直鎖型炭化水素燃料に微量添加された芳香族炭化水素が点火遅れに及ぼす影響

日大生産工(院) 〇青木 滋 東京大学大学院 佐藤清太郎 日大生産工 今村 宰・山崎 博司 東京大学大学院 中谷 辰爾・津江 光洋

#### 1緒言

自動車社会における環境問題や化石燃料の 枯渇への不安といった問題から近年注目され ている新しいレシプロエンジンとして HCCI/PCCIエンジンがある.しかし, HCCI/PCCIエンジンは制御が難しい燃焼であ るため燃焼に関する基礎特性の把握と、それと 同時に多様化する燃料への燃焼への対応が緊 迫の課題であると言える.このような観点から 本研究では液体燃料の自発点火特性とそれに 及ぼす燃料種について基礎的な観点から検討 するものである.本研究では急速圧縮機を用い て燃焼器内中に正オクタンをはじめとする液 体燃料を噴霧し、その自発点火遅れ時間を計測 した.研究に際して、急速圧縮機の改良も行っ たので、その特性についても合わせて報告する. また燃料多様化の観点からは、本報では直鎖炭 化水素と芳香族炭化水素を混合した燃料を対 象に検討を行った. これらは当然, すでに広く 使われている燃料に多分に含まれているもの であるが,直鎖炭化水素と芳香族炭化水素の混 合燃料においては、セタン価のみだけでは自発 点火特性を 必ずしも評価できないという報 告(1)-(4)もあり、本報では急速圧縮機を用いてそ れらの混合割合が自発点火特性に及ぼす影響 について報告する.将来的にはバイオ燃料等に ついても同様の実験を行い,燃焼制御に必要な 基礎的な特性の把握を行う予定である

# 2 実験方法および実験方法

#### 2.1実験装置

Fig.1に実験装置概略図を示す.本研究で用いた急速圧縮機は,燃焼側のピストンに潤滑油が不要なことや,連続作動ではなく単発作動であるために残留ガスがない等,通常の連続点火機関に比べて燃焼に影響を及ぼす因子が少ないと考えられる.燃焼室の形状は

φ30mm×36mmの円柱状形状であり, 圧縮比は 14と16に設定した.シリンダヘッドには燃焼 室内圧力の測定のために圧電圧力センサ(PCB Piezotrinics製, HS102A04型)を設置した. 燃 焼室内への燃料噴射のために, ガソリン用直噴 インジェクターを設置し, 10MPaの窒素N2を 用いて燃料タンクへ背圧をかけ, 高圧噴射を行 う.噴射のタイミングと噴射時間の調整はパル スジェネレーターによって行った. Fig.2に燃 焼室形状を示す.



Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus



Fig.2 Combustion chamber

Effect of Small Amount of Aromatic Hydrocarbon on Ignition Delay Added to Normal Hydrocarbon Fuel

Shigeru Aoki, Seitaro Sato, Osamu Imamura, Hiroshi Yamasaki, Shinji Nakaya, Mitsuhiro Tsue 使用燃料の噴霧量については純燃料について 予め背圧と噴射時間との関係について調べて おき,背圧および噴射時間を調整することで噴 霧量,当量比を調整した.混合燃料においては 体積分率を乗じることで噴霧量を決定した. 実験においては予め貯気タンクに隔膜を介し て圧縮空気を充填しておき,電気信号によりソ レノイドに装着された針で隔膜となるフィル ム(キモト製ルミラー#75)を破断させることで, 急速圧縮機を始動する.急速圧縮機によって断 熱圧縮された空気中に,燃焼室ヘッドに取り付 けた直噴インジェクターから燃料を噴射し自 着火させることで,圧縮自着火の燃焼を模擬し た.

### 2.2実験条件

本研究では貯気タンクの圧力を0.35MPa, 圧 縮比を14, 16と設定し,燃焼室の初期圧力を 大気圧として圧縮比14の場合に限り燃焼室内 へ混合ガス(O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>それぞれ21%, 10%, 69%)を充填した.それぞれの空気圧縮の圧力 履歴をFigs.3,4に示す.噴射系においては窒素 を用いて燃料タンクの背圧を10MPaとして, すべての燃焼実験において当量比φ=0.5, イン ジェクターの噴射タイミングは14, 16の各圧 縮比の実験開始後 71ms, 91msに吹き終わる ように設定した. Table 1に空気圧縮による燃 焼室内の到達温度を示す.ポリトロープ指数は 約1.21であり理想的な断熱圧縮での到達温度 との間で点火していると考えられる.

## 2.3燃料

本研究で使用した燃料はn-octaneを基準とし、添加燃料としてo-xyleneおよびp-xyleneを体積分率で最大10%まで加えた.なおo-xyleneを添加した場合の一部のデータについては既報<sup>6</sup>にて報告している.各燃料の物性値をTable 2に示す.

本研究では、燃料指標としてセタン価を用い ることとする.ここでのセタン価の求め方は、 圧縮比可変の単気筒エンジンで一定の回転速 度を保つCFRエンジンを用いて求めるもので はなく、加成則を用いた推定セタン価(Derived Cetane Number: DCN)である.すなわち体積 による加重平均(加成則)によってセタン価を 推定しているが、加成則を用いて求めた推定セ タン価は実際のセタン価と近い値になると報 告されている.本報においてセタン価の値は、 noctane /p-xylene の混合燃焼で58.1から66 の間、n-octane /o-xylene の混合燃焼で60.2か ら66の間の値を取ることになる.



Fig.3 Pressure history of air compression (CR=14)



Fig.4 Pressure history of air compression (CR=16)

Table 1 Estimated temperature after compression

	n=1.21	к=1.4	κ=1.39(O <sub>2</sub> ,CO <sub>2</sub> ,N <sub>2</sub> :21%,10%,69%)
CR 14	514K	848K	826K
CR 16	528K	894K	870K

Table 2 Properties of n-octane, p-xylene and o-xylene

	n-octane	p-xylene	o-xylene
Structural formula	$\begin{array}{cccc} H_2 & H_2 & H_2 \\ H_3 C^{-C^-} C^{-C^-} C^{-C^-} C^{-C^+} C^{-H_3} \\ H_3 & H_2 & H_2 & H_2 \end{array}$	CH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>
Cetane number	66	-13	8.3

3. 結果および考察

n-octaneにp-xyleneを添加させて燃焼させた圧力履歴のグラフをFig.5に示す.n-octaneにp-xyleneを4%,10%添加させて燃焼させた

圧力履歴のグラフをFigs.6,7に示す. 圧縮比は 16であり,前述の閉塞率を調整することで上死 点後の圧力振動を極力抑えて実験を行ってい る. これらの実験においては、燃料の噴き終り を上死点後の91msとして設定している.上死 点前に燃料を拭き終わる試験も行ったが, 点火 遅れ時間が短く,燃料の差異における有意な差 を見積もることができなかったため,圧縮比16 の試験においては上死点後に燃料の噴き終わ りを設けた. 91ms以降において圧力の急激な 上昇が始まる時刻を点火した時刻として定義 することとする. なおFig.7はFig.6の上死点付 近を拡大して示したものである. この図からわ かるとおり, p-xylene 0%つまりn-octane 100%の圧力履歴より4%, 10% p-xyleneを添 加した場合の点火遅れが短くなっていること がわかる. それぞれの推定セタン価はp-xylene の添加量が4%の場合が62.84, 10%の場合が 58.1である. セタン価が減少しているにもかか わらず点火遅れ時間がn-octane100%の場合よ りも短くなっている.しかし, Fig.5のo-xylene の場合は10%芳香族燃料を添加すると n-cotane100%の場合よりも点火遅れが長くな ったにもかかわらず, p-xyleneの場合は10%芳 香族燃料を添加してもn-cotane100%の場合よ りも点火遅れが短い結果となった. これらの 結果は圧縮比などの条件が同様ではないため, 同列に比較することはできない.しかしながら, これらの現象が前述のように直鎖型炭化水素 燃料と芳香族炭化水素燃料の化学反応の干渉 によるものであるとすれば,低温酸化反応に着 目する必要があると思われる. Fig.6の o-xyleneの圧力履歴や圧力上昇率からは明確 な低温酸化反応は観察されない. そこで圧縮比 を14として, 模擬空気として通常空気に二酸化 炭素を加えた混合気 21%,10%,69%)を用いて点火試験を行った. この混合気体の導入は二酸化炭素を加えるこ とで燃焼温度の低減を狙い,低温酸化反応が顕 著に発生すると思われる圧力域,温度域を狙っ たものである.これらの値は本研究で用いた急 速圧縮機の特性を鑑みて設定した.燃料はFigs. 6および7にて示されたものと同様で, n-octane をベースの燃料としてp-xyleneを4%もしくは 10%添加させたものである.燃料の噴き終わり は上死点前の71msecに設定した. これらの結 果を示したものがFigs.8および9である. Figs. 6および7と同様に、これらの図は圧力履歴を示 しており, Fig. 9は上死点付近を拡大したもの となっている. Figs.8および9から, p-xylene を4%添加した場合が、熱炎と思われる圧力上

昇の開始は一番早く、次いでn-octaneのみの場合、p-xylene10%の場合となった.またこれらのケースにおいては、圧力上昇率で明確に定義できない場合も多々あり、自発点火しないケースも散見された.点火遅れ時間もFig.5に比べて総じて長いものであった.

以下,冷炎と思われる圧力上昇について議論 を行う. Fig. 9 において, 燃料の噴き終わりは 71msecであるが、特にp-xyleneを添加した場 合について、実験開始後80msec付近において 特有の圧力上昇が確認される.特に p-xylene4%の場合は、初期の圧力ピークが時 間的には遅い時刻に現れるにもかからわらず、 その圧力ピークの大きさは一番大きい. すなわ ち圧力ピークの大きさがこの図中においては 点火遅れの長短を決めていると推察できる. o-xyleneのケースについては、圧力振動が見受 けられれ明確な冷炎と思われる圧力ピークは 確認しずらいが,熱炎と思われる圧力ピークの 直前の圧力ピークは、およそ点火遅れの長短の 順番となっている. これから, 本報の範囲内で は熱炎の前の圧力ピークが点火遅れに影響を 及ぼしていると結論付けることができる.



Fig.5 Time histories of combustion chamber with several fuels



Fig.6 Pressure histories of n-octane and p-xylene mixture (CR=16)



Fig.7 Pressure histories of n-octane and p-xylene mixture (CR=16)



Fig.8 Pressure histories of n-octane and p-xylene mixture (CR=14)



Fig.9 Pressure histories of n-octane and p-xylene mixture (CR=14)

他方で冷炎と思われる部分の圧力ピークに ついてであるが, Fig. 9に示されるように圧力 ピークの時間が遅いほど, 圧力ピークの値が大 きいということが見て取れる. 詳細な解析は化 学反応モデルによる解析に委ねられるが,本報 の範囲内においては, 芳香族炭化水素は低温酸 化反応を時間的には遅らせ,抑制するものと予 測されるが,他方で一度低温酸化反応が始まる とその開始時期を遅らせた分,低温酸化反応で 生じる圧力上昇率を上昇させる働きがあり,そ れによって混合液体の点火遅れ時間に影響を 及ぼしているものと推察される.

## 4. まとめ

HCCI/PCCIの制御に向けて,直鎖炭化水素 と芳香族炭化水素との混合燃料を作成し,急速 圧縮機を用いて,自発点火の基礎特性の把握を 試みた.これらは将来的な燃焼多様化へ向けた 取組の一つでもある.

n-octaneにo-およびp-xyleneを2~10%添加 したところ,条件によっては,n-octane単体の 場合よりも点火遅れ時間が短くなり,これは加 成則で求めたセタン価と逆の傾向を示した.こ れらの傾向は直鎖型炭化水素の化学反応系と 芳香族炭化水素の反応系が干渉していること に起因しているものと推察される.またこの干 渉に際して,本研究の範囲内においては低温酸 化反応に対応すると思われる圧力ピークと熱 炎に対応すると思われる圧力上昇の開始時間 の間に相関がみられた.

参考文献

 (1) 堀部直人,石山祐二,染澤俊介,山本健大,
\*燃料の着火性とセタン価との相関に関する研究',J0801-2-3[No.09-1]日本機械学会2009 年 度年次大会講演論文集(7)(2009)

(2) Noel Bezaire, Kapila Wadumesthrige, K.Y.Simon Ng,Steven O. Salley, Limitations of the use of cetane index for alternative compression ignition, Fuel 89,

p. 3807-3813(2010)

(3) 安東弘光, 酒井康行, 桑原一成, 深野健太, アドリファイズ, "クロスリアクションを考慮 したPRF 混合燃料の着火機構解析", 自動車技 術会論文集, Vol.41, No. 6, 1341-1346, (2010-2011)

(4) Sakai, et. al, Proc. Combust. Instit, 32, 411(2009)

(5) 青木滋, 佐藤清太郎, 今村宰, 山﨑博司, 中谷辰爾, 津江光洋:急速圧縮機を用いた圧縮 自着火特性に及ぼす燃料組成の影響, 第22回日 本エネルギー学会講演要旨集5-1-1(2013)