

# 各種混合燃料を用いた着火制御法の評価

和田好充<sup>\*1</sup>, 沖本和樹<sup>\*1</sup>  
千田二郎<sup>\*2</sup>

## Assessment of Ignition Control Method with Various types of fuel

Yoshimitu WADA Kazuki OKIMOTO  
Jiro SENDA

Homogeneous Charge Compression Ignition, HCCI combustion method, is well known to have an advantage to reduce PM and NO<sub>x</sub> emissions. However present HCCI involves the problem of controlling the ignition timing over a wide load and speed range. To control ignition timing of HCCI is a critical issue in the future. Then, HCCI has been studied in various ways such as modeling and engine testing. Recently many researchers believe that HCCI is mainly dominated by chemical kinetics and its auto-ignition is dependent on fuel characteristics.

In this paper, we propose the new concept of multi-stage combustion to control the ignition timing and the rate of combustion. The experiment conducted in this paper was very fundamental, that is, the characteristics of ignition and burning of spray injected into the combustion chamber of rapid compression and expansion machine whose atmosphere was the lean premixed mixture composed of n-butane, oxygen, nitrogen and argon. As a result, ignition timing of the fuel is injected into the atmosphere of lean premixed mixture where the low temperature oxidation reaction is advancing.

*Key Words:* Diesel Engine, Multiple Injection, Ignition control, oxidation reaction

### 1. 緒 論

本研究では、低エミッション化への期待が高い反面、未解決な問題点も多い<sup>1)</sup>直接燃料噴射を用いた予混合圧縮着火(HCCI)燃焼方式について、各種混合燃料を用い、燃焼制御という観点からその可能性を検討している。本方式は圧縮行程の比較的早期に燃料噴射を行うため、本質的には希薄均一予混合気の燃焼であり化学反応律速となる。ところが、実際には燃焼室内へ直接噴射された燃料濃度は不均一に分布し、それが着火・燃焼特性ひいてはエミッションに大きな影響を及ぼすことが知られている<sup>2)</sup>。

したがって、本研究では HCCI 燃焼方式の諸問題に対し、能動的な混合気濃度分布および燃料の着火特性を用いて以下の改善策を提案している。

- (1) 低負荷、高速運転時における失火  
→高自着火性成分による着火・燃焼の促進

- (2) 着火時期・燃焼速度の制御  
→混合気濃度分布の制御
- (3) 高負荷域への適用  
→混合気濃度分布の制御  
→ディーゼル燃焼とのデュアルモードの実現

以上のことから、本報告では HCCI 燃焼方式における着火制御法に着目し、燃料の化学反応特性に混合気濃度分布を加味した多段燃焼噴射による燃焼制御法に関し考察を行った。

### 2. 着火制御法の検討

図1に本研究で検討する着火制御法の概念図および燃料噴射と燃焼時期のタイミングチャートを示す。

本手法では1段目に噴出された燃料を希薄均一化し、2段目燃料噴射による比較的高い当量比の混合気を着火源とする。

#### 2・1 燃料の着火性

図に示すように、燃料には供試機関の圧縮端における温度、圧力、酸素濃度などの雰囲気条件を考慮して、1段目噴射のみでは十分な発熱が生じない、あるいは

\*原稿受付 2005年6月20日。

<sup>\*1</sup>同志社大学大学院 (〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷1-3)。

<sup>\*2</sup>同志社大学工学部。

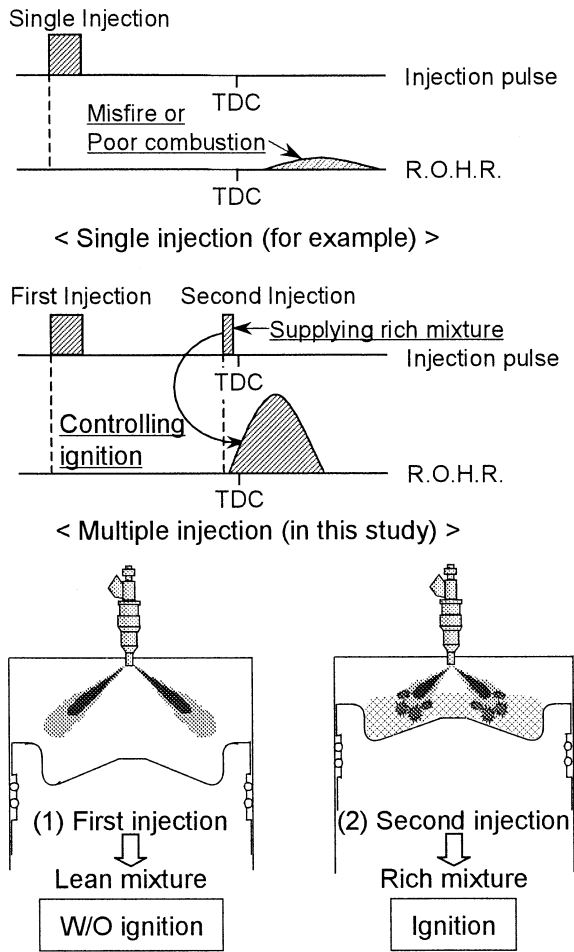


Fig.1 Schematic diagram of multiple injection stratified combustion system

上死点を迎える以前に熱炎が生じない難着火性が必要となる。しかしその反面、2段目に噴射された燃料が着火源となるための着火性も要求される。このため、各段における混合気濃度分布と燃料の着火性の関係を明らかにする必要がある。

### 2・2 1段目燃料噴射

1段目燃料噴射は希薄予混合気の形成を目的とし圧縮行程の早期に行う。また、全噴射量の大半が1段目噴射により供給されるため、運転負荷の増大、すなわち当量比の増加に対しても1段目に噴出された燃料が2・1節の条件を満足する必要がある。

### 2・3 2段目燃料噴射

2段目燃料噴射では着火を支配し得る高当量比領域の形成が必要であり、過度の拡散を抑制するため噴射時期は上死点近傍とする。ただし、高当量比での燃焼はすずや $\text{NO}_x$ などの物質を生成する可能性があり、2段目噴射ではいかに少ない噴射量により着火に至らし

めるかが必要となる。

また、このアプローチでは着火制御の他、以下の効果も期待される。

- (1) 2段目燃料噴射による失火の回避
- (2) 多段燃料噴射による混合気の成層化とそれに基づく燃焼速度の制御

### 2・4 燃料の自己着火過程

ここで、本制御法成立の付加的要素として、燃料の酸化反応過程が挙げられる。着火特性は低温酸化反応機構によって支配されており<sup>6,7</sup>、ディーゼル噴霧の自着火過程ではこの低温酸化反応が熱炎の発生時期を決定していると考えられる。ここで、同様のことは予混合圧縮自着火の着火でも報告されており<sup>6,9</sup>、本制御手法においても有効と推測される。

以上の点をふまえ、本稿では2段目燃料噴射による着火制御に関する実験的考察を行った。特に1段目に噴射された燃料の化学反応を模擬した雰囲気における化学活性種の有無あるいはその濃度が直接噴射された燃料噴霧の着火に及ぼす影響を調べた。

## 3. 実験装置および実験条件

### 3・1 実験装置

本実験では単発の急速な圧縮・膨張行程が行える急速圧縮膨張装置(RCEM)を用いた。RCEMのボア×ストロークは $\phi 100\text{mm} \times 450\text{mm}$ 、燃焼室形状はパンケーキ型である。筒内圧力はシリンダヘッド側面に埋設されたピエゾ式圧力センサ(KISTLER, 601A)により検出され、増幅器を介した後、PCに取り込まれる。また、クランク軸にはロータリエンコーダが取り付けられ、その出力をF-Vコンバータに入力することでクランク角度の情報を時間に変換している。シリンダヘッド壁面温度はパイプヒータと水温制御装置で一定温度に調整した温水をウォータージャケットに流すことにより $80^\circ\text{C}$ に保った。

本実験では予混合気および直接噴射された燃料の化学自発光計測を行った。後述する低温酸化反応の開始時期を求めるには光学干渉フィルタ(中心波長 $429.9\text{nm}$ 、半値幅 $8\text{nm}$ )を取り付けた光電子増倍管を用いた。

### 3・2 実験条件

表1に実験条件を示す。なお、本実験では2章で述べた1段目噴射による化学活性種の存在を模擬するため、予混合気にn-ブタン( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )を混合した。予混合気の成分気体にはn-ブタンの他、 $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{Ar}$ を用い、混合容器内で防爆型モータの先端に取り付けられたプロペラにより完全に混合した。比熱比および当量比は導

Table1 Experimental conditions

Case	$\phi_{amb}$ [-]	$K$ [-]	$\varepsilon$ [-]	$\phi_{O_2}$ [mol%]	$t_{inj}$ [deg.]	$T_{inj}$ [K]	$\rho_{inj}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$X_{O_2}$ [mol/m <sup>3</sup> ]	
A	0	1.45	11	21.0	-	-	-	-	
B	0.08				-	-	-	-	-
C	0.1				-	-	-	-	-
D	0.12				-	-	-	-	-
E	0				-26	649	9.1	58.8	-
F	0.08				-	-	-	-	-
G	0.10				-	-	-	-	-
H	0.12				-	-	-	-	-

入分圧から算出し、任意の雰囲気条件となるよう設定した。ここで、 $\phi_{amb}$ は直接噴射した燃料を含まない雰囲気中に含まれる n-ブタンをのみ当量比、 $K$ は比熱比、 $\phi_{O_2}$ は酸素モル分率を表し、 $\varepsilon$ は圧縮比、 $t_{inj}$ は燃料噴射開始時期、 $T_{inj}$ 、 $\rho_{inj}$ 、 $X_{O_2}$ はそれぞれ燃料噴射開始時期における筒内温度、密度、酸素密度である。

基準条件として燃料噴射がなく雰囲気に n-ブタンを含まない条件 A、n-ブタンを含みその当量比が  $\phi_{amb}=0.08$ 、 $\phi_{amb}=0.1$ 、 $\phi_{amb}=0.12$  の条件をそれぞれ条件 B、C、D とした。供給された n-ブタンの熱量はそれぞれ 1074J、1342J、1609J である。

図 2 に条件 A から D の筒内温度ならびに条件 B から D の熱発生率履歴と化学種の自発光強度を示す。図 2 から n-ブタンの低温酸化反応は当量比によらず 25deg BTDC 付近において確認でき、高温酸化反応は当量比の増加により次第に早期化していることがわかる。

そこで、これら雰囲気の酸化反応が直接噴射された燃料の着火および燃焼特性に及ぼす影響について調べることにした。この際、条件 A から D と同じ雰囲気条件であり、それに燃料噴射を行った場合を条件 E から H とした。なお、燃料噴射は全ての燃料において低温酸化が開始される 26deg BTDC にて噴射圧力 60MPa、噴射量 10mg で行った。

### 3.3 供試燃料

1 段目燃料噴射は雰囲気への n-ブタンの添加により模擬し、中間生成物の濃度はその当量比を変更することで変化させた。一方、直接燃料噴射は着火特性が大幅に異なり、物理的特性の差が小さい i-オクタン(C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>、沸点 372K、オクタン価 100)と n-ヘプタン(C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>、沸点 372K、オクタン価 0)およびそれらを体積分率 3 対 7 で混合した燃料(オクタン価 70、以下 PRF70)を用いた。なお、噴射された燃料の熱量は燃料によらずほぼ 458J である。

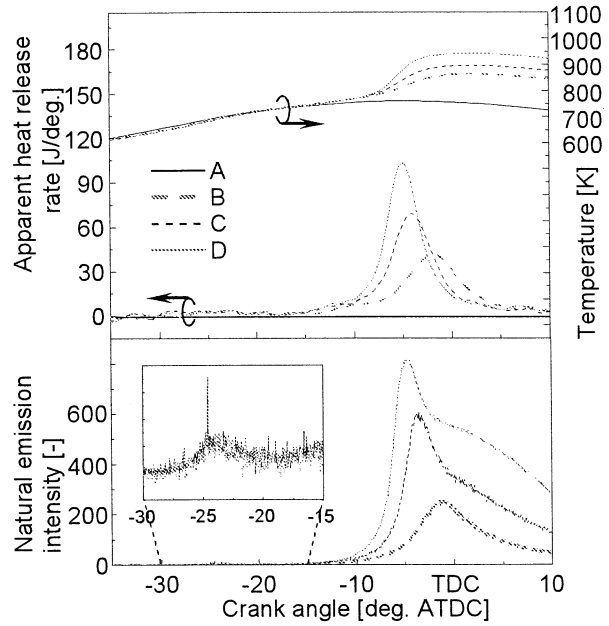


Fig.2 Profiles of in-cylinder pressure, apparent heat release rate and natural emission intensity

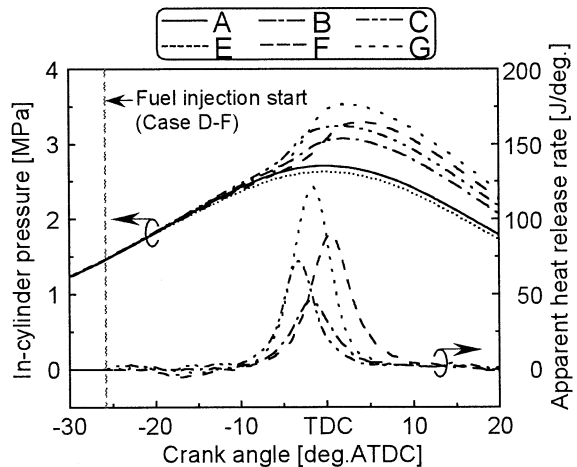


Fig.3 Effect of low temperature oxidation reaction of premixed gas on ignition and combustion characteristics of injected fuel (i-C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>)

## 4. 実験結果

### 4.1 雰囲気の低温酸化反応が直接噴射された燃料の着火特性に与える影響 —オクタン価 100 の場合—

図 3 に条件 A から C および条件 E から G として i-オクタンを直接噴射した際の筒内圧力履歴と条件 E、F、G における見かけの熱発生率を示す。

雰囲気に n-ブタンを含まず i-オクタンを直接噴射した条件 E の筒内圧力は燃料噴射のない同雰囲気条件 A

の圧力よりも下回っていることから、条件 E では *i*-オクタンの蒸発のみが起こり、着火に至っていない。

一方、雰囲気中に *n*-ブタンを含み、その低温酸化反応中に *i*-オクタンが噴射された条件 F および G では、熱発生率に見られるように吸熱過程の後、燃料噴射のない条件 B, C に比して高いピーク値を有し、*i*-オクタン自体も着火・燃焼していることがわかる。ただし、その熱発生率は予混合気のみが燃焼する条件 B, C の場合とほぼ同様の履歴をたどっていることから、噴射された *i*-オクタンは雰囲気中の高温酸化反応により着火したと考えられる。

#### 4・2 雰囲気中の低温酸化反応が直接噴射された燃料の着火・燃焼特性に与える影響 —オクタン価 0, 70 の場合—

前節のとおり、*i*-オクタン単体を噴射燃料とした条件では、低温酸化反応中に生成される化学活性種による着火への影響は見ることができなかつた。ここでは、より着火性の高い *n*-ヘプタン、PRF70 を用い、低温酸化反応が直接噴射された燃料の着火に及ぼす影響を調べた。

条件 E から H において各燃料を用いた際の燃焼室内平均温度および見かけの熱発生率をそれぞれ図 4(a), (b) に示す。着火性の良い *n*-ヘプタン単体を直接噴射した場合、1 段目の燃焼は熱発生率のピーク値に差はあるものの雰囲気の当量比によらず同じ発熱形態であることから、直接噴射された *n*-ヘプタンの反応が主体である。また、2 段目の燃焼はおおよそ 800K で開始されているが、図 2 から雰囲気中の *n*-ブタンのみを圧縮した際にもほぼ同じ温度で燃焼が活性化していることから、この発熱は *n*-ブタンの高温酸化反応によると判断できる。一方、*n*-ヘプタンに比べ着火性の低い PRF70 を直接噴射した場合、熱発生率は PRF70 と *n*-ブタンの発熱が重複した形態となっている。また、図 4(a) では平均温度が 800K より高温で *n*-ブタン中心の燃焼が観測されたのに対し、本条件下では 800K 以下であっても、*n*-ブタンの当量比の増加に伴い燃焼初期からの発熱が急峻となっている。

##### 4・2・1 着火特性に及ぼす影響

図 5 に噴射燃料の低温酸化反応とほぼ同時期に現れる火炎の自発光開始時期および熱炎発生時期について雰囲気当量比を横軸として示す。なお、火炎の自発光は燃料噴射時の発光履歴から無噴射時の履歴から差し引くことで求めた。

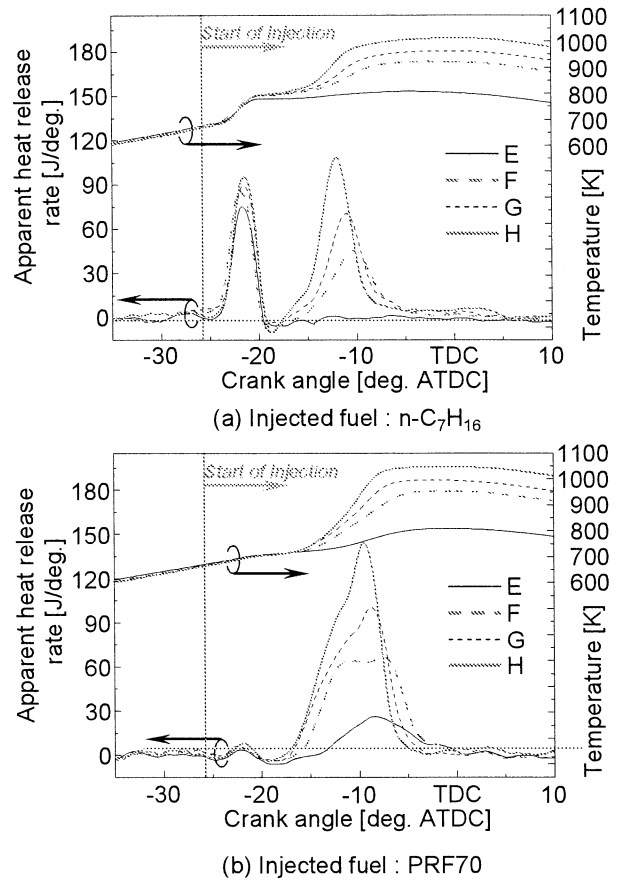


Fig.4 Effect of low temperature oxidation reaction of premixed gas on ignition and combustion characteristics of injected fuel (*n*-C<sub>7</sub>H<sub>16</sub> & PRF70)

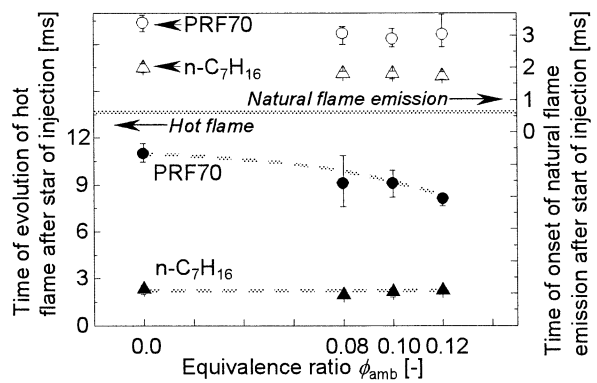


Fig.5 Effect of low temperature oxidation reaction of premixed gas on time of onset of natural flame emission & hot flame after start of injection

自発光の開始時期は雰囲気中に *n*-ブタンを含まない条件 E に比べ、低温酸化反応が生じた雰囲気中に燃料噴射を行った条件 F, G, H では両噴射燃料とも低温酸化反応の開始時期が早期に移行している。ただし、両噴射燃料とも早期化した期間はさほど長くなく、また、

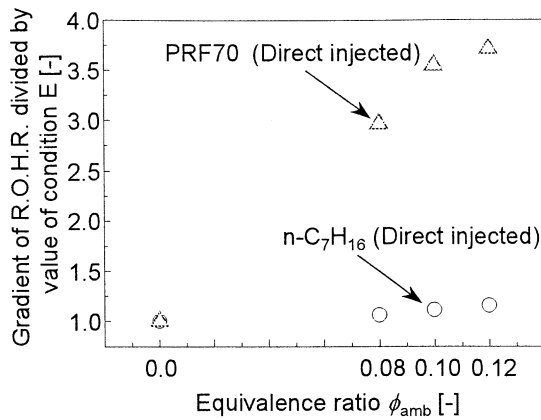


Fig.6 Gradient of R.O.H.R. divided by value of condition E for each ambient conditions and injected fuel

当量比の影響も小さい。一方、熱炎については、着火性の良い  $n$ -ヘプタンが雰囲気中の相違による影響を受けずほぼ同時期に熱炎に至るのに対し、それより着火性の劣る PRF70 は当量比の増加により明確に発生遅れが短縮している。したがって、比較的着火性の高い燃料を噴射燃料とした場合、雰囲気中の低温酸化反応に影響されず、自らの化学反応およびその発熱により熱炎に至らしめる。これに対し、着火性の劣る燃料では、雰囲気により生成される活性化学種に反応を促進された結果、熱炎の発生時期が早期化したと考えられる。

#### 4.2.2 燃焼特性に及ぼす影響

図 6 に各雰囲気、噴射燃料の熱発生率における初期の勾配を求め、噴射燃料ごとに各雰囲気条件について条件 E の値で除した結果を示す。なお、熱発生率の勾配は、 $n$ -ヘプタンを噴射燃料とした全条件および PRF70 の条件 E では 1 段目の熱発生率のピーク値となるまで、その他の条件では雰囲気温度が 800K に至るまでと定義した。図から、雰囲気中の当量比が増加しても  $n$ -ヘプタンの場合は大きく変化しない。しかし、PRF70 では雰囲気中の当量比により勾配が大きく異なり、当量比の増加に伴い勾配は急激になる。

以上のことから、本結果を次のように考察する。直接噴射された燃料の着火性が高い場合、噴射燃料は周囲気体への拡散が比較的小さいまま着火に至るのに対し、難着火性の噴射燃料はその長い着火遅れ期間中に周囲気体との混合が進む。その結果、前項で述べたように、雰囲気中の低温酸化反応により着火が促進された噴射燃料は空間的に重複した  $n$ -ヘプタンの着火を促進する。それにより、PRF70 を噴射燃料に用いた場合には雰囲気温度が 800K より低い場合にも  $n$ -ヘプタンの発熱を伴うことができ、結局、当量比の増加により初期燃焼に関与する  $n$ -ヘプタンの量が増したと推論できる。

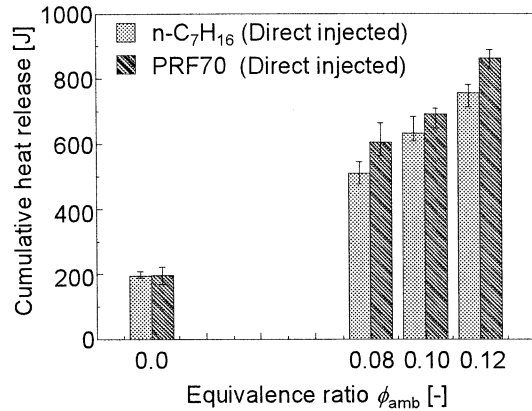


Fig.7 Cumulative heat release in case of condition E, F, G, H for each injected fuel

図 7 に熱発生率を積算し、各雰囲気条件における噴射燃料ごとの噴射燃料と雰囲気中の  $n$ -ヘプタンを合わせた全発熱量の算出結果を示す。供給熱量に対する発熱量は少ないが、これは RCEM 内の当量比がかなり低いことに加え、壁面への冷却損失が大きいためである。雰囲気中に  $n$ -ヘプタンを含まない場合、両噴射燃料の発熱量に大差はない。しかしながら、雰囲気中の低温酸化反応中に燃料噴射を行った条件では、全ての雰囲気当量比において PRF70 を噴射燃料としたときの発熱量が  $n$ -ヘプタンの場合に比して大きい。上述したように、PRF70 は着火遅れ期間の長期化に起因して燃焼室内に広く分布する。また、雰囲気中の低温酸化反応に影響を受け、直接噴射された燃料が活性化される。このことにより、PRF70 の燃焼が  $n$ -ヘプタンのクエンチングを回避して発熱を促すことができたと考えられる。

## 5 まとめ

急速圧縮膨張装置により二段燃料噴射を想定し、雰囲気中の低温酸化反応過程に燃料噴射を行うことで、以下の結論を得た。

- (1) 低温酸化反応を生じた雰囲気中に噴出された難着火性燃料は、そうでない場合に比べ着火が促進される。
- (2) (1)の影響を受ける程度は噴射燃料の着火性に依存する。
- (3) 雰囲気中の低温酸化反応により着火を促進された噴射燃料は、雰囲気中の化学種の燃焼を促進する。

以上の結論を本着火制御法に反映した場合、

(1)の結果から 2 段階燃料噴射による高当量比領域の形成のみならず、1 段階に噴射され予め希薄混合気となった燃料の低温酸化反応が着火制御の有効な手段となり得る。

(2)から本制御手法には最適な燃料の着火性が存在することがわかる。

(3)から本制御手法は失火の回避あるいは未燃成分の抑制に対するポテンシャルを有することがわかる。

#### 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る。

#### 参考文献

- (1) Rudolf H. Stangmaier and Charles E. Roberts, 'Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI): Benefits, Compromises, and Future Engine Applications', SAE Paper 1999-01-3682, (1999).
- (2) Tanet Arcoosisopon, et al. 'Expanding the HCCI Operation With the Charge Stratification', SAE Paper 2004-01-1756, (2004).
- (3) 越光男, 他 2 名, "燃焼の化学反応研究における新展開", エンジンテクノロジー, Vol.4, No.3, pp.40-48, (2002).
- (4) 越光男, "ディーゼル燃焼: 着火の化学反応機構", 自動車技術, Vol.59, No.4, pp.53-56, (2005).
- (5) Peter L. Kelly-Zion and J.E. Dec, "A Computational Study of the Effect of Fuel-Type on Ignition Time in HCCI Engines", Proc. of the Combustion Institute, Vol.28, Part1, pp.1187-1194, (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).