0 \text{ MPa} / ^\circ\text{CA}$) を示したもので、等高線は各燃料について安定限界から噴射時期を 3 °CA ずつ進角した際に得られた実験データを基に相関関数フィッティングにより得たものである。ただし、噴射時期を 30 °CA BTDC より早めると、燃料噴霧がピストンキャビティから外れてシリンダーライナーに衝突する可能性が高くなるため、それ以上の進角は行わなかった。PCN が 40 以上では、無煙となるほとんどの範囲で急激燃焼が避けられず、NOx も 100 ppm を超える。ただし、市販燃料に相当する PCN が 40~56 の範囲では噴射時期が 5~18 °CA BTDC の比較的広い範囲において若干の黒煙の発生をとまなうものの安定な低温予混合化ディーゼル燃焼が可能となる。これは、この燃焼モードがこの着火性範囲における燃料の多様化に対して

Fig. 6 Injection timing range for stable, low-emission, and low-noise operation as a function of PCN
(IMEP = 0.4 MPa, $[O_2]_{in} = 14\%$)

Fig. 7 Possible ignition range for stable, low-emission, and low-noise operation as a function of PCN
(IMEP = 0.4 MPa, $[O_2]_{in} = 14\%$)

十分なロバスト性を有することを示唆している。なお、図に示していないが、上述した安定な低温予混合化ディーゼル燃焼範囲において噴射時期の変化による図示熱効率の低下が1～3%の範囲に収まっている。一方、PCNが40以下では、広い噴射時期範囲で安定した無煙・低NO_x燃焼が可能となっている。圧力上昇率およびNO_xはPCNが低下するほど低くできるが、過度にPCNが低下すると混合気の希薄化などに起因して燃焼効率が悪化し熱効率は3%以上低下するとともに安定した着火が得られる噴射時期範囲が急激に狭くなる。

図7に、図6に示した噴射時期範囲において着火が最も早い時期と最も遅い時期を示す。すなわち、この範囲は本実験の運転条件において制御可能な着火時期の範囲を表している。制御可能な着火時期範囲は燃料着火性の低下に伴い著しく狭くなっている。これは、着火性が低くなって着火遅れが増大するほど噴射開始時期の進角あるいは遅角に対する着火時期の感度が小さくなるためである。

4. 結 論

本研究では、低温予混合化ディーゼル燃焼の着火遅れおよび安定運転可能範囲に及ぼす燃料着火性の影響を検討した。その結果を要約すると以下の通りである。

1. 低温予混合化ディーゼル燃焼では、燃料の分子構造解析により得られた着火性指標PCNがセタン価よりも着火遅れと高い相関性を有しており、特に低着火性燃料を利用する際に運転可能な負荷範囲の評価に有利である。

2. 噴射時期を 30 °CA BTDC に、吸気酸素濃度を 14% に固定した場合における運転可能な負荷範囲は、PCN あるいはセタン価が 40 以上ではその変化にともなってさほど変化しないのに対し、PCN が 40 以下では上限および下限とも顕著に上昇し、下限の上昇が上限よりも大きいため運転可能負荷範囲が狭くなる。
3. 噴射時期により 50% 熱発生時期を上死点に固定すると、安定運転の下限を低負荷側へ拡大できる。吸気酸素濃度の増加により下限のさらなる拡大が可能であるが、NO_x が顕著に増加する。
4. 50% 熱発生時期を上死点に固定しても安定運転の上限を拡大できないが、吸気酸素濃度の低下により上限の拡大が可能である。ただし、その際には黒煙の増加や熱効率の低下が避けられなくなる。
5. PCN が 40~56 の範囲では噴射時期が 5~18 °CA BTDC の範囲において熱効率の低下を抑えながら安定な低温予混合化ディーゼル燃焼が可能であるが、黒煙の排出が避けられない。噴射時期をより早期化することで無煙燃焼となるが、その場合には急激な燃焼が避けられず、NO_x も 100 ppm に近いレベルになる。一方、PCN が 40 以下では広い噴射時期範囲で安定した無煙・低 NO_x 燃焼が可能となるが、多くの場合には燃焼効率が低下する。
6. 制御可能な着火時期範囲は燃料の着火性の低下に伴い著しく狭くなる。

文 献

- (1) Kimura, S., Aoki, O., Ogawa, H., Muranaka, S., Enomoto, Y., New Combustion Concept for Ultra-Clean and High-Efficiency Small DI Diesel Engines, *SAE paper* 1999-01-3681, 1999.
- (2) Akihama, K., Takatori, Y., Inakaki, K., Sasaki, S., Dean, A.M., Mechanism of the Smokeless Rich Diesel Combustion by Reducing Temperature, *SAE paper* 2001-01-0655, 2001.
- (3) 小川英之, 清水肇, 木戸伸吾, 宮本登, “超高 EGR による低酸素濃度雰囲気ディーゼル燃焼の諸特性と燃料噴射量依存性”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 71, No. 710 (2005), pp. 217-224.
- (4) 小川英之, 李鉄, 木戸伸吾, 清水肇, 宮本登, “超高 EGR・低酸素濃度雰囲気ディーゼル燃焼の燃料噴射および圧縮比に対する依存性”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 72, No. 714 (2006), pp. 543-549.
- (5) Ogawa, H., Li, T., Miyamoto, N., Characteristics of Low Temperature and Low Oxygen Diesel Combustion with Ultra-High EGR, *International Journal of Engine Research*, Vol. 8, No. 4 (2007), pp. 365-378.
- (6) Shimazaki, N., Tsurushima, T., Nishimura, T., Dual-Mode Combustion Concept with Premixed Diesel Combustion by Direct Injection Near Top Dead Center, *SAE paper* 2003-01-0742, 2003.
- (7) 李鉄, 木戸伸吾, 小川英之, “超高 EGR・低酸素ディーゼル燃焼の燃料性状依存性”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 72, No. 719 (2006), pp. 213-218.
- (8) Li, T., Izumi, H., Shudo, T., Ogawa, H., Effect of Cetane Number on Mixture Formation and Combustion Characteristics of Ultra-High EGR Low Temperature Diesel Combustion, *Review of Automotive Engineering*, Vol. 39, No. 3 (2008), pp. 157-162.
- (9) 李鉄, 鈴木勝, 首藤 登志夫, 小川 英之, “大量 EGR・低温ディーゼル燃焼の混合気形成および燃焼特性に及ぼすセタン価の影響”, 自動車技術会論文集, Vol. 39, No. 6 (2008), pp. 119-124.
- (10) Li, T., Suzuki, M., Ogawa, H., Effects of Ethyl *tert*-Butyl Ether Addition to Diesel Fuel on Characteristics of Combustion and Exhaust Emissions of Diesel Engines, *Fuel*, Vol. 88 (2009), pp. 2017-2024.
- (11) Kalghatgi, G.T., Risberg, P., Ångström, H.-E., Partially Pre-mixed Auto-Ignition of Gasoline to Attain Low Smoke and Low NO_x at High Load in a Compression Ignition Engine and Comparison with a Diesel Fuel, *SAE paper* 2007-01-0006, 2007.
- (12) Weall, A.J. and Collings, N., Investigation into Partially Premixed Combustion in a Light Duty Multi Cylinder Diesel Engine Fuelled with a Mixture of Gasoline and Diesel, *SAE paper* 2007-01-4058, 2007.
- (13) Sung, K., Kim, J., Reitz, R.D., Experimental Study of Pollutant Emission Reduction for Near-Stoichiometric Diesel Combustion in a Three-Way Catalyst, *International Journal of Engine Research*, Vol. 10, No. 5 (2009), pp. 394-357.
- (14) 李鉄, 柿崎隆太, 鈴木勝, 村瀬真人, 小川英之, “予混合化ディーゼル燃焼の燃料着火性依存性”, 自動車技術会論文集, Vol. 40, No. 6 (2009), pp. 1503-1508.
- (15) Suzuki, T., Murase, M., Akasaka, Y., A Study on the Applicability of Parameters based on Molecular Structure to Combustion Characteristics, *SAE paper* 2010-01-0736, 2010.

- (16) Shipinski, J., Meyers, P.S., Uyehara, O.A., A Spray Droplet Model for Diesel Combustion, *Institute of Mechanical Engineering*, Vol. 184 (Part 3J) (1960), pp.28–35.
 - (17) Henein, N.A., Bolt, J.A., Correlation of Air Charge Temperature and Ignition Delay for Several Fuels in a Diesel Engine, *SAE paper* 690252, 1969.
 - (18) Aligrot, C., Champoussin, J.C., Guerrassi, N., Claus, G., Prediction of Self-ignition Delay of Different Liquid Diesel Fuels, *Proceedings of the 3rd COMODIA* (1994), pp.331-336.
 - (19) Pilling, M.J., ed., *Low-Temperature Combustion and Autoignition*, (1997), Elsevier.
-