

燃料設計手法による高効率・低エミッション燃焼法の提案研究*

(第2報：二成分混合燃料の着火特性)

和田好充*¹, 山口晃弘*¹
千田二郎*²

Proposal Study of High Efficiency and Low Emission Combustion Method based on Fuel Design Approach (2nd Report: Ignition Characteristics of Mixed Fuel)

Yoshimitsu WADA, Akihiro YAMAGUCHI, Jiro SENDA

Diesel engines are inherently high thermal efficiency. However, regardless of the ability to mitigate the greenhouse effect, the major challenge of NO_x and PM emission control to achieve future emission standards has not been complicated. Thus, the authors proposed a novel combustion control method by using the physical and chemical properties of mixed fuel. Although some potential exists in this approach because spray and combustion phenomena are initiated by fuel, few studies similar to this research have been conducted. Consequently, we have studied fundamental phenomena with regard to mixed fuel. In this paper, the ignition characteristics of mixed fuel were investigated through a constant volume vessel and analysis of results shows the physical and chemical effect of each component consisted in mixed fuel on ignition processes.

Key Words: Diesel Engine, Spray, Combustion, Fuel Design, Mixed Fuel

1. 結 論

地球温暖化への社会的対応から自動車部門においても燃料消費率の向上が求められている昨今、熱効率に優れるディーゼル機関の役割が見直されつつある。しかし、ディーゼル機関からの粒子状物質や窒素酸化物など大気汚染物質の排出状況は未だ厳しく、世界的に様々な対策が講じられ、国内においても今年度より新たに設けられる新長期規制や今後の検討が進められているポスト新長期規制を含めた厳格な排出ガス規制への迅速な対応が迫られている。

著者らはこれらの課題に取り組むべく、従来技術の発展ではない新たな噴霧燃焼過程の制御手法として、他物質への燃料の混合や燃料同士の混合により最適な燃料を開発する燃料設計手法を提案している。すなわち、本研究は低硫黄化や芳香族分の制御など従来の燃料改善研究とは異なり、燃料自体の物理・化学的特性を制御する技術を用いることでディーゼル機関における最適な噴霧燃焼過程の構築を図るものである。

例えば、直鎖系炭化水素において炭素数に対する着火性と蒸発性は相反する関係にあり、乗用車用ディー

ゼル機関には圧縮着火方式の制約から比較的炭素数の高い高自着火・高沸点燃料が常用されているが、この特性が本機関の燃焼形態にとって洗練されたものであるとは言い難い。ガソリン系成分のような高揮発性低炭素数成分を混合することで蒸発性、着火性の双方を兼ね備えた燃料とすることができる可能性もある。そこで、本報では二成分混合燃料の着火特性を把握すると共に、両成分が時間・空間的に及ぼす影響を調べることを目的とし、定容燃焼容器におけるディーゼル噴霧の着火実験を行った。

2. 最適燃料設計手法

本研究の提案する燃料設計手法を下に要約する。

- (1) 燃料の混合による燃料物性値の制御
異なる物性を有する成分の混合により、輸送物性値が双方の混合分率に応じて制御可能となる。
- (2) 気液二相領域の形成による蒸発性の改善および減圧沸騰噴霧の形成
沸点の異なる成分の混合により図1に概略的に示すように二相領域が形成される。これにより、高沸点成分の蒸発が改善されるとともに、減圧沸騰による微粒化と蒸気化の促進が期待できる。
- (3) 燃料の着火性と未燃成分の排出抑制

*¹同志社大学大学院 (〒6100321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3)

*²同志社大学工学部(同上)

(2)の場合、低沸点成分の混合が必須であるが、一般に炭素数の少ない低沸点成分は着火性が低い。ところが、着火性の良い高炭素数成分を混合することで着火制御が可能となることに加え、これによる未燃成分の燃え切り制御が実現できる。

(4) 低排気エミッション化

燃焼制御に関しては、上記の減圧沸騰噴霧による相対的希薄混合気化による低すす化が期待される。さらに、その混合気制御技術により新規低エミッション燃焼法である予混合圧縮自着火方式への展開も考えられる。

(5) 気体燃料の効率的液化

気体燃料を軽油や重油などと混合することで二相領域を形成し、気体燃料単一成分時の飽和蒸気圧に対して飽和液線が低圧側へ移行し、気体燃料の合理的液化が可能となる。

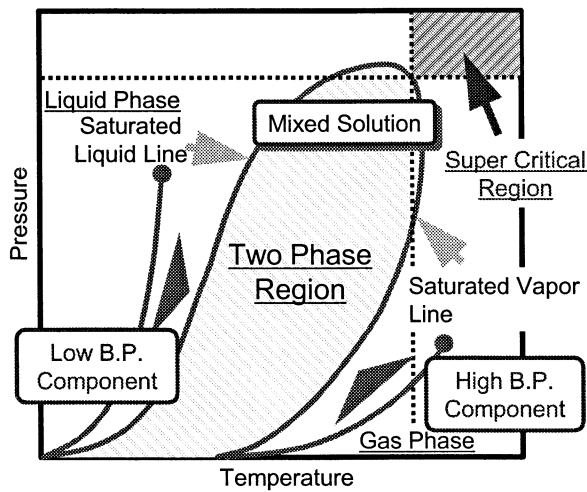


Fig.1 Schematics of pressure-temperature diagram of pure substance and mixed fuel

3. 実験装置および方法

後述の各種二成分混合燃料における着火特性を把握するため、本実験には定容燃焼容器を用いた。燃焼室は直径 70mm、厚み 26mm のパンケーキ型である。容器内には予め作成したアセチレン、酸素、窒素からなる希薄予混合気を充填し、火花点火により高温・高圧のディーゼル雰囲気場を模擬した。この際、燃焼室内圧力は燃焼室側壁に取り付けたピエゾ式圧力変換器(KISTLER, 6125B)により測定した。化学種からの自発光をもとに混合燃料噴霧における着火位置の計測を行う際の光学系を図 2 に示す。撮影装置にはイメージ

ンテンシファイア付 CCD カメラを用いた。なお、低温酸化反応の開始時においては CH ラジカル^①あるいはホルムアルデヒド^②からの発光が主体となることが知られており^③、計測には透過中心波長 429.9nm、半値幅 8nm の光学干渉フィルタを撮影装置の前方に配置した。また、熱炎反応開始時には OH ラジカルからの自発光を計測するため、透過中心波長 307.8nm、半値幅 10nm のフィルタを用いた。撮影時期は見かけの熱発生率が燃料噴射に伴う吸熱により負となり、その後正に戻る時期を低温酸化反応の開始、予混合的な燃焼による急峻な発熱が確認された時期を熱炎反応の開始と定義した。露光時間はそれぞれ 60 μ s、70 μ s である。

実験条件を表 1 に示す。雰囲気酸素濃度、密度をそれぞれ 21.0mol%、16.2kg/m³ とし、火花点火による予混合燃焼後の壁面への放熱から所定の雰囲気温度(800K)となる時期で燃料噴射を行った。噴射装置はコモンレール式燃料噴射装置(DENSO ECD-U2)であり、噴孔径 0.2mm の単噴孔ノズルを用い、噴射圧力と雰囲気圧力の差圧を 70MPa とした。噴射期間は全条件を通じて 3.3ms 一定とした。

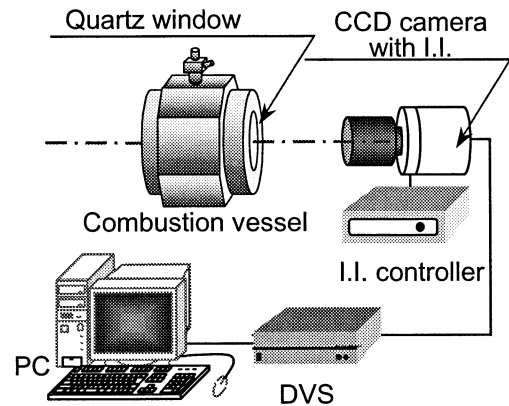


Fig.2 Schematic diagram of optical setup for imaging natural flame emissions

Table1 Test conditions through all experiments

| | |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| Ambient temperature at injection [K] | 800 |
| Ambient density [kg/m ³] | 16.2 |
| O ₂ concentration [%] | 21.0 |
| Injection period [ms] | 3.3 |
| Orifice pressure drop [MPa] | 70 |
| Injection equipment | Common-rail |
| Injection nozzle configuration | $d_n = 0.20$ [mm] $L_n/d_n = 4$ |

4. 供試燃料

各供試燃料の諸特性を表2に示す。本実験では混合燃料の着火特性に及ぼす(1)高着火性成分の影響、(2)低着火性成分の沸点の影響を調べるため、前者には低着火性成分としてiオクタン($i\text{-C}_8\text{H}_{18}$)を用い、それに高着火性成分として炭素数が7から16までの直鎖系炭化水素を混合した。また、後者では、高着火性成分をnトリデカン($n\text{-C}_{13}\text{H}_{28}$)とし、低着火性成分にはそれぞれ沸点の異なるヘプタメチルノナン($i\text{-C}_6\text{H}_{14}$)、iオクタン、iペンタン($i\text{-C}_5\text{H}_{12}$)を用いた。図3にこれら3種の混合燃料において低沸点成分の混合質量分率を0.69としたときのNIST Mixture Property Database⁹⁾により推算した圧力-温度線図を示す。nトリデカンに比べ揮発性の高い燃料を混合した場合、先述の気液二相領域が低温・高圧側に形成される。さらに、iオクタンとiペンタンのそれぞれを混合した場合を比較するとiペンタンが飽和気体曲線をより低沸点側へ引き寄せていることから、nトリデカンの蒸発特性を改善する結果となった。

Table2 Summary of fuel properties tested

| Fuel | Boiling Point [K] | Density [kg/m ³] | Octane number |
|-----------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|
| $i\text{-C}_5\text{H}_{12}$ * | 301 | 615 | 92 |
| $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$ * | 372 | 680 | 0 |
| $i\text{-C}_8\text{H}_{18}$ * | 372 | 688 | 100 |
| $n\text{-C}_{10}\text{H}_{22}$ * | 447 | 735 | 76 (Cetane num.) |
| $n\text{-C}_{13}\text{H}_{28}$ ** | 510 | 756 | 88 (Cetane num.) |
| $n\text{-C}_{16}\text{H}_{34}$ * | 560 | 770 | 100 (Cetane num.) |
| $i\text{-C}_{16}\text{H}_{34}$ ** | 520 | 793 | 15 (Cetane num.) |

* : 298K, 0.1MPa ** : 300K, 0.1MPa

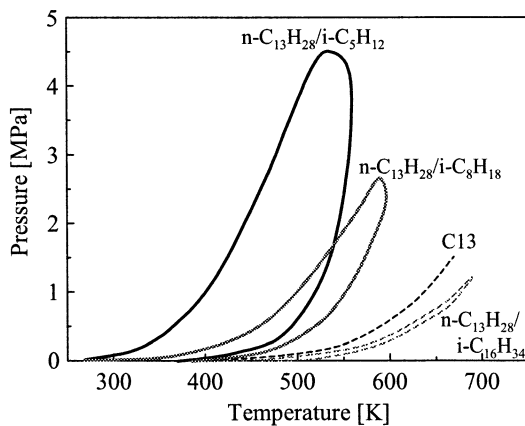


Fig.3 Pressure-temperature diagram of tested fuels

5. 実験結果および考察

5・1 混合燃料の着火に及ぼす混合割合の影響

nトリデカンとiオクタンの混合燃料(nトリデカンに混合するiオクタンの質量分率 $M_{iC8}=0, 0.38, 0.69, 1$)を用いた際の見かけの熱発生率を図4に示す。nトリデカン単体では1ms 足らずで急峻な予混合的燃焼が観測されたのに対し、iオクタンは13ms以降で緩やかな発熱が開始されており、これら二成分の着火性の差異は明確である。一方、混合燃料においては両混合割合とも着火が促進され、高着火性成分に大きく依存していることがわかる。ここで、図中の拡大図に示すように、混合割合が $M_{iC8}=0$ から0.69までの燃料では予混合的燃焼以前にやや弱い発熱が見られる。これは炭化水素系燃料に見られる低温酸化反応である⁴⁾が、iオクタンの混合割合が増すほどこの勾配は低下し、反応期間も長期化している。iオクタン単体にはこのような大きな発熱は観測されないことから、混合燃料における低温酸化反応の発熱は高着火性成分が主体となっている。また、近年の化学反応論的解析⁶⁾や希薄予混合気の圧縮着火燃焼法に関する実験⁶⁾からも、低温酸化反応の発現時期や発熱量が熱炎反応の発生に多大な影響を及ぼすこと、一旦熱炎反応に至ればその後の反応は分子構造によらないことが確認されている。このことをふまえると、二成分混合燃料の着火過程に

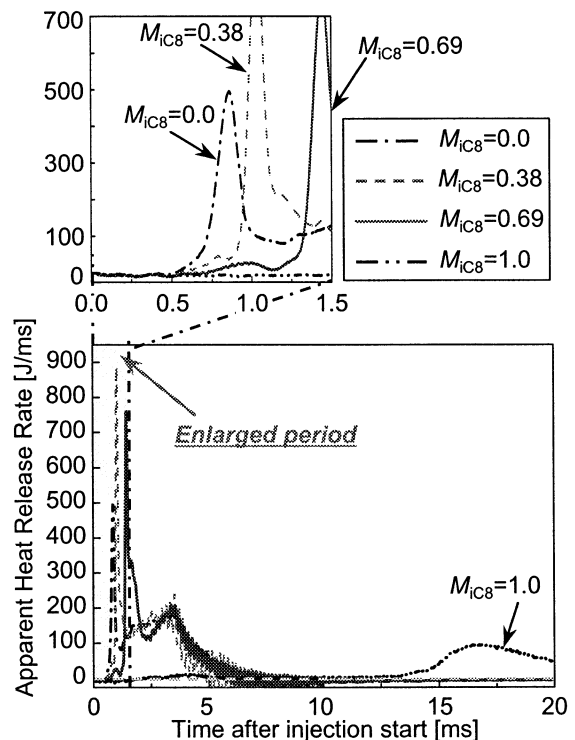


Fig.4 Apparent heat release rate of $n\text{-C}_{13}\text{H}_{28}/i\text{-C}_8\text{H}_{18}$ mixed fuels

においては高自着火性成分の低温酸化反応に起因する発熱あるいは活性化学種の生成による熱炎反応への移行促進が支配的であり、本実験条件下では厳密にはi-オクタンの混入がn-トリデカンの濃度を希釈する効果も見受けられるものの、低自着火性成分が支配的な混合割合であっても着火が十分に促進されることがわかる。

5・2 混合燃料に含まれる高自着火性成分の着火性の影響

前節の結果をふまえて、混合燃料中の高自着火性成分が着火に及ぼす影響を調べるため低自着火性成分をi-オクタンとして、その混合割合を $M_{iC8}=0.69$ 一定のまま高自着火性成分の組成を変更した。各単成分燃料および混合燃料の見かけの熱発生率およびそれらの低温酸化反応、熱炎反応の開始時期を図5(a), (b)に示す。ここで、低温酸化反応の開始時期は熱発生率が正に戻る噴射開始後の時間とし、熱炎反応については予混合燃焼時の発熱が 60J/ms を超えたときと定義した。両図とも横軸は高自着火性成分のセタン価で表記している。単成分燃料、混合燃料共、低温酸化反応および熱炎反応に至るまでの噴射開始からの期間はセタン価の低下に伴い長期化している。ここで、図5(b)の値から図5(a)の値を各反応開始時期について差し引いた。上図と同様に横軸をとった結果を図6に示す。i-オクタン

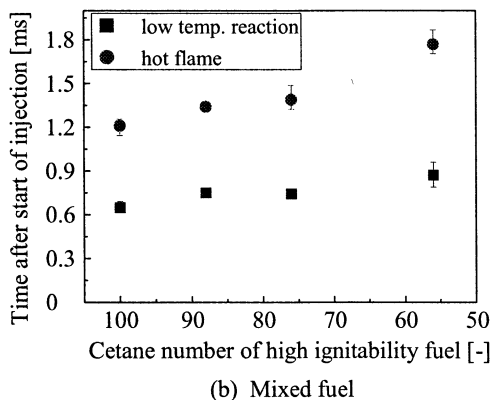
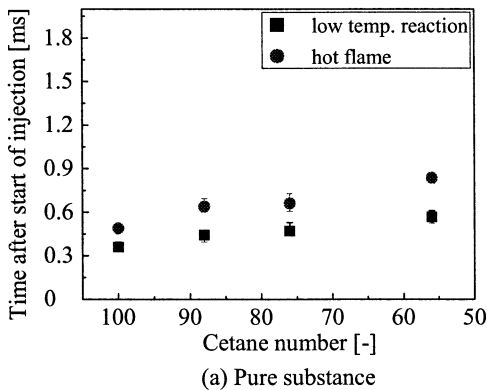


Fig.5 Time of onset of low temperature reaction and hot flame for each pure substance and mixed fuel

の混合により低温酸化反応の開始時期は 0.3ms ほど遅れているが、この結果は高自着火性成分の着火性によらず一定である。一方、熱炎では高自着火性成分のセタン価が100から76までは混合燃料と単成分燃料の反応開始時期の差はほぼ同じであるが、56の場合にはその差異は大きくなった。低自着火性成分の混合による低温酸化反応開始時期の遅延化は高自着火性成分の濃度希釈に伴う反応速度の低下が主要因であり、高自着火性成分の着火性によらない。ところが、既述したように低温酸化反応の発生から熱炎に至るまでの期間は低温酸化反応過程における発熱量あるいは活性化学種の生成量に依存するため、比較的着火性の低い燃料を高自着火性成分とした場合は他の成分に比して十分な発熱と化学種の生成量が得られず、その期間が長期化する結果となった。

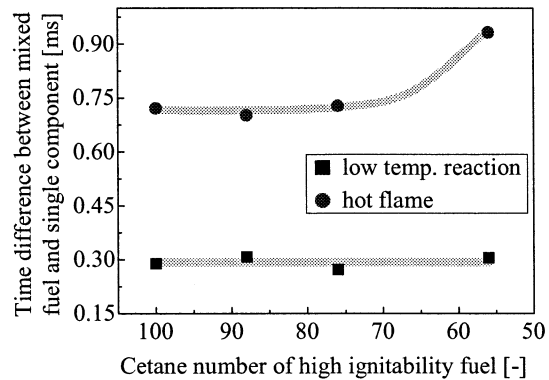


Fig.6 Comparison of time until start of each reaction between single component and mixed fuels

5・3 混合燃料に含まれる低自着火性成分の着火性および蒸発性の影響

本実験では混合燃料中に含まれる低自着火性成分の物理的・化学的特性が混合燃料噴霧の着火特性に及ぼす影響を調べることを目的とした。供試燃料は4章のとおりであり、低自着火性成分の混合質量分率を0.69一定とした。図7に各燃料の見かけの熱発生率を示し、前節の定義から求めた各燃料の低温酸化反応、熱炎反応の開始時期を図8に示す。

低自着火性成分を混合した燃料の低温酸化反応の開始時期はn-トリデカン単体に比べ若干の長期化傾向にあるが混合燃料間の差異はほとんどない。ここで、図9に低温酸化反応開始時の化学種自発光画像とそれと同時期の非燃焼条件下における噴霧画像を示す。噴霧画像はシャドウグラフ法により撮影しており、自発光画像とは別現象である。図にはシャドウグラフ画像から透過率5%以下とし求めた噴霧液相長さを併記して

いる。着火遅れ期間の長期化に起因して、混合燃料ではn-トリデカンと比べ自発光位置が下流側へ移行している。また、下式により輝度重心の軸方向距離を算出し

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot I_i}{\sum_{i=1}^n I_i}$$

G : 輝度重心, x_i : ノズル先端からスレッシュ値以上の輝度値を有するピクセルまでの距離, I_i : 輝度値, n : 輝度値を有するピクセル数

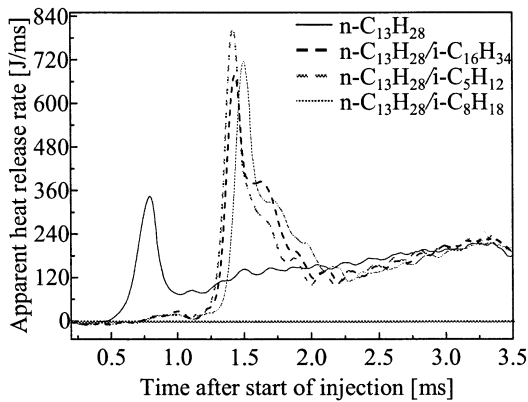


Fig.7 Apparent heat release rate of n-tridecane and mixed fuels

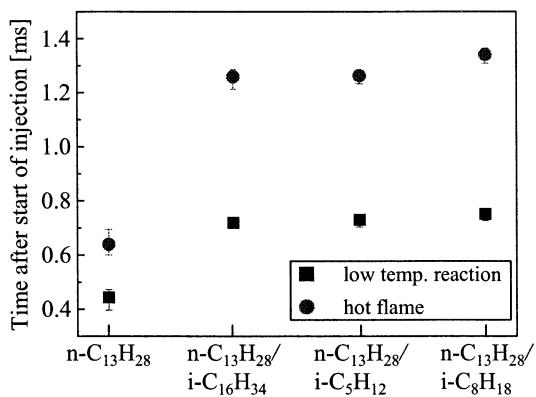


Fig.8 Time of onset of low temperature reaction and hot flame for each fuel

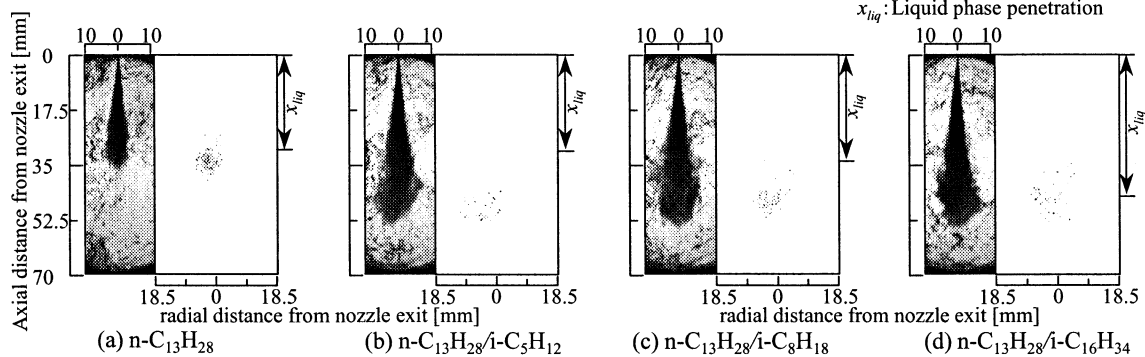


Fig.9 Natural flame emission images through 429.9nm bandpass filter and spray images taken by shadowgraph photography

この距離と液相長さをそれぞれ噴霧先端到達距離で無次元化することにより各燃料の着火位置と噴霧性状との関係を抽出した。算出結果を図 10 に示す。沸点が高いヘプタメチルノナンを低自着火性成分とした場合、n-トリデカン単体と同様に化学種の自発光位置は液相長さと同等の位置で重心を有する一方で、より沸点が低いi-オクタン、i-ペンタン両混合燃料の重心は液相から離れた下流に位置し、さらに噴霧先端に近づく。本研究ではこれ以前にLIF実験を行い、混合燃料噴霧の上流部では沸点の低い成分が多く存在し、それより下流では蒸発の遅い高沸点成分の蒸気が支配的であることを明らかにしている⁹⁾。このことから、低自着火性成分の沸点が高自着火性成分に比して低い場合、噴霧上流では高濃度の低自着火性成分により高自着火性成分が希釈されることで着火を妨げられ、高自着火性成分の濃度が高い下流部において反応が活発となった。

また、低温酸化反応時と同様、熱炎反応の開始時期についても低自着火性成分の組成による差は小さい。図 11 は熱炎反応開始時の化学種自発光画像と噴霧のシャドウグラフ画像である。これについても輝度重心を算出し、低温酸化反応開始時の輝度重心からの移動

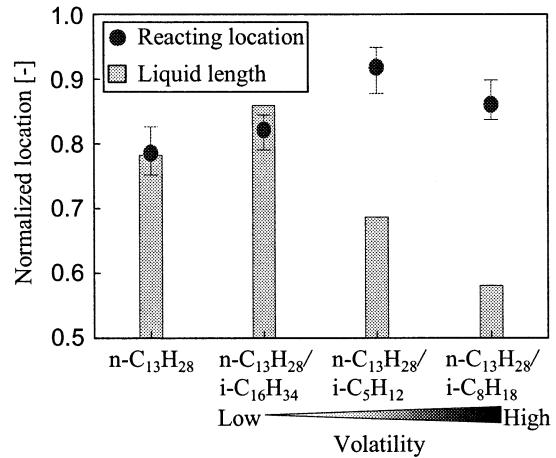


Fig.10 Reacting location and liquid phase penetration normalized by spray tip penetration for each fuel

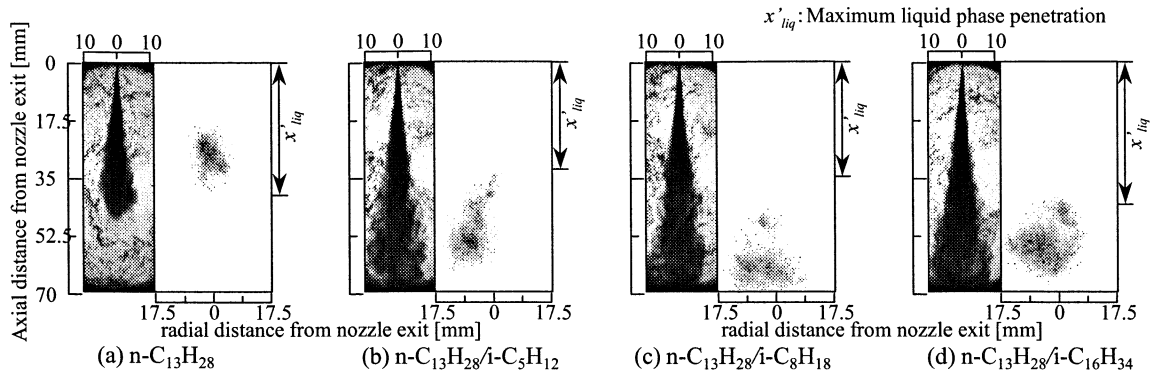


Fig.11 Natural flame emission images through 307.8nm bandpass filter and spray images taken by shadowgraph photography

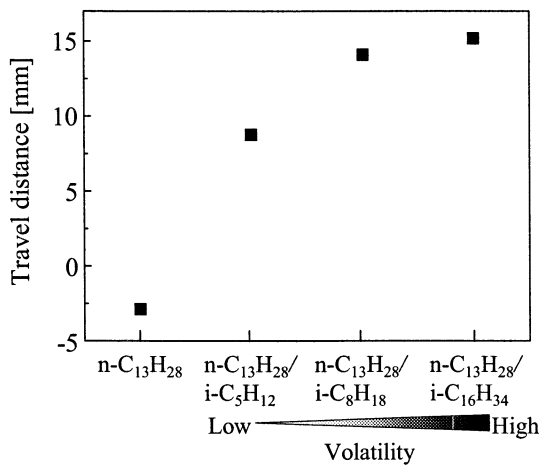


Fig.12 Travel distance of centroid of natural flame emission from low temperature reaction to hot flame

距離を求めた。結果を図 12 に示す。一方、混合燃料間の差異について、*i*-オクタンを混合した燃料は他の 2 燃料に比べ若干ではあるが熱炎発生が遅延化しているため壁面衝突した噴霧の拡散後に熱炎反応を生じるため絶対的な評価は行えないが、輝度重心の移動距離は *i*-ペンタンの混合燃料が最も小さい。4 章でも述べたように、*i*-ペンタンの混合は二相領域の形成による *n*-トリデカンの蒸発改善効果が最も大きい。そのため、低温酸化反応の発生位置より下流のこの領域では熱炎へと至るに十分な濃度が迅速に蓄積されたと推測される。また、*i*-オクタンの熱炎発生が他の二種混合燃料より遅れていることから類推すると、低自着火性成分の化学反応特性もその発生時期には影響を及ぼすが、ヘプタメチルノナンと *i*-ペンタンにおける反応性の差異は上記の物理的特性により相殺されたと考えられる。

5. まとめ

各種の二成分混合燃料を用いた着火実験の結果、以下の結言が得られた。

- (1) 二成分混合燃料の着火は高自着火性成分の低温酸化反応により開始される。
- (2) 高自着火性成分の低温酸化反応過程における反応量が十分に大きければ、低自着火性成分の混合割合が支配的な場合にもその着火特性は高自着火性成分単体に類似する。
- (3) 低自着火性成分の沸点が低い場合、その成分の早期な蒸発により噴霧上流で高自着火性成分が希釈され、低温酸化反応は噴霧下流で開始される。
- (4) 低沸点成分の混合に伴う二相領域の形成により高沸点成分の蒸発が促進されることから、低温酸化反応より下流で生じる高温酸化反応は低自着火性成分の沸点が低いほど上流で開始される。

謝辞

本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業「次世代ゼロエミッション・エネルギー変換システム」の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) A. G. Gaydon, "The Spectroscopy of Flames, 2nd Edition, Chapman and Hall, London, 1974.
- (2) J. E. Dec and C. Espey, "Chemiluminescence Imaging of Autoignition in a DI Diesel Engine", SAE Paper 982685, 1998.
- (3) J. F. Ely, et al., "NIST Thermophysical Properties of Hydrocarbon Mixture Database (SUPERTRAPP) User's Guide", 1992.
- (4) C. K. Westbrook and W. J. Pitz, "Chemical Kinetic Modeling of Combustion of Practical Hydrocarbon Fuels", SAE Paper 890990, 1989.
- (5) M. Ribaucour, et al., "Ignition of Isomers of Pentane: An Experimental and Kinetic Modeling Study", Proc. of the Combustion Institute, Vol.28, pp.1671-1678, 2000.
- (6) Gen Shibata, et al. "The Effect of Fuel Properties on Low and High Temperature Heat Release and Resulting Performance of an HCCI Engine", SAE Paper 2004-01-0553, 2004.
- (7) 鶴島理史, ほか 3 名, "筒内直接ガスサンプリングによる予混合気の圧縮着火過程に関する研究", 第 16 回内燃機関シンポジウム講演論文集, pp.133-138, 2000.
- (8) 川野大輔, ほか 8 名, "低エミッション・燃焼制御のための燃料設計コンセプト(第 2 報) - 混合燃料の噴霧特性に対する燃料組成の影響 -", 自動車技術会論文集, Vol.34, No.2, pp.27-32, 2003.