

G070055

二成分燃料中における n-アルカンの推定セタン価

宮本 祐輔^{*1}, 山本 健大^{*1}, 堀部 直人^{*2}, 石山 拓二^{*2}

Estimated Cetane Number of n-Alkane in Two-Component Fuels

Yusuke MIYAMOTO, Kenta YAMAMOTO, Naoto HORIBE and Takuji ISHIYAMA

^{*1} Kyoto Univ. Graduate School of Energy Science
Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

This study aims to explore the effects of fuel composition on spray ignition using a constant volume vessel. Ignition delays of two-component fuels (n-alkane + HMN) with a wide range of n-alkane volume percentages were measured under two ambient conditions. Based on the results, estimated cetane numbers (CN_e) of n-alkane were calculated by the equation, $CN_e = CN_{HMN} + 100(CN_m - CN_{HMN})/r$. The results showed that the dependency of ignition delays on n-alkane volume percentages changed at a certain percentage for all fuels. The dependency of CN_e on n-alkane percentages was considerably affected by ambient pressure.

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

1. はじめに

ディーゼル機関には多様な燃料を利用できるという特徴があり、エネルギーセキュリティ確保の観点から、バイオマス燃料や GTL といった様々な代替燃料を利用することが検討されている。また、従来から使用されている軽油の性状は国、地域によって様々であり、さらに石油の精製過程の変化により分解軽油が使用されるようになる可能性がある。燃焼を適切に制御するためには燃料の着火特性を把握することが求められる。燃料の組成、性状によって噴霧の着火特性は大きく異なることが知られており⁽¹⁾、上述のような燃料の多様化に対応するには、幅広い燃料について燃料の組成、性状の変化が着火特性に与える影響を明らかにする必要があるが、これらが体系的に研究された例は少なく、知見は不足している。

そこで、本研究では研究の第一段階としてまず n-alkane, iso-alkane の二成分燃料の着火性について検討した。定容燃焼装置を用いて、セタン価基準燃料および n-alkane と heptamethylnonane (HMN) の混合体積分率を広範囲に変化させた二成分燃料について、二種類の雰囲気条件において噴霧の着火遅れを計測した。さらに n-alkane の推定セタン価を計算することにより、混合燃料の着火性に対する n-alkane の寄与度が体積分率によってどのように変わるかを調査した。

2. 実験装置および方法

本研究で用いた定容燃焼装置は、希薄予混合気を燃焼させて得られる高温高压の模擬空気を雰囲気として燃料噴射を行う方式である⁽²⁾。装置は直径 80mm、奥行き 30mm の円筒形（容積約 150cm³）の燃焼室を持つ。目標の雰囲気温度・圧力が得られるように希薄予混合気の組成（C₂H₄, H₂, O₂ および N₂）と充填圧力を調整し、燃焼室内に導入する。これをスパークプラグで点火し、高温高压の雰囲気となったところで燃料を噴射する。噴射開始時の雰囲気条件は、雰囲気温度 T_1 を 900 K で一定とし、雰囲気圧力 p_1 を 4 MPa（着火遅れが短く拡散的燃焼が支配的となる条件）および 2 MPa（着火遅れが長く予混合的燃焼が支配的となる条件）とした。酸素モル分率 r_{O_2} は

^{*1} 京都大学（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）

^{*2} 正員、京都大学エネルギー科学研究科

E-mail: y.miyamoto@fx8.ecs.kyoto-u.ac.jp

21%で一定とした。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、単噴孔ノズルを用いて燃焼室上部から中心に向かって下向きに噴射を行った。噴孔径は 0.18 mm, 噴射圧は 120 MPa とした。燃焼室壁および燃料の温度は 45°C とした。燃料噴射量は、投入熱量が 871J で一定となるように燃料ごとに噴射指令期間を調節した。

圧電式圧力変換器 (KISTLER 6052A) により測定した燃焼室内の圧力経過から、熱発生率および着火遅れを求めた。着火遅れ τ は燃料噴射開始から熱発生率が急激に上昇するまでの期間とした。

実験に使用した燃料基材の性状を表 1 に示す。HMN を五種類の n-alkane のうち一種類と混合して二成分燃料を作成した。まずセタン価 30~60 のセタン価基準燃料 (n-cetane と HMN の混合燃料) について標準雰囲気条件 ($p_i=4$ MPa, $T_i=900$ K) における着火遅れを測定した。それ以外の燃料についてはセタン価基準燃料と着火遅れが一致するように体積百分率を決定した。その結果得られた n-alkane の体積百分率を表 2 に示す。このように定容燃焼装置を用いて着火遅れを一致させた方法は JIS のセタン価測定法 (JIS K 2280) と異なるので、上記の方法で得られた二成分燃料のセタン価を相当セタン価 CN_m と呼ぶ。

Table 1 Fuel components

| Fuel | n-heptane (n-C7) | n-octane (n-C8) | n-decane (n-C10) | n-dodecane (n-C12) | n-cetane (n-C16) | HMN (iso-C16) |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|
| Density (kg/m ³ @20°C) | 684 | 703 | 730 | 748 | 773 | 790 |
| Boiling point (°C) | 98.6 | 125.8 | 174.3 | 216.5 | 287 | 240 |
| Lower heat value (MJ/kg) | 44.6 | 44.4 | 44.2 | 44.6 | 44.4 | 44.3 |
| Kinematic viscosity (mm ² /s) | 0.51 ^{*1} | 0.645 ^{*2} | 1.001 ^{*2} | 1.46 ^{*3} | 3.07 ^{*1} | 3.14 ^{*1} |
| Cetane number | 56 ^{*4} | 65 ^{*4} | 76 ^{*4} | 80 ^{*4} | 100 | 15 |

^{*1}at 30°C, ^{*2}at 37.8°C, ^{*3}at 40°C, ^{*4}ref. (3)

Table 2 Volume percentages of n-alkane in test fuels

| CN_m | n-alkane (volume %) | | | | |
|--------|---------------------|------|-------|-------|-------|
| | n-C7 | n-C8 | n-C10 | n-C12 | n-C16 |
| 30 | 50 | 45 | 40 | 28 | 18 |
| 40 | 65 | 56 | 45 | 40 | 29 |
| 45 | 83 | 72 | 50 | 45 | 35 |
| 50 | – | 83 | 52 | 52 | 41 |
| 60 | – | – | 85 | 85 | 53 |

また本研究では、二成分燃料中における n-alkane の着火性を表す指標として推定セタン価 CN_e を式 (1) のように定義した。

$$CN_e = CN_{HMN} + 100(CN_m - CN_{HMN})/r \quad (1)$$

HMN のセタン価は $CN_{HMN}=15$ で既知であるから、表 2 のように求められた混合燃料の相当セタン価 CN_m および n-alkane の体積百分率 r より推定セタン価 CN_e を算出することができる。

3. 実験結果および考察

3・1 n-alkane の体積分率と着火遅れの関係

雰囲気圧力 $p_i = 4 \text{ MPa}$ の場合について、相当セタン価 30~60 の混合燃料の着火遅れ τ と n-alkane の体積分率 r の関係を図 1 に示す。図のプロットは 5 回の実験の平均値であり、最大値および最小値の範囲をエラーバーで示す。図より、n-alkane の種類によって τ に差が見られ、 r が等しい場合、炭素数の多い n-alkane を含む燃料ほど τ が短くなっている。また、 r に対する τ の傾きがある値を境に変化していることが分かる。 r がある値以上では τ の傾きは小さく、それ以下では τ の傾きは大きい。

着火遅れの傾きの変化の原因について考察するため、n-cetane 混合燃料の正味圧力上昇 $p_f - p_a$ の時間経過を図 2 に示す。噴射開始後しばらくの間は燃料の顕熱と気化熱により $p_f - p_a$ が低下している。n-cetane 88%~44% ($CN_m = 90 \sim 52$) の燃料では、 $p_f - p_a$ が低下のラインから離れる時期（熱発生の開始時期）に変化は無いが、n-cetane の体積分率が低くなるに従って熱発生開始から熱炎発生 ($p_f - p_a$ の急上昇) に至るまでの期間が長くなっている。一方、n-cetane 41%~26% ($CN_m = 50 \sim 37$) の燃料では、n-cetane の体積分率が低くなるに従って熱発生の開始から熱炎発生に至るまでの期間が長くなるとともに、熱発生の開始も遅くなる。図 1 において着火遅れの傾きが $r = 44\%$ ($CN_m = 52$) 付近で変化しているのは、このように着火に至るまでの発熱過程が異なることに対応している。n-cetane 以外の n-alkane を含む燃料についても同様の傾向が見られた。

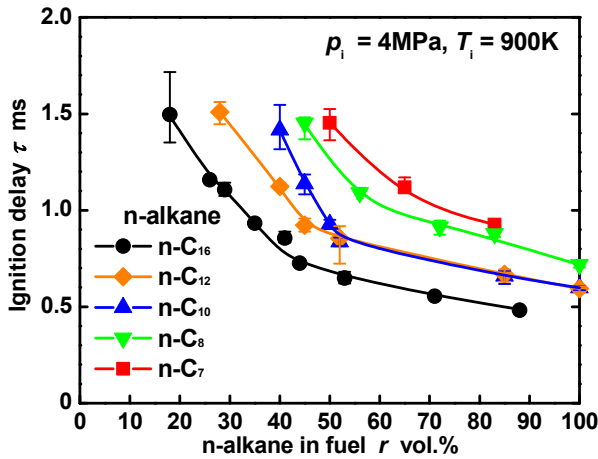


Fig.1 Ignition delay against volume percentages of n-alkane ($p_i = 4 \text{ MPa}$)

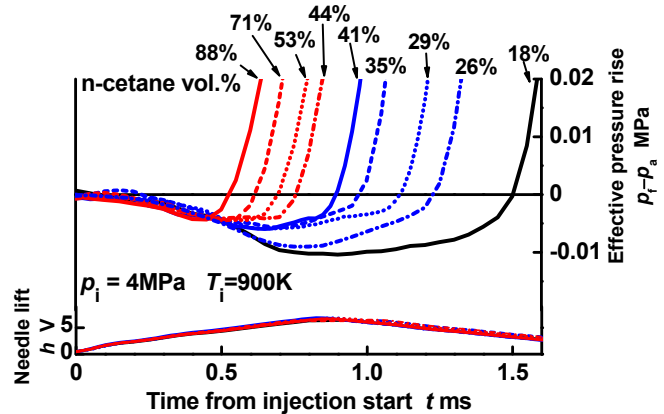


Fig.2 Effects of n-cetane volume percentages on effective pressure rise ($p_i = 4 \text{ MPa}$)

次に、標準雰囲気条件から圧力を下げて $p_i = 2 \text{ MPa}$ とした場合に、n-alkane の体積分率に対する着火遅れの関係がどのように変化するかを調べた。この場合の相当セタン価 30~60 の混合燃料の着火遅れ τ と n-alkane の体積分率 r の関係を図 3 に示す。 $p_i = 4 \text{ MPa}$ の場合と同様に、 r がある値以上では τ の傾きは小さく、それ以下では τ の傾きは大きいことがわかる。

図 4 に、n-cetane 混合燃料の正味圧力上昇 $p_f - p_a$ を示す。n-cetane 88%~44% ($CN_m = 90 \sim 52$) の燃料では、熱発生が開始して圧力が上昇に転じた後すみやかに熱炎発生に至っているが、n-cetane 41%~26% ($CN_m = 50 \sim 37$) の燃料では、n-alkane の体積分率が下がるに従って低温酸化によると見られる緩やかな正味圧力上昇の期間が長くなっている。図 3 を見ると $r = 44\%$ 付近で着火遅れの傾きが変化しており、このような着火に至るまでの発熱過程の違いが τ の傾きの違いに対応している。以上のような傾向は他の n-alkane についても見られた。

雰囲気圧力が低い場合に、噴霧が希薄化すると二段階の正味圧力上昇が現れる場合があることは、過去の研究からも確認されている⁽⁴⁾。低温酸化による正味圧力上昇の変化は噴射終了直後に見られるが、これは噴射終了とともに噴霧の希薄化が進むからであると考えられる。したがって噴射期間によって着火遅れが変化する可能性があり、噴射期間を変更した実験により確認が必要である。

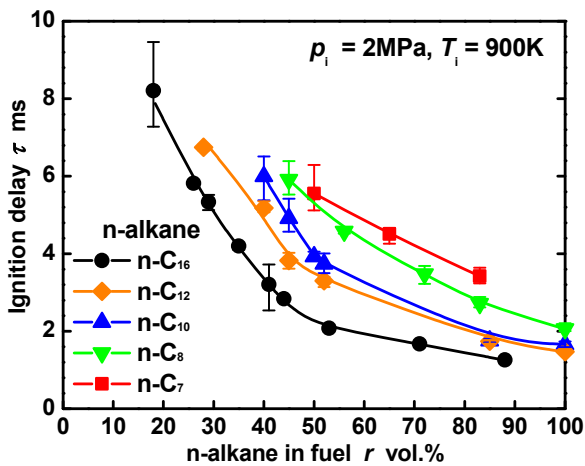


Fig.3 Ignition delay against volume percentages of n-alkane ($p_i = 2\text{MPa}$)

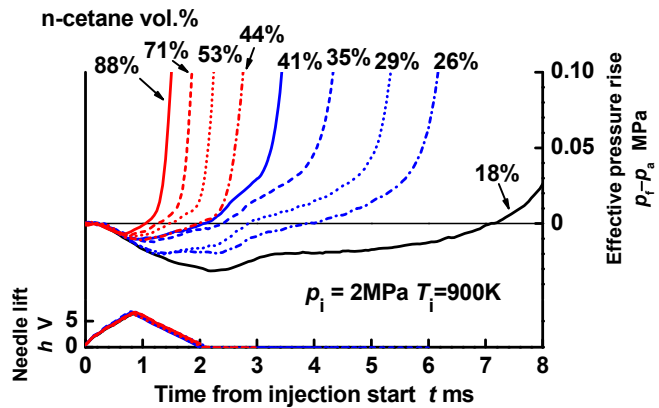


Fig.4 Effects of n-cetane volume percentages on effective pressure rise ($p_i = 2\text{MPa}$)

3・2 推定セタン価

雰囲気圧力 $p_i = 4\text{MPa}$ の場合について、表2に示した n-alkane の体積百分率 r に対する相当セタン価 CN_m を図5に示す。この結果から、式(1)を用いて推定セタン価 CN_e を求め、 r に対してプロットした結果を図6に示す。図5より、 r が高い領域では、 CN_m が r に対してほぼ線形に変化している。図6を見るとこの領域では CN_e はほぼ一定である。 r が低い領域では、 CN_e は r が低くなるに従って下がっていく。

次に $p_i = 2\text{MPa}$ の場合について考察する。 r に対する CN_m および CN_e を図7および図8に示す。セタン価基準燃料以外の燃料については、図3より着火遅れが同等となる基準燃料の r を読み取り CN_m を算出し、これより CN_e を求めた。図6と図8を比較すると、雰囲気圧力によって CN_e の r に対するふるまいは大きく異なることが分かる。 CN_e の r に対する変化は $p_i = 4\text{MPa}$ のときと比べて小さい。

n-alkane100%の燃料について CN_e の値を雰囲気条件ごとに表3にまとめた。n-heptane については実験点がないため外挿して求めた。表より、雰囲気圧力が低いほうがすべての燃料で CN_e の値は高くなっていることが分かる。また、表1に示した文献値⁽³⁾と比較すると、 CN_e の値は雰囲気圧力が低いほうがCFRエンジンによって求められたセタン価と近くなることが確認できる。

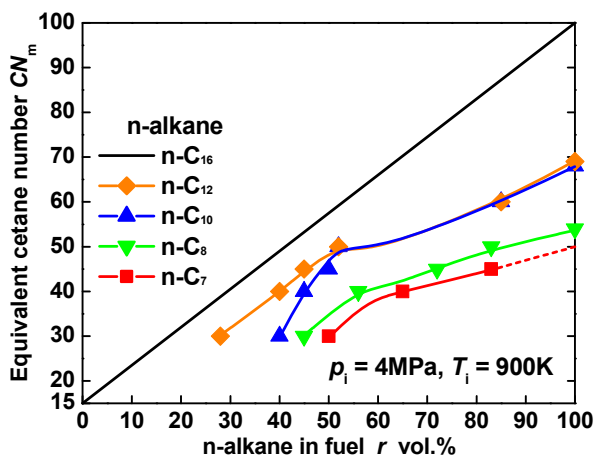


Fig.5 Equivalent cetane number of two-component fuel ($p_i = 4\text{MPa}$)

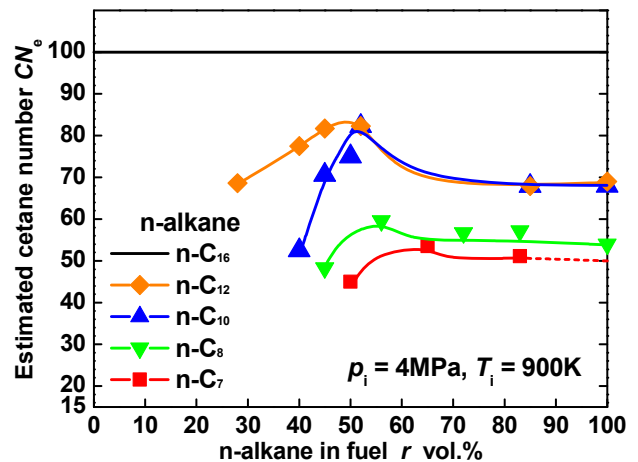


Fig.6 Estimated cetane number of n-alkane ($p_i = 4\text{MPa}$)

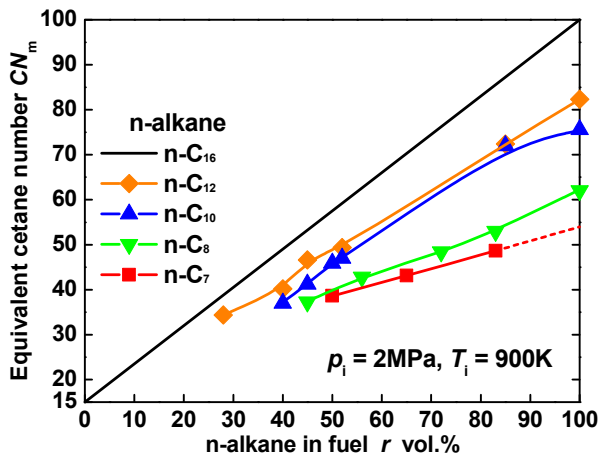


Fig.7 Equivalent cetane number of two-component fuel ($p_i = 2\text{MPa}$)

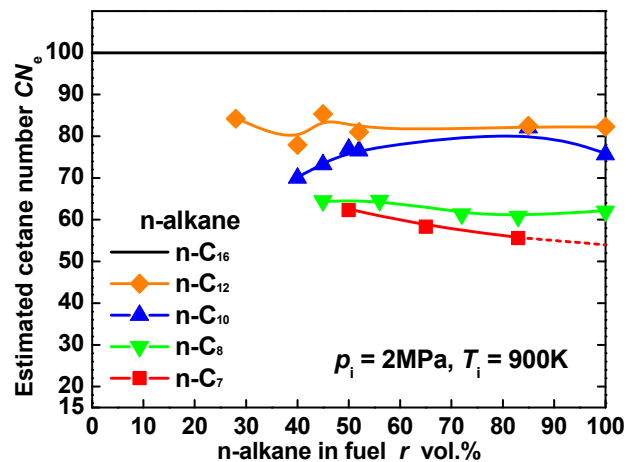


Fig.8 Estimated cetane number of n-alkane ($p_i = 2\text{MPa}$)

Table 3 Estimated cetane number of n-alkane derived from ignition delays of 100% n-alkane

| Ambient pressure | CN_e of n-alkane | | | | |
|------------------|--------------------|------|-------|-------|-------|
| | n-C7 | n-C8 | n-C10 | n-C12 | n-C16 |
| 4 MPa | 50 | 53.8 | 68 | 69 | 100 |
| 2 MPa | 54 | 62 | 75.6 | 82.3 | 100 |

4. おわりに

HMN と n-alkane (C₇ ~ C₁₂) から成る、様々な相当セタン価を持つ二成分燃料の着火遅れを二種類の雰囲気条件下で測定し、噴霧の着火遅れと n-alkane の混合分率の関係を調べ、推定セタン価を算出した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) いずれの雰囲気条件においても n-alkane の体積分率に対する着火遅れの傾きがある値を境に変化する。
- (2) 着火遅れの変化の前後で着火に至るまでの発熱過程に差が見られる。雰囲気圧力 2 MPa の場合、燃料の着火性がある程度以下になると、二段階の正味圧力上昇を経て着火に至る。
- (3) C₇ ~ C₁₂ の n-alkane について、混合燃料中における推定セタン価を求めた。
- (4) n-alkane の推定セタン価は、雰囲気条件によって体積分率に対するふるまいが異なる。雰囲気圧力 4 MPa の場合、推定セタン価は体積分率によって大きく変化するが、雰囲気圧力 2 MPa の場合、体積分率に対する変化は小さくなる。また、推定セタン価は雰囲気圧力が低い条件のほうが全体的に高くなる。

文 献

- (1) Siebers, D. L., "Ignition Delay Characteristics of Alternative Diesel Fuels: Implications on Cetane Number", *Transactions of the SAE*, Vol.94, Sec. 7, Paper No. 852102, (1985), pp. 673-686.
- (2) 井原禎貴, 塩路昌宏, 石山拓二, 勝浦章裕, "n-ヘプタン噴霧における着火遅れの温度依存性に及ぼす混合の影響", 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 69, No. 685, Paper No. 02-1452, (2003), pp. 2130-2137.
- (3) Murphy, M. J., Taylor, J. D. and McCormick, R. L., "Compendium of Experimental Cetane Number Data", NREL/SR-540-36805, (2004).
- (4) Ishiyama, T., Shioji, M., Ihara, T. and Katsuura, A., "Modeling and Experiments on Ignition of Fuel Sprays Considering the Interaction Between Fuel-Air Mixing and Chemical Reactions", *Transactions of the SAE (J.Engines)*, Vol. 112, Sec. 3, Paper No. 2003-01-1071, (2003), pp. 1459-1469.