

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月30日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010年度～2012年度

課題番号：22560197

研究課題名（和文） 希薄圧縮着火燃焼における能動制御指標の開発

研究課題名（英文） Development of Index for Active Control of Lean Compression Ignition Combustion

研究代表者

石山 拓二 (ISHIYAMA TAKUJI)

京都大学大学院エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：30203037

研究成果の概要（和文）：圧縮着火機関に予混合圧縮自着火燃焼の原理を適用し、過大な圧力上昇率を避けながら高効率で低環境負荷の運転を保障するため、燃焼制御の拠り所となる指標の開発を目指した。その結果、着火時点での燃料噴霧全体の平均燃料質量分率にもとづく簡便な着火性指標を提案した。この指標を用いると、様々な噴射条件と混合比の異なる二成分標準燃料を用いたときの、燃焼の急激さと燃焼中に生成される窒素酸化物の量を統一的に整理できる。

研究成果の概要（英文）：Development of an index has been attempted, which is useful for combustion control to ensure high thermal efficiencies with reducing environmental impact and avoiding excessively high pressure rise rate in the engines utilizing the principle of premixed compression ignition combustion. As a result, a simple index has been proposed, which is based on the overall fuel mass fraction in a spray at the ignition. This index enables the prediction of the harshness of combustion and the mass of nitrogen oxides for the various injection conditions and the composition of fuels.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱機関, 燃焼制御

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 予混合圧縮着火燃焼を利用する意義と問題点

窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) や、すすを主成分とする粒子状物質 (PM) などの環境影響物質排出を極小化し高熱効率をめざす将来の圧縮着火機関は、従来の混合律速燃焼方式に加え、低出力時に超低 NO<sub>x</sub>・PM を特徴とする予混合圧縮自着火 (PCCI) 燃焼方式の原理を利

用するのが有利と考えられている。これは、燃料の低硫黄化により PM・NO<sub>x</sub> 後処理技術の目処が立ったものの、排気温度が低い低出力時に触媒活性が望めないからである。PCCI 燃焼では濃度均一度の高い混合気を圧縮着火させるので、予め燃料と空気を混合しておくのが理想であるが、上記のように筒内直接燃料噴射を用いる混合律速燃焼と組み合わせるには、PCCI 燃焼も直接噴射により

実現する必要がある。

直接噴射では燃料と空気が混合して均一になるのに時間を要し、混合途中で必ず酸化反応の速い量論比付近の混合気が形成されるので、通常の燃料では早期に着火が起きて熱効率を確保できないうえ、NO<sub>x</sub>が多く生成される。従って、高圧噴射と小さいノズル噴孔、圧縮比の低下や排気再循環（EGR）による雰囲気中酸素濃度の低下を併用して着火時期を遅延させるのが燃焼制御の主流となっている。その際に、機関回転速度や出力に依りて、各種制御因子を精密かつ能動的に制御しなければ、高熱効率・低 NO<sub>x</sub>・PM の特徴は得られない。

## (2) 燃焼制御指標とその問題点

実機関を使った研究によると、「混合時間」（燃料噴射終了から着火（熱炎発生）時期までの期間）、が燃料・空気の混合度合を示す指標になり、これをある値以上に保てば低 NO<sub>x</sub>・PM となるとされている。最近主流となった電子制御噴射装置では、噴射終了時期は噴射終了信号の発令時期から求められる。筒内圧力を検出すれば着火時期が得られるので、「混合時間」が真に排出物質の指標であれば、これを利用して制御を行えば、常に低 NO<sub>x</sub>・PM を実現できる可能性がある。

しかし、申請者らの研究によると、噴射条件を変更すると、混合時間が同じでも NO<sub>x</sub> 生成量は著しく変化する。従って、燃焼制御の目標値とするには混合時間を修正する必要がある。さらに、PCCI 燃焼適用時に重大な障害となる急激燃焼を抑制する観点から、最大圧力上昇率（または最大熱発生率）との対応付けも必要となる。

## 2. 研究の目的

斯かる背景より、本研究では、直接噴射 PCCI 燃焼において超低 NO<sub>x</sub>・PM で穏やかな燃焼を可能とする能動的制御に資する混合進展度指標を提案する。そのために、幅広い噴射・雰囲気・燃料条件において計測を行い、その結果から新たな指標の確立を目指す。

新指標の考え方として、まず、前述の「混合時間」の問題点を鑑みて、「時間」に「混合速さ」を掛け合わせた意味を持たせる。「混合速さ」を如何なる物理量と考えるかは本研究の検討事項の一つであるが、平均濃度の時間変化、すなわち周囲空気のエントレイン速度が候補の一つに挙がる。之を求めるには運動量理論にもとづく理論式が一部利用できるが、PCCI 燃焼では噴射終了後に着火が起きる場合が多いため、噴射終了後も希薄化の程度を記述できるよう考慮する必要がある。また、濃度分散などの不均一性の実態と燃焼に対する影響については、高温高圧雰囲気中での実測例は見当たらないので、新たな実測を要する。申請者らが提唱する均質化速度は

微視的濃度不均一度の表現法として利用可能と考えるが、混合時間とどのように組み合わせれば有効な指標となるかは不明である。また、指標を汎用化するには、従来の実機関による狭い条件範囲でのデータでは不足で、より広い範囲で明確に設定された雰囲気条件、噴射条件、ならびに燃料の組成と NO<sub>x</sub>、PM（すす）、着火時期、圧力上昇率との関連付けデータベースを構築する必要がある。

## 3. 研究の方法

研究は、混合進展度の指標を作成するために必要な燃焼データの採取、噴霧によって作られる混合気中の燃料濃度に関するデータの採取、いくつかの混合進展度指標のテスト、ならびにこの指標を用いた燃焼制御の高度化に関する研究、の順に進めた。

(1) 定容燃焼装置を用いて、各種噴射・雰囲気条件のもとで、通常燃料を単純化した混合燃料（蒸発遅れの小さい低沸点炭化水素の混合燃料）を使って着火時期、圧力上昇率、熱発生率経過の計測を行うとともに、ダンピング法を用いて NO<sub>x</sub> の履歴を計測した。なお、火炎の直接写真、および透過光減衰法によるすすの計測も行ったが、本研究で設定した雰囲気条件ではほとんど検出できなかったので評価基準から取り除いた。

(2) 上記装置に可視化用観察窓を取り付け、高温・高圧不活性雰囲気中で透過式高速度シャドウグラフ法を用いた噴霧撮影を行った。また、四方向からの光学アクセスが可能な別の定容燃焼装置を用い、レーザ誘起蛍光法（LIF）により同様の雰囲気における混合気濃度の定量計測を行った。前者の結果を解析し、噴霧内平均燃料濃度の時間推移を得た。また、後者からは、局所的な混合気濃度不均一の情報を得た。

(3) ここまでの結果をもとに、従来の混合時間、混合気平均濃度および上記均質化速度各々による整理を行い結果を評価した。その結果から混合進展度指標として最も適するものを選んだ。

(4) 実機関への適用をより容易にするため、その場計測により定めるとしていた着火時期の予測法について検討した。そのために、高沸点と低沸点の炭化水素を混合した二成分燃料について、混合比ならびに炭化水素の種類を変化させた着火実験を行うとともに、これまで数値流体力学（CFD）計算の中で利用できるコードのなかった、炭素数 16 クラスの炭化水素を対象とした簡略酸化反応動力学計算コードの開発を試みた。

## 4. 研究成果

(1) 噴射条件、燃料組成と NO<sub>x</sub> 生成量および燃焼の急激さ

混合進展度の指標を作成するもとなるデータ

として、定容燃焼装置を用いて直接噴射方式 PCCI 燃焼を模擬した雰囲気条件下で、噴射圧力、噴孔径、雰囲気中酸素濃度、および燃料の着火性を変化させた燃焼実験を行い、圧力計測結果にもとづいて熱発生率を取得し、また、ダンピング法[1]により NO<sub>x</sub> 生成量の計測を行った。

実験に用いた定容燃焼装置は、希薄予混合気の燃焼により作成した高温高压模擬空気を雰囲気として燃料噴射を行う方式であり[2]、直径 80mm、奥行 30mm の燃焼室を持つ。燃料噴射開始時の雰囲気圧力 ( $p_i$ ) を 2MPa、熱力学的平均温度 ( $T_i$ ) を 900K に設定した。これにより、着火遅れが長く予混合的な燃焼が主体となる PCCI 燃焼の特徴が得られる。

噴霧が着火するまでの混合の進展度を様々に設定するため、燃料噴射の条件 (ノズル噴孔径、噴射圧力)、雰囲気酸素分率、ならびに燃料の着火性を変化させた。

用いた噴射系はコモンレール式電子制御燃料噴射装置 (DENSO ECD-U2P) であり、単噴孔ノズルを使用した。ノズル噴孔径 ( $d_n$ ) を 0.17~0.22mm の範囲とし、これを 60~160MPa の噴射圧力 ( $p_i$ ) と種々に組み合わせた。雰囲気中酸素モル分率 ( $r_{O_2}$ ) を 15~21% の範囲で変化させた。また、燃料は n ヘプタンと i オクタンの混合燃料で、i オクタンの体積割合を 0, 30, 60% とした。

図 1 は実験結果の一例で、計測した圧力経過から、燃焼室内平均温度  $T$  および熱発生率  $dQ/dt$  を求め、噴射弁リフト NL とともに示している。この例では、燃料を 100% n ヘプタン (F0) に固定しているが、酸素モル分率および噴射条件の変化に伴い、着火時期や熱発生率経過が大きく変化することが分かる。

図 2 に、図 1 のようなデータからまとめた NO<sub>x</sub> 生成量  $m_{NO}/Q_i$  (発生熱量当たり質量)、最大熱発生率  $dQ/dt_{max}/Q_{in}$  (燃焼の急激さ、投入熱量で除した値)、および着火遅れ  $t_h$  を示す。この図は、100% n ヘプタン (F0 : 左) およびそれに比べて着火性に劣る 60% i オクタン混合燃料 (F60 : 右) の結果を例として示している。NO<sub>x</sub> 生成量は、燃焼中の NO<sub>x</sub> 時間履歴を計測した結果から、その量がほぼ一定となる時期 (噴射開始から 30~35ms) の値を採用した。横軸は噴射条件としたが、右へ行くほど噴孔径が小さく噴射圧力が高くなり、燃料と空気の混合が速く進む。

二つの燃料の間には、着火遅れに大きな差がある。そのうえ、混合速度を高めた場合、あるいは酸素モル分率を低下させたときの最大熱発生率および NO<sub>x</sub> 生成量の動きが大きく異なる。

酸素モル分率を変化させると主に燃料の酸化反応速度が変化し、それにより着火時期が変わることにより、着火時点での混合気濃度が変化してその後の燃焼の急激さに違いが現れる。もちろん、燃焼の急激さには酸素モル分率そのものも影響する。一方、噴射条件は直接混合の進展に影響するが、その際、混合気濃度の変化に伴い、酸化反応速度が変わるので、それによって着火時期、および燃焼の急激さに

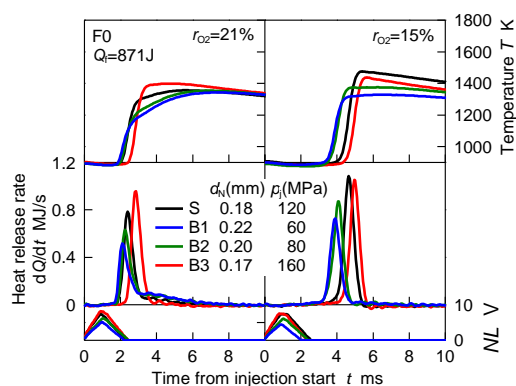


図 1 燃焼室内温度および熱発生率に対する酸素モル分率と噴射条件の影響

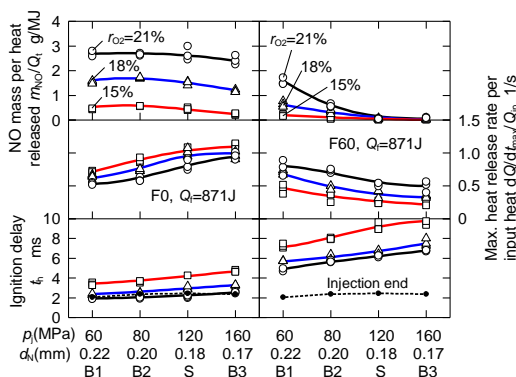


図 2 NO<sub>x</sub> 生成量、最大熱発生率および着火遅れに対する酸素モル分率、噴射条件ならびに燃料着火性の影響

影響が現れる。燃料の着火性を変化させた場合にも、同様に物理的な混合の過程と酸化反応の化学過程との両方が影響を受けて燃焼の急激さや NO<sub>x</sub> 生成量が決まる。従って、化学反応の速さを指標に織り込むことが望ましい。

しかしながら、多くのデータを俯瞰的に眺めると、混合の速さが NO<sub>x</sub> や燃焼の急激さに非常に強く影響しているのが見られるので、ここでは、混合の進展度に重点を置いた指標を考えることにする。

## (2) 燃料噴霧内燃料濃度の推移

混合の進展度合いを測るには、噴霧により形成された混合気中の燃料濃度の時間推移を明らかにしなければならない。

まず、噴霧全体の平均燃料濃度を計測するため、種々の噴孔径、噴射圧力の条件で、高温・高压不活性雰囲気中の噴霧の高速度シャドウグラフ写真を撮影した。得られた画像から噴霧の体積を求め、雰囲気が均一で混合が断続的に行われるなどの仮定を置いて、噴霧の平均燃料質量分率  $f_{av}$  を求めた。

代表的な二種類の噴射条件における結果を図 3 に示す。噴射初期には、周囲空気のエンタレインにより噴霧内混合気が急速に希

薄化するが、その後、燃料質量分率は緩やかに低下することが分かる。この結果は次節において混合進展度指標を検討する際に用いた。

次に、噴霧の局所的な濃度分布を知るため、レーザ誘起蛍光法 (LIF) による計測を行った。図4には、噴霧軸上の時間平均燃料質量分率  $f_{av}$  とその変動強度  $\sigma_f$  の計測例を示す。燃料質量分率はエントレインが進んだ噴霧先端へ行くほど低くなる。噴射開始からの時間  $t$  が経過し噴霧到達距離が延びるに従って、燃料質量分率の分布範囲が広がるが、変動強度の分布も先端近くを除いて同様の分布となる。また、噴射が終了した後は ( $t=4.5\text{ms}$ )、噴霧の根元ほど燃料質量分率が低い、噴射期間中とは逆の分布となる。これは、噴射が終了した後、燃料が供給されなくなっても周囲空気のエントレインが続くためであり、この特性を織り込んで混合進展度を表現する必要がある。

### (3) 混合進展度指標の検討

これまでの研究結果をもとに、混合の進展度を表す指標の作成を行った。指標の算出をできるだけ簡便に行うため、まずは、噴霧内の平均燃料質量分率をベースとした量を考えた。NOx の生成量や燃焼の急激さ (最大熱発生率) は、着火の時点で準備された混合気中の燃料濃度により定まると考え、これを指標と考えた。

平均燃料質量分率  $f_{av}$  は、噴射期間中は和栗らの運動量理論を[3]、噴射終了後は、Sangrusら[4]の実験結果から、噴霧先端速度が時刻の $3/4$ に比例するとの関係を用いて、次式より求めた。

$$f_{av} = \begin{cases} c_1 \cdot t_h^{-1/2}, & (t_h \leq \Delta t_j) \\ c_2 \cdot t_h^{-3/4}, & (t_h > \Delta t_j) \end{cases} \quad (1)$$

$$c_1 = a \frac{3}{4} \mu^{1/4} \left( \frac{\rho_F}{\rho_A} \right)^{1/4} \left( \frac{d_N}{u_F \tan \theta} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$c_2 = c_1 \cdot \Delta t_j^{1/4} \quad (3)$$

ここで、 $t_h$  は燃料噴射開始から測った着火時期、 $\Delta t_j$  は噴射期間、 $\mu$  は噴孔流量係数、 $\rho_F$  および  $\rho_A$  はそれぞれ燃料および周囲空気の密度、 $d_N$  は噴孔径、 $u_F$  はノズル出口燃料流速、 $\theta$  は噴霧の広がり角度である。 $a$  は噴霧半径方向の流速分布形状を反映した係数で、実験的に定める。前節図3で実測の  $f_{av}$  を得ているので、これにフィットするよう  $a$  を選んだ (図中の実線)。

この指標を検証する前に、これまで広く用いられてきた混合時間、および微視的混合速度を利用した新たな指標により、NOx 生成量の整理を試みた。混合時間による整理結果の例を図5に示す。この図では区別していない

が、プロットはそれぞれ異なる噴射の条件を意味する。図から明らかのように、同じ燃料においては、混合時間はNOx生成量と良好な相関を示す。しかし、燃料着火性の変化を伴うと、統一的な整理ができない。

次に、申請者らが提案している微視的混合速度  $\omega$  [5] を用いた指標を検討した。 $\omega$  は、単位時間内に起きる混合気塊の衝突回数の意味を持つので、これに混合気量を掛け合わせ、着火時期まで積分したものが延べの衝突回数、すなわち混合の進展度合いの意味となる。しかしながら、結果的にはこの指標により、混合時間による整理を改善することはできなかった。

そこで、前述の定義による平均燃料質量分率

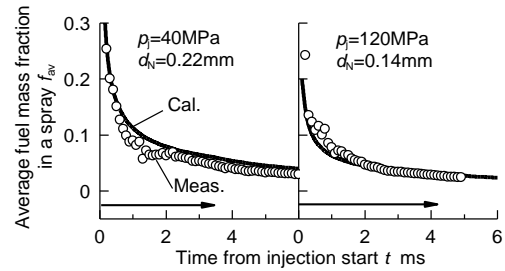


図3 高速度シャドウグラフ画像より求めた燃料噴霧の平均燃料質量分率

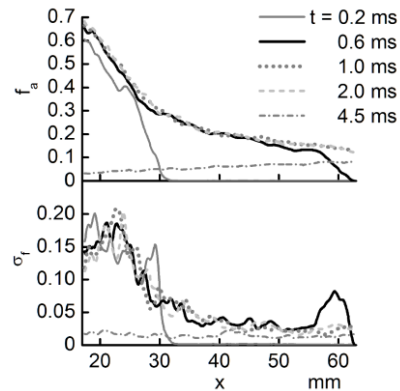


図4 LIF法により求めた燃料噴霧軸上の時間平均燃料質量分率と変動強度

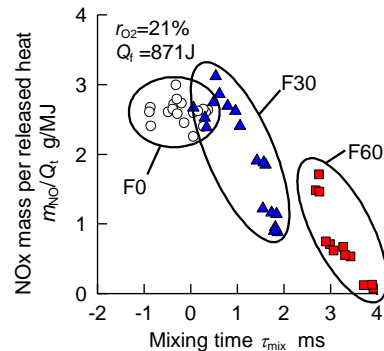


図5 混合時間によるNOx生成量の整理

$f_{av}$ を用いて整理を行った例を図6に示す。この図は、雰囲気酸素モル分率  $r_{O_2}=21$ 、15%におけるNOx生成量の整理を示す。ばらつきはなお見られるが、噴射条件および燃料の着火性の異なるデータを一つの曲線上に載せることができる。

酸素モル分率21%において、 $f_{av}$ が0.04より大きいとNOx生成量はほとんど変化しないが、噴孔を小さく噴射圧力を高めて混合を速めるか、着火性の低い燃料を用いて $f_{av}$ を小さくするとNOx生成量が低下する。 $f_{av}=0.04$ は、平均当量比( $\phi_{av}$ )約0.6に相当する。酸素モル分率を下げると、いずれの $f_{av}$ でもNOx生成量が減少するが、NOx生成量が減り始める $f_{av}$ は小さくなる。

図7には、同様の整理を燃焼の急激さ(最大熱発生率の投入熱量に対する比)に対して行った結果を示す。かなりばらつきの大きい結果となった。全体的には、どの酸素モル分率でも、 $f_{av}$ が約0.03で最大熱発生率が極大を示した。極大の位置は $\phi_{av}$ がほぼ0.45から0.6の範囲に相当し、酸素モル分率が低下するほど高くなる。このとき、極大の右側では混合律速燃焼が認められ、左側では予混合的燃焼が主体となる。また、最大熱発生率の最大値は、酸素モル分率によって大きくは変わらない。

このことから、まず、噴霧の希薄化によって最大熱発生率を減少させようとする、NO生成量が減り始める条件よりもさらに希薄化を進めなければならぬことが指摘できる。熱発生率は混合気濃度の均一度に強く影響され、混合が進み、混合気濃度の均一度が高まってから着火が起きると、高い熱発生率となる。一方で、希薄化がある程度進むと、混合気塊の当量比のわずかな違いでも着火時期に大きな差を生じるので、濃度均一度が高くて、発熱時期が分散して総括的な熱発生率が下がる。本実験の結果によると、相反するこれらの因子のバランスにより決まる限界の当量比が、NO生成量が減少し始める当量比よりも低くなったことになる。

以上のように、着火時期における噴霧内平均燃料質量分率がNOxならびに燃焼の急激さを整理できる指標となることが分かった。平均だけでなく、燃料濃度の不均一性を指標に含ませる必要性が当初予想されたが、平均量だけでもある程度の整理ができた。このことは、噴霧のエントレインの速さが、噴霧内の微視的な混合の速さに関係しており、濃度の不均一性の強さもある程度反映されていることによる。すなわち、噴霧はエントレインにより希薄化する(平均濃度が下がる)が、同時に、内部の濃度均一度が高まってゆくの、平均燃料濃度だけでも整理ができたと言える。ただし、図6および7から明らかなように、雰囲気酸素モル分率が異なるデータに対しては、これを一つの曲線上に載せることはできない。これは、指標中に、着火後の酸化反応の速さに関わる情報が含まれていないからである。

#### (4) 着火時期の予測に関する検討

実機関への適用をより容易にするため、その場計測により定めるとしていた着火時期の予測法について検討した。そのためには、

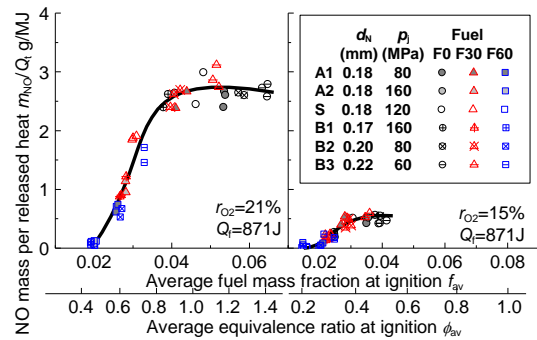


図6 混合進展度指標によるNOx生成量の整理

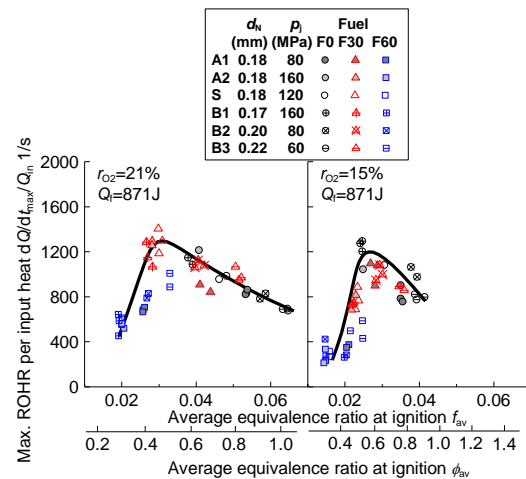


図7 混合進展度指標による燃焼の急激さ(最大熱発生率)の整理

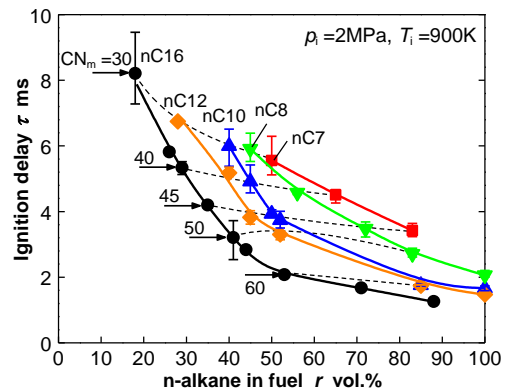


図8 nC7~nC12炭化水素とHMNとの二成分燃料の着火遅れ(基準燃料nC16+HMNとの比較)

燃料炭化水素の化学反応モデルの構築が必要となる。しかし、これまで検討に用いてきた模擬燃料は、実用燃料の主要な構成成分に比べて分子量の低い炭化水素を組み合わせられており、主要成分として、炭素数16程度までの炭化水素を含む燃料の着火実験データの取得と反応モデルの作成が必要となった。

図 8 に着火実験のデータの一例を示す。これは、炭素数 7 から 12 のノルマルアルカン をヘプタメチルノナン (HMN) と種々の割合で混合した燃料の着火遅れ計測値である。比較のため、ノルマルセタン (nC16) と HMN との混合燃料 (セタン価基準燃料) のデータを併記してある。雰囲気条件は前述の実験と同じで、PCCI 燃焼に相当する条件である。

破線は、通常のディーゼル (混合律速) 燃焼が見られる雰囲気条件 (4MPa, 900K) において定めたそれぞれの燃料のセタン価である。破線が傾いていることは、セタン価が等しい燃料でも、雰囲気条件によっては同等の着火遅れを示さないことを意味している。この結果のほかに、噴射条件、雰囲気条件を様々に変化させたデータを取得した。

このようにして得られたデータに対して、計算機負荷が過剰にならないような炭素数 16 までの炭化水素の酸化反応モデルを構築した (59 化学種, 96 反応式)。これを、3 次元 CFD 計算と組み合わせて、燃料噴霧の着火過程を計算し、実験データの傾向を再現できることを確認した。ただし、雰囲気条件の変化に対して、実測との乖離が大きい場合もあり、今後、反応式構成や速度式についてさらに検討を進める必要がある。

#### 参考文献 (4 章)

- [1] 石山・ほか 3 名, 日本機械学会論文集 B 編, 62 巻 598 号, 1996, pp.2521-2527.
- [2] 井原・ほか 3 名, 日本機械学会論文集 B 編, 69 巻 685 号, 2003, pp.2130-2137.
- [3] 和栗・ほか 3 名, 日本機械学会論文集第 2 部, 25 巻 156 号, 1959, pp.820-826.
- [4] Sangrus,R., et al., Trans. ASME, J. Heat Transfer, Vol.124, 2002, pp.460-469.
- [5] Ishiyama,T., et al., Int. J. Engine Research, Vol.4, No.3, 2003, pp.155-162.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① 姜 正鎬, 石山拓二, 天然ガス PCCI 機関における圧縮比および過給圧力が運転範囲に与える影響, 日本機械学会論文集 B 編, 査読あり, 79 巻 797 号, 2013, 82-92
- ② H.Kojima, H.Kawanabe, T.Ishiyama, LES Analysis of Mixture Formation and Combustion Processes in a Diesel Spray, SAE International Journal of Engines - Electronic Version (January 2012), 査読あり, 2012  
DOI: 10.4271/2011-01-1849

- ③ 石山拓二, 堀部直人, 染澤俊介, 大島 智, 直接噴射 PCCI 燃焼における混合の進展と NOx 生成量ならびに最大熱発生率との関係に関する基礎研究, 日本機械学会論文集 B 編, 査読あり, 76 巻 769 号, 2010, 1441-1448

- ④ 堀部直人, 石山拓二, ディーゼル PCCI 燃焼における噴射条件の選択に関する研究: 確率過程論燃焼モデルによる検討, 日本機械学会論文集 B 編, 査読あり, 76 巻 764 号, 2010, 699-706

[学会発表] (計 8 件)

- ① 宮本祐輔, 狸塚雄司, 堀部直人, 石山拓二, 二成分燃料噴霧における燃料組成と着火遅れの雰囲気条件依存性との関係, 日本機械学会関西支部第 88 期定時総会講演会, 2013 年 3 月 17 日, 大阪工業大学
- ② H.Kawanabe, T.Ishiyama, A Study on a Reduced kinetic Model for n-cetane and heptamethylnonane Based on a PRF Reduced Kinetic Model, SAE2012 International Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting, 2012 年 9 月 18 日, Comfort Hotel Malmo, Sweden
- ③ 小島宏一, 田中 翔, 水田 恒, 川那辺洋, 石山拓二, 燃料の蒸発性がディーゼル噴霧内における混合気形成に及ぼす影響, 第 22 回内燃機関シンポジウム, 2011 年 11 月 29 日, 東京工業大学
- ④ 妹尾隆志, 川那辺洋, 塩路昌宏, 非定常メタン噴流における混合気形成過程の LES 解析, 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会, 2011 年 3 月 20 日, 京都工芸繊維大学

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

石山 拓二 (ISHIYAMA TAKUJI)  
京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授  
研究者番号: 30203037

##### (2) 研究分担者

塩路 昌宏 (SHIOJI MASAHIRO)  
京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授  
研究者番号: 80135524  
川那辺 洋 (KAWANABE HIROSHI)  
京都大学・大学院エネルギー科学研究科・准教授  
研究者番号: 60273471