

燃料組成ならびに噴射条件が燃料噴霧の着火に及ぼす影響

Effects of Fuel Composition and Injection Conditions on Spray Ignition

○正 堀部 直人 (京大) 染澤 俊介 (京大院)
山本 健大 (京大院) 正 石山 拓二 (京大)

Naoto HORIBE, Kyoto University, Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto
Shunsuke SOMEZAWA, Kenta YAMAMOTO, Takuji ISHIYAMA, Kyoto University

This study aims to explore effects of fuel property and injection conditions on ignition delay for various combustion methods using a constant-volume vessel. Ignition delays of binary-component fuels which have same ignition delay under a specified ambient condition and a specified injection condition were measured under several ambient conditions. The results show that ignition delay depends on the boiling point of high-ignitability component when the ambient pressure and temperatures are reduced and on the fuel properties when the injection conditions are changed.

Key Words: Liquid Fuel, Combustion, Diesel Engine, Fuel Injection, Cetane Number, Ignition Delay, Constant Volume Vessel

1. はじめに

自動車用ディーゼル機関では、ますます厳しくなる排ガス規制に対応すべく、PCCI 燃焼などの新しい燃焼方式に関する研究がなされている。また、エネルギーセキュリティ確保の観点から、様々な代替燃料が検討されている。燃焼方式によって、燃料の組成や性状が噴霧の着火や燃焼に及ぼす影響が異なることが知られている⁽¹⁾が、その影響の度合いや原因を広範囲の燃焼条件や燃料について詳しく調査した研究例は少なく、基礎的な知見が不足している。そこで本研究では、定容燃焼装置を用いて、ある雰囲気条件および燃料噴射条件のもとで着火遅れを一致させた6種類の二成分混合燃料を用いて、雰囲気条件および噴射条件を変更し、燃焼形態を変えた場合に着火遅れがどのように変化するかを調べた。

2. 実験装置および方法

本研究には、希薄予混合気を火花点火・燃焼させて得た高温高压の模擬空気の中に燃料噴射を行う方式の定容燃焼装置⁽²⁾を用いた。本装置は、直径 80mm、奥行 30mm (容積約 150cm³) の燃焼室を持つ。希薄予混合気 (C₂H₄, H₂, O₂ および N₂) の組成と充填圧力を調節し、燃料噴射開始時点での雰囲気圧を圧力 $p_i=4\text{MPa}$ および 2MPa、熱力学的平均温度 $T_i=800\text{K}$ および 900K、酸素モル分率 21%とした。

Table 1 Specifications of fuel components

	n-cetane	n-decane	n-heptane	HMN	iso-octane
Density (kg/m ³) ^{*1}	773	734	687	790	692
Kinematic Viscosity (mm ² /s) ^{*2}	3.07	1	0.51	3.14 ^{*3}	0.68 ^{*3}
Boiling Point (°C)	287	173	98.4	240	99
Cetane number	100	77 ^{*4}	56 ^{*4}	15	17.5 ^{*4}

*1: at 15°C, *2: at 30°C, *3: at 37.8°C, *4: estimated⁽³⁾

Table 2 Mixing ratio of fuels

	RF	F1	F2	F3	F4	F5
n-cetane	35	33	—	—	—	—
n-decane	—	—	50	50	—	—
n-heptane	—	—	—	—	90	85
HMN	65	—	50	—	10	—
iso-octane	—	67	—	50	—	15

(vol%)

燃料噴射にはコモンレール式電子制御燃料噴射装置 (Denso ECD-U2P) を用い、単孔ノズルを用いて燃焼室中心に向かって噴射を行った。噴孔径 $d_N=0.20, 0.18, 0.17\text{mm}$ とし、噴射圧力 p_{inj} は燃料噴射率がほぼ等しくなるように各噴孔径に応じて 90, 120, 160MPa と組み合わせた。

燃料は表 1 に示す高自着火性成分 n-cetane, n-decane, n-heptane および低自着火性成分 hepta-methyl-nonane (HMN), iso-octane を、表 2 に示す体積分率で混合して用いた。RF はセタン価 45 のセタン価基準燃料であり、F1~F5 は RF の基材よりも蒸発性の高い基材を混合した二成分混合燃料で、 $p_i=4\text{MPa}$, $T_i=900\text{K}$, $d_N=0.18\text{mm}$, $p_{inj}=120\text{MPa}$, 燃料投入熱量 871J の標準条件において RF と着火遅れが等しくなるように混合比率を調整した。すべての実験において燃料投入熱量は 871J 一定とした。

燃焼室内の圧力は圧電式圧力変換器 (Kistler 6052A) で測定し、熱発生率および着火遅れをもとめた。本研究では、噴射開始から熱炎により熱発生率が急激に立ち上がるまでの遅れ期間を着火遅れと定義する。

なお、定容燃焼装置壁面温度および燃料温度のばらつきによる影響を避けるため、燃焼室壁およびタンク内燃料を 45°C、インジェクタを 50°C に加熱して実験を行なった。

3. 実験結果および考察

3.1 燃料組成および雰囲気条件が着火遅れに及ぼす影響

まず、雰囲気圧力および雰囲気温度を変更した場合に燃料組成が着火遅れの変化に及ぼす影響を調査するため、標準噴射条件において、表 2 の各燃料を用いて雰囲気条件 (p_i, T_i) = (4MPa, 900K), (2MPa, 900K), (4MPa, 800K) において実験を行なった。図 1 に各雰囲気条件における熱発生率およびニードルリフトセンサ出力の履歴を示す。いずれの燃料も $p_i=4\text{MPa}$, $T_i=900\text{K}$ では典型的なディーゼル燃焼となり、 $p_i=2\text{MPa}$, $T_i=900\text{K}$ では PCCI 的な燃焼となる。また、 $p_i=4\text{MPa}$, $T_i=800\text{K}$ では中間的な燃焼形態となる。各燃料は $p_i=4\text{MPa}$, $T_i=900\text{K}$ において熱発生率が概ね一致するように混合比率を調整したが、 p_i あるいは T_i を下げると燃料によって熱発生率の履歴が異なる。

各条件における着火遅れを比較するため、図 1 の条件における 5 回の実験データの平均値を図 2 に示す。また、各条件における着火遅れの最大値および最小値をエラーバーで示す。全体的に見ると着火遅れは高自着火性成分への依

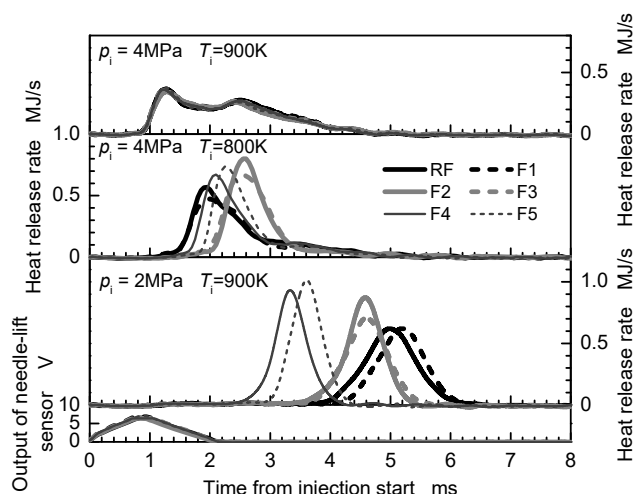


Fig.1 Effects of fuel and ambient conditions on heat release rate ($d_N=0.18\text{mm}$, $p_{inj}=120\text{MPa}$)

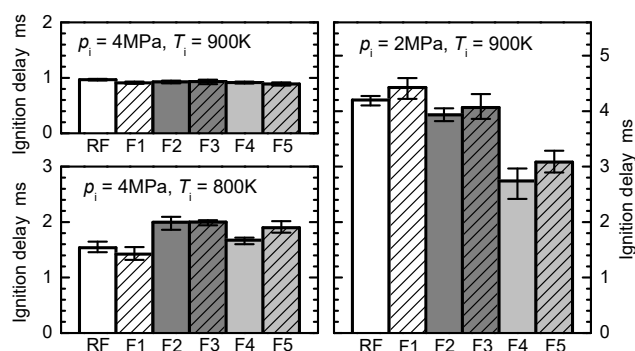


Fig.2 Effects of fuel and ambient conditions on ignition delay ($d_N=0.18\text{mm}$, $p_{inj}=120\text{MPa}$)

存性が高い。 $p_i=4\text{MPa}$, $T_i=800\text{K}$ では、n-cetane を用いた RF, F1 の着火遅れが短く、n-decane を用いた F2, F3 の着火遅れは長い。また、低自着火性成分の違いによる着火遅れの傾向は一定ではない。RF に対して F1 は、低沸点の低自着火性成分 iso-octane を用いたことで n-cetane の蒸発が促進され⁽⁴⁾、着火遅れが短くなったと考えられる。一方、高自着火性成分に n-heptane を用いた F4 と F5 では低自着火性成分として HMN を用いた F4 の着火遅れが短い。n-heptane は HMN と比べて沸点が非常に低い。そのため、F4 を用いた場合、F5 と比べて初期の n-heptane 蒸気の濃度が高くなり、着火遅れが短くなったと考えられる。n-decane を用いた燃料では、低自着火性成分の違いによる着火遅れへの影響は小さい。 $p_i=2\text{MPa}$, $T_i=900\text{K}$ では、n-cetane を用いた RF, F1 の着火遅れが長く、n-heptane を用いた F4, F5 の着火遅れは短くなり、沸点が低い高自着火性成分を用いると着火遅れは短くなる傾向が見られる。一方、低自着火性成分としては沸点が低い iso-octane を用いた方が着火遅れは長くなる傾向がある。 $p_i=2\text{MPa}$, $T_i=900\text{K}$ のような噴射終了後に着火するような燃焼形態をとる場合には蒸発の速度とともに化学反応速度が着火・燃焼に及ぼす影響が重要となるため、燃料組成が着火遅れに及ぼす影響の原因を明らかにするためには、化学反応を考慮したより詳細な検討が必要である。

3.2 噴射条件が着火遅れに及ぼす影響

つぎに噴射条件が二成分混合燃料の着火遅れに及ぼす影響を調査するため、高自着火性成分として沸点の高い n-cetane を用いた RF, F1 と沸点の低い n-heptane を用いた F4, F5 を用いて、雰囲気条件 (p_i , T_i) = (4MPa, 900K),

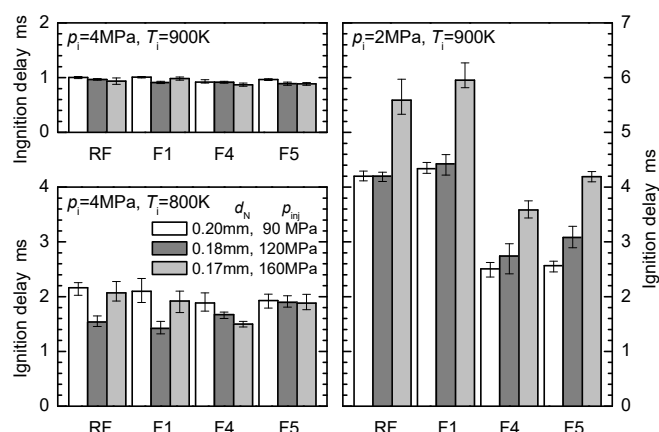


Fig.3 Effects of injection conditions, fuel and ambient conditions on ignition delay

(2MPa, 900K), (4MPa, 800K) において噴射条件 (d_N , p_{inj}) = (0.20mm, 80MPa), (0.18mm, 120MPa), (0.17mm, 160MPa) として実験を行なった。噴射期間は約 2.1~2.4ms となる。各条件における着火遅れを図 3 に示す。 $p_i=4\text{MPa}$, $T_i=900\text{K}$ では、噴射条件を変えても着火遅れの変化は小さいが、噴孔を小さくして噴射圧力を上げることで着火遅れは短くなる傾向がある。小噴孔径・高圧噴射化によって混合が促進されるため、典型的なディーゼル燃焼となる雰囲気条件下では着火遅れが短くなったと考えられる。一方、 $p_i=2\text{MPa}$, $T_i=900\text{K}$ では、いずれの燃料でも混合を促進することで着火遅れが長くなる。長い着火遅れの間に希薄化・均一化が進み、量論比以下の希薄な混合気が増加するため、混合の進みや早い噴射条件ほど着火遅れが長くなったと考えられる。 $p_i=4\text{MPa}$, $T_i=800\text{K}$ においては、n-heptane を用いた燃料 F4, F5 では $p_i=4\text{MPa}$, $T_i=900\text{K}$ の場合と同様に混合を促進することで着火遅れは短くなる。ところが、n-cetane を用いた RF, F1 では、低自着火性成分の種類に依らず噴射条件 (d_N , p_{inj}) を (0.20mm, 80MPa) から (0.18mm, 120MPa) とすると着火遅れは短くなり、さらに (0.17mm, 160MPa) とすると着火遅れは長くなる。混合促進によって初めは着火遅れが短くなり、さらに混合を促進したことで希薄化し、再び着火遅れが長くなったと考えられる。燃料による傾向の違いについては、RF および F1 は燃料の粘性が高く、噴霧の貫徹力が強いために着火前に噴霧が燃焼室壁面に到達して空気導入が促進されること⁽⁶⁾や、壁面からの冷却を受けることなどを原因のひとつとして考慮する必要があり、さらに詳細な検討を要する。

4. まとめ

セタン価 45 相当の二成分混合燃料を用い、定容燃焼装置において雰囲気温度・圧力、噴射条件を変化させて着火遅れの計測を行った。その結果、雰囲気条件や噴射条件を変化させた時の着火遅れの変化が高自着火性成分の蒸発性の影響を強く受けることや、燃料性状によって噴射条件が着火遅れに及ぼす影響について傾向に差が出ることなどが明らかになった。おわりに、噴射系部品をご提供頂いたトヨタ自動車(株)に深く感謝の意を表す。

参考文献

- (1) Siebers, Trans. SAE, 94-7, (1986), pp.673-686.
- (2) 井原, ほか 3 名, 機論 B, 69-685, (2003), pp.2130-2137.
- (3) Mulphy, et al., NREL/SR-540-36805, (2004).
- (4) Kawano, et al., SAE Paper No. 2001-01-0202, (2001).
- (5) 鈴木, ほか 2 名, 機論 B, 59-568, (1993), pp. 338-345.