燃料組成による HCCI エンジンの筒内圧力上昇率抑制に関する研究^{*}

柴田 元^{*1}, 漆原 友則^{*2}

A Research of Fuel Chemical Composition on Maximum Pressure Rise Rate of HCCI Engine

Gen SHIBATA^{*1} and Tomonori URUSHIHARA

^{*1} Nippon Oil & Energy Corporation, Central Technical Research Laboratory
8 Chidori-cho, Naka-ku, Yokohama, 231-0815 Japan

The n-heptane and toluene blended fuel exhibits the dual phase high temperature heat release (DP-HTHR) HCCI combustion and it has the potential to achieve the high load HCCI operation. Three topics were investigated in this paper. The first topic was the possibility of DP-HTHR combustion with the blends of the refinery-based gasolines. Three prototype fuels (GAS2, GAS3, and GAS4 fuels) were evaluated. The second topic was the relation between HCCI knocking and heat release phasing. The combustion parameters, which determined the maximum pressure rise rate, were statistically investigated. Finally, the combustion images of DP-HTHR were recorded with a high speed camera, and the combustion process of DP-HTHR was investigated by the video images and heat release analysis data.

Key Words : HCCI, Dual Phase High Temperature Heat Release, High Speed Video Image

1. まえがき

予混合圧縮自己着火(HCCI: Homogeneous charge compression ignition)燃焼は、混合気が希薄で均質であり燃焼時の温度が低いこと、NO_x やすすの生成が極めて少なく高効率であるという利点を持つ。一方、混合気が均質であるために着火が筒内の多点で同時に起こり低負荷においても最大圧力上昇率が高く、高負荷での HCCI エンジンの実用性が課題となっている。この欠点を克服するために、筒内に EGR 分布や混合気の濃度分布、温度分布をつけて急激な HCCI 燃焼を緩やかに燃焼させる手法が報告されているが⁽¹⁻³⁾、広範な負荷回転数領域で使用される HCCI エンジンにおいてこれらの不均一性を常に保つことは難しい。一方、筆者らは燃料を構成する個々の炭化水素の自己着火温度に着目し、二段階高温酸化反応と呼ばれる新しい燃焼法を見出した⁽⁴⁾。本報では、はじめに二段階高温酸化反応の特徴と最大圧力上昇率を抑制する方法について解説をし、続いて石油会社が持つベースガソリンを混合して二段階高温酸化反応の実現を試みた。また、最大圧力上昇率と熱発生率の相関を調べ、さらに、高速度ビデオカメラを用いて二段階高温酸化反応の発光を観察したので、それらの結果を報告する。

2. 二段階高温酸化反応に関する解説とその定義

多種の炭化水素を含む燃料における酸化分解過程を図 1 に示す。ピストンにより混合気が圧縮されて温度が 750K に到達するとノルマルパラフィンを主体としたラジカル連鎖反応(冷炎反応)が開始する。この反応は 820K 付近で一度停止し、過酸化水素やホルムアルデヒドなどが蓄積され、HCCI エンジン試験の熱発生率では低温酸化反応(LTHR: Low temperature heat release)として観察される。880K から 950K 付近の温度領域において、これらのラジカルは燃料中に含まれるオレフィン、パラフィン、ナフテンに作用し、青炎反応が開始する。さらに温度が上昇して 1150K を超えると、芳香族系炭化水素やメタンのような極めて安定なベンゼン環構造や正四面体構造

^{*} 原稿受付 2010 年 11 月 16 日

^{*1} 正員, JX 日鉱日石エネルギー(株) 中央技術研究所
(〒231-0815 神奈川県横浜市中区千鳥町 8 番地)

^{*2} 正員, 日産自動車(株) パワートレイン第 1 技術開発部
E-mail: gen.shibata@noe.jx-group.co.jp

をもつ炭化水素でさえも酸化分解する熱炎反応にいたる。温度が 1450K 以上に達すると、一酸化炭素が急激に酸化されて二酸化炭素が生成し、燃焼は完結する。冷炎反応から酸化分解するノルマルパラフィン系炭化水素（ノルマルヘプタンなど）と熱炎反応から酸化分解する芳香族系炭化水素（トルエンなど）をある割合で混合した燃料を用い、最大圧力上昇率をパラメータに燃料噴射量を変化させると図 2 に示すように高温酸化反応 (HTHR: High temperature heat release) がくびれた、または割れた熱発生率が観察される。この高温酸化反応がくびれた燃焼を図 3 で解説する。ノルマルパラフィン系炭化水素の一部が冷炎反応（低温酸化反応）でラジカルと低分子の炭化水素に分解され、このラジカルと低分子の炭化水素ならびに残存するノルマルパラフィン系炭化水素による一段目の高温酸化反応が 880K-950K の温度領域（青炎反応）で開始する。さらに、温度が上昇して 1150K に到達すると続いて芳香族系炭化水素の酸化分解が開始し二段目の高温酸化反応が起こり、これら二段の高温酸化反応がその開始温度の違いからずれた位相で現れることで図 2 のような高温酸化反応がくびれた熱発生率が観察される。

図 4 は、燃料中のノルマルヘプタンとトルエンの混合比を変えた 4 種類の燃料 (Fuel A-D) を用いて同一最大圧力上昇率条件で実験した結果である。燃料中のトルエンの含有割合を上げていくと、高温酸化反応のくびれの位置が変化し二段目のトルエンの高温酸化反応が立ち上がってくる様子が観察され、燃焼が二段から一段に変化した。

Fig.1 Hydrocarbon reaction processes

Fig.2 Heat release of toluene and n-heptane blended fuel (NTL70)

Fig.3 Dual phase high temperature heat release combustion

Fig.4 Heat release phase change caused by fuel composition

高温酸化反応が一段または二段で燃焼するかは、燃料中に含まれるノルマルパラフィン系炭化水素と芳香族系炭化水素の個々の割合とその容積比 (n-P/A 比) で決まる⁽⁵⁾。図 5 に n-P/A 比と高温酸化反応の模式図を示す。図におけるオレンジ色の三角形はノルマルパラフィン系炭化水素とその分解物に起因する一段目の高温酸化反応の熱発生率を、青色の三角形は芳香族系炭化水素による二段目の高温酸化反応の熱発生率を示す。n-P/A 比が 0.46 よりも小さい場合は二段目の芳香族系炭化水素の燃焼が主体となり高温酸化反応は一段 (SP-HTHR: Single phase high temperature heat release) として観察される。一方、n-P/A 比が 0.81 を超える場合も一段目のノルマルパラフィン系炭化水素の燃焼が主体となり、やはり高温酸化反応は一段となる。また、ノルマルパラフィン系炭化水素と芳香族系炭化水素がある程度以上燃料中に含まれていないと二段の高温酸化反応は起こらない。すなわち、二段の高温酸化反応を起すための燃料の条件は、

条件(1) $0.46 \leq \text{n-P/A 比 (容積比)} \leq 0.81$

条件(2) $20 \text{ 容積}\% \leq \text{ノルマルパラフィン系炭化水素の量} \leq 60 \text{ 容積}\%$

である。以上のことから、本論文においてはノルマルパラフィン系炭化水素と芳香族系炭化水素を条件(1)，(2)を満足するように混合し、高温酸化反応におけるそれぞれの炭化水素の熱分解温度の差（一段目の開始温度が880-950K，二段目の開始温度が1150K）を利用して図3のように熱発生率に二段の高温酸化反応をもつ燃焼を二段階高温酸化反応(DP-HTHR: Dual phase high temperature heat release)と定義する。

Fig. 5 Requirement of fuel composition to achieve DP-HTHR combustion

Table 1 Fuel composition of PRF75, NMP75, NTL75 and NCP75 fuels in Figures 6 and 7

Hydrocarbons	Unit	PRF75	NMP75	NTL75	NCP75
n-Heptane	vol%	25.0	30.3	40.3	45.6
iso-Octane	vol%	75.0	-	-	-
4M1P*	vol%	-	69.7	-	-
Toluene	vol%	-	-	59.7	-
Cyclopentane	vol%	-	-	-	54.4

*4M1P: 4methyl-1-pentene

表1の4種類の燃料(PR75, NMP75, NTL75, NCP75)はそれぞれ2成分の炭化水素より構成されておりリサーチ法オクタン価(RO)はいずれも75である。これらの燃料を最大圧力上昇率800kPa/degで運転した際の圧力線図を図6に、その熱発生率を図7に示す。NTL75燃料(n-P/A比=0.68)は二段階高温酸化反応をし、それ以外の燃料では高温酸化反応が一段で燃焼した。同じ最大圧力上昇率でもNTL75燃料は他の燃料と比べて約30%の出力向上を図ることができ、二段階高温酸化反応にHCCIエンジンの高負荷運転を実現できる可能性があることが分った。

Fig. 6 Pressure histories of RON75 fuels

Fig. 7 Heat release data of RON75 fuels

以上のことからノルマルヘプタンとトルエンを条件(1)，(2)で混合した燃料を用いてHCCIエンジンを運転すると二段階高温酸化反応が起こり高負荷運転が可能となることが確認されたが、一方で石油会社が持つ燃料基材から構成される石油系燃料で二段階高温酸化反応燃焼が実現できなければこの研究は実用性を持たないことになる。そこで、①石油会社が持つベースガソリンを混合して二段階高温酸化反応の実現を試みた。また、②最大圧力上昇率と熱発生率の相関を調べ、さらに、③高速度ビデオカメラを用いて二段階高温酸化反応の発光を観察したので、本論文においてそれらの詳細な結果を報告する。

3. 製油所基材を用いた二段階高温酸化反応の実現

3・1 実験装置及び実験方法

3・1・1 供試エンジン

供試エンジンには4サイクル4気筒ガソリンエンジンを改造したHCCIエンジンを用いた(表2, 図8参照)。20℃湿度60%に調整された空気は層流流量計を通過しスーパーチャージャで155kPa(abs)まで過給された後、各シリンダに分配される。各シリンダにはピエゾ型筒内圧力センサが取り付けられており、圧力データから燃焼解析をおこなった。

Fig. 8 Experimental engine set-up schematic

Table 2 HCCI engine specifications

Engine type	4 cylinder MPI	Exhaust valve open	53°CA BBDC
Compression ratio	15:1	Exhaust valve close	7°CA ATDC
Bore	86mm	Intake valve open	1°CA ATDC
Stroke	86mm	Intake valve close	19°CA ABDC
Displacement	1998cc		

3・1・2 二段階高温酸化反応の発現条件と実験用燃料

二段階高温酸化反応を起すための燃料の条件は、前述の条件(1)及び条件(2)であり、さらに燃料にガソリンの要素を持たせるために下記の条件(3)から(7)の特性を持つ燃料を製油所基材（ベースガソリン）で調合をし、二段階高温酸化反応の実用性について調べた。

条件(3) $0.72\text{g/cm}^3 < \text{密度} < 0.78\text{g/cm}^3$ (@15°C)

条件(4) 初留点 (IBP) < 40°C

条件(5) $80^\circ\text{C} < 50\% \text{留出温度 (T50)} < 110^\circ\text{C}$

条件(6) $90\% \text{留出温度 (T90)} < 180^\circ\text{C}$

条件(7) 蒸気圧力 < 65kPa

ベースガソリンにはパラフィンを多く含むナフサ系基材 2 種類(LSR: Light straight run naphtha, HSR: Heavy straight run naphtha)と芳香族系基材の L-FMT(Light reformat gasoline)を選んだ (表 3 参照)。これら 3 種類のベースガソリンを混合し、表 4 に示す GAS2, GAS3, GAS4 の 3 種類の燃料を調合した。GAS2 燃料の n-P/A 比は 1.09 で前述の条件(1) (図 5) から外れるため、一段の高温酸化反応（一段階高温酸化反応）が起きると予想される。また、GAS4 燃料の n-P/A 比は 0.68 であり、二段階高温酸化反応が起きると予想される。一方、GAS3 燃料の n-P/A 比は 0.84 であり、図 5 より二段階高温酸化反応と一段階高温酸化反応の中間的な燃焼が起ると予想される。

Table 3 Description of base gasoline properties

BASE gasolines		LSR	HSR	L-FMT
Octane numbers	RON	72.7	48.1	105.6
	MON	77-79	48.5	95.1
Density	g/cm^3 @15°C	0.6434	0.7305	0.8481
RVP	kPa	120.0	13.5	6.5
Distillation	IBP	24.0	80.0	105.5
	10%	33.0	95.0	108.0
	30%	38.5	101.0	108.5
	50%	43.5	109.0	109.0
	70%	50.5	118.0	110.0
	90%	61.5	130.0	113.0
	EP	70.0	152.0	126.5
Fuel composition vol %	n-Paraffins	55.19	33.72	5.57
	iso-Paraffins	38.99	35.80	4.92
	Olefins	0.01	0.47	2.91
	Naphthenes	4.84	19.06	2.63
	Aromatics	0.97	10.87	83.89
	C4-C6 n-Paraffins	55.14	8.02	0.03
	C7-C9 n-Paraffins	0.05	25.69	5.54
	Toluene	0.01	3.93	76.98

Table 4 Test fuel properties of GAS2-4 fuels

Fuel products		GAS2	GAS3	GAS4	Target range for DP-HTHR
Octane numbers	RON	80.2	81.2	81.9	$70 \leq \text{RONs} \leq 85$
	MON	76.7	76.2	76.0	-
Density g/cm^3 @15°C		0.7295	0.7437	0.7579	$0.72 \leq \rho \leq 0.78$
RVP	kPa	68.5	58.0	46.5	$\text{RVP} \leq 65\text{kPa}$
Distillation	IBP	32.5	34.5	38.5	$\text{IBPs} \leq 40^\circ\text{C}$
	10%	49.5	55.5	65.0	-
	30%	65.5	75.0	87.0	-
	50%	85.5	95.5	102.0	$80^\circ\text{C} \leq T_{50} \leq 105^\circ\text{C}$
	70%	104.5	107.5	109.5	-
	90%	113.5	115.0	116.0	$T_{90} \leq 180^\circ\text{C}$
	EP	129.5	131.0	132.5	-
Blending ratio %	LSR	50.0	40.0	30.0	-
	HSR	15.0	20.0	25.0	-
	FMT	35.0	40.0	45.0	-
					-
Fuel composition mass %	n-Paraffins	30.83	27.21	24.27	-
	iso-Paraffins	24.49	22.54	20.97	-
	Olefins	0.31	0.35	0.38	-
	Naphthenes	6.03	6.35	6.97	-
	Aromatics	38.34	43.55	47.41	-
	n-Paraffins/Aromatics vol%ratio	1.09	0.84	0.68	$0.46 \leq \text{nP/A} \leq 0.81$
Stoic. A/F		14.54	14.44	14.36	-
H/C		1.85	1.78	1.73	-
CH wt %	C	86.64	87.07	87.41	-
	H	13.36	12.93	12.59	-
Heating value	kJ/kg	45480	45210	44940	-

3・2 HCCI エンジンによる検証結果

以上の予想を元に表 2 及び図 8 に示す 4 気筒 HCCI エンジンを用いてエンジン回転数 1000rpm, 最大圧力上昇率 700kPa/deg 条件で GAS2, GAS3, GAS4 燃料を用いて運転し、その熱発生率を比較したものが図 9 である。GAS2

燃料は一段階高温酸化反応で燃焼をし、GAS4 は二段階高温酸化反応で燃焼をしている。また、GAS3 は GAS2 と GAS4 の中間的な燃焼をしていることが確認された。以上の結果、条件(1)から条件(7)を満たす燃料であれば、製油所のベースガソリンを調合した燃料でも二段階高温酸化反応を起こせることが確認された。

Fig.9 Heat release data of GAS2-4 fuels at a maximum pressure rise rate of 700kPa/deg

4. 最大圧力上昇率と熱発生率の相関について

図9では、3種類の燃料(GAS2, GAS3, GAS4燃料)を用いて同一最大圧力上昇率条件(700kPa/deg)で実験しているが、これらの熱発生率は大きく異なる。HCCIエンジンの高負荷側の限界は耐ノッキング性能で決まるため、最大圧力上昇率と熱発生率との相関を明確にすることが重要である。そこで、リサーチ法オクタン価(RO)が全て75の7種類の燃料(G01-G07燃料)を用いて最大圧力上昇率を決定する燃焼因子を統計解析により求め、定量化した。また、得られた実験式と実験データを比較し、その式の示している意味について考察をした。

4・1 実験装置及び実験方法

4・1・1 試験燃料

実験は表5に示す7種類の燃料(G01-G07燃料)を用いて表2及び図8に示すHCCIエンジンを用いて評価した。これらの燃料は図10に示すようにトルエン、ノルマルヘプタン、イソオクタン3種類の炭化水素より構成されており、表5に示すようにリサーチ法オクタン価(RO)が全ての燃料で75であることを特徴とする。G01燃料からG07燃料に移行するにつれ、燃料中のトルエンの含有量をほぼ10vol%ずつ増量しリサーチ法オクタン価(RO)が75になるようにイソオクタンとノルマルヘプタンで調整し、処方した。

Table 5 Description of test fuel properties

Fuel products	G01 (PRF75)	G02	G03	G04	G05	G06	G07
Octane numbers	RON 74.8 MON 74.7	75.2 73.6	74.8 71.4	74.9 70.1	75.3 68.9	75.2 67.2	75.3 65.7
Density g/cm ³ @15°C	0.6928	0.7103	0.7277	0.7451	0.7625	0.781	0.7953
RVP kPa	10.5	10.2	10.0	9.8	9.5	9.0	8.6
Distillation							
IBP	95.0	95.5	96.5	96.5	97.0	98.0	98.0
10%	97.0	97.5	98.0	99.0	99.5	100.5	101.5
30%	97.0	97.5	98.0	99.0	100.0	100.5	101.5
50%	97.5	97.5	98.0	99.0	100.0	101.5	102.5
70%	97.5	97.5	98.5	99.5	100.5	102.0	103.5
90%	97.5	97.5	99.0	101.0	102.5	104.5	106.0
EP	97.5	98.5	101.0	105.0	107.5	108.0	108.5
Fuel composition vol%							
Toluene	0.0	9.7	19.8	29.7	39.7	49.6	57.7
n-Heptane	25.4	27.5	30.8	33.7	36.5	39.9	42.3
iso-Octane	74.6	62.8	49.4	36.7	23.8	10.5	0.0
n-Paraffins/Aromatics vol%ratio	-	2.83	1.56	1.13	0.92	0.80	0.73
H/C	2.28	2.13	2.00	1.87	1.75	1.64	1.55
Stoic. A/F	15.13	14.93	14.74	14.56	14.39	14.23	14.10
Heating value kJ/kg	44400	43948	43503	43086	42685	42304	42006

Fig. 10 Fuel composition of G01-G07 fuels

4・1・2 実験方法

全てのエンジン実験はエンジン回転数 1000rpm, 過給圧力 155kPa (abs), 吸気マニホールド入り口温度 (図8の T_{air-in}) 58°Cの条件で行った。

4・1・2・1 性能運転 1 (Test1) …等最大圧力上昇率運転

表 5 の 7 種類の燃料を用いて、最大圧力上昇率 800, 700, 600, 500, 400kPa/deg の 5 条件で HCCI エンジンを運転し、その燃焼データを解析した (表 6, 図 11 参照) (35 データ)。

Table 6 Test conditions of Test 1

Fuels	G01, G02, G03, G04, G05, G06, G07
Engine speed	1000 rpm
Water jacket & engine oil temperature	80°C
Maximum pressure rise rate	800, 700, 600, 500, 400 kPa/deg
Intake manifold	
Pressure	155kPa (abs)
Temperature	58°C

Fig. 11 Relation between measured in-cylinder pressure and maximum pressure rise rate (G03)

4・1・2・2 性能運転 2 (Test2) …等平均有効圧力運転

表 5 の 7 種類の燃料を用いて平均有効圧力(IMEP: Indicated mean effective pressure) 390, 410, 430, 450kPa の 4 条件で HCCI エンジンを運転し、その燃焼データを解析した (表 7 参照) (28 データ)。

Table 7 Test conditions of Test 2

Fuels	G01, G02, G03, G04, G05, G06, G07
Engine speed	1000 rpm
Water jacket & engine oil temperature	80°C
IMEP	390, 410, 430, 450 kPa
Intake manifold	
Pressure	155kPa (abs)
Temperature	58°C

性能運転 1 及び性能運転 2 より最大圧力上昇率を決定する燃焼因子を統計計算より求め、定量化した。

4・2 実験結果及び考察

4・2・1 性能運転 1 及び性能運転 2 の結果について

性能運転 1 及び性能運転 2 の全てのデータ (合計 63 点) に対して IMEP と HTHR CA50 (高温酸化反応が 50% 燃焼するクランク角度) の関係を示したものが図 12 である。図 12 の■プロットが性能運転 1 の結果を、●プロットが性能運転 2 の結果を示す。図中の実線は性能運転 1 において一つの燃料の噴射量を変化させたときの IMEP と HTHR CA50 の変化を表しており、破線は各燃料間での等最大圧力上昇率線を表している。二本の一点鎖線はそれぞれ性能運転 2 における 390kPa, 450kPa の等 IMEP 線を表している。リサーチ法オクタン価(RON)が同一でも燃料組成が変化すると IMEP と HTHR CA50 は大きく変化した。G01 燃料は進角側で燃焼しており、低い IMEP でも高い最大圧力上昇率を示した。一方、G07 燃料は遅角側で燃焼しており、例えば IMEP 450kPa 条件においては G01 燃料よりも低い最大圧力上昇率で運転できた。図 13 は最大圧力上昇率が 700kPa/deg における各燃料の熱発生率を比較したものである (図 12 の α , β , δ , γ のポイントにおける熱発生率の比較)。 α から γ へ移行するにつれて、燃焼が一段階高温酸化反応から次第に二段階高温酸化反応に変化し、最大圧力上昇率が同じであっても熱発生率は燃料組成によって異なっている。最大圧力上昇率を決定する因子は、熱発生率のタイミングとその大きさであると考えられる。そこで、熱発生率のタイミングを HTHR CA50 で、また、熱発生率の大きさは負荷(ここでは IMEP)と燃焼期間(HTHR CA10-90)で代表させ、最大圧力上昇率と各因子との相関を調べた。なお、本報告における燃焼期間は高温酸化反応の熱発生が 10%から 90%燃焼する期間 (クランク角度) として定義した。

Fig. 12 Engine operational map of Test 1 and Test 2

Fig. 13 Heat release data of G01, G03, G05 and G07 fuels measured at a maximum pressure rise rate of 700 kPa/deg

4・2・2 最大圧力上昇率を決定する因子

4・2・2・1 単相関による解析結果

性能運転 1 及び性能運転 2 の全てのデータ (合計 63 点) に対して, ①負荷(IMEP), ②HTHR CA50, ③燃焼期間のそれぞれの因子で最大圧力上昇率との間の単相関を調べた結果を図 14 に示す. 各因子と最大圧力上昇率とのそれぞれの単相関係数(R^2)は 0.305 から 0.736 であった. HTHR CA50 は負荷(IMEP)や燃焼期間といった因子よりも最大圧力上昇率と高い単相関を示したが, いずれの因子も 99%以上の信頼率を持つことから, これら 3 つの因子が個々に最大圧力上昇率に影響を与えていると判断した. そこで, 次章においてこれら 3 つの因子による多重回帰計算を試みた.

Fig. 14 Relation between maximum pressure rise rate and each parameter

4・2・2・2 多重回帰計算による解析結果

はじめに負荷(IMEP), HTHR CA50, 燃焼期間の間の相関係数 (R^2) を調べた. 負荷 (IMEP) と HTHR CA50 間, 負荷 (IMEP) と燃焼期間, HTHR CA50 と燃焼期間の間のそれぞれの相関係数 (R^2) は, 0.031, 0.3849, 0.1602 と低く, 負荷(IMEP), HTHR CA50, 燃焼期間をそれぞれ独立の変数 (パラメータ) として扱うことができることが分った. そこで, これらの 3 つのパラメータと最大圧力上昇率との間で多重回帰計算をした結果を式(1)に示す.

$$\text{Max } dp/d\theta = 199.74 + 1.099 (\text{IMEP}) - 64.386 (\text{HTHR CA50}) - 7.978 (\text{Combustion period}) \quad (1)$$

$\text{Max } dp/d\theta$: 最大圧力上昇率 (単位 kPa/deg)

IMEP : 平均有効圧力 (単位 kPa)

HTHR CA50 : 高温酸化反応が 50%燃焼するクランク角度 (単位 deg ATDC)

Combustion period : 高温酸化反応が 10%から 90%燃焼する期間 (単位 deg)

横軸にエンジン実験から得られた最大圧力上昇率, 縦軸に式(1)から計算される最大圧力上昇率で整理した結果を図 15 に示す. 実験値と式(1)の間の相関(R^2)は 0.995 と高く, 標準誤差は 11 kPa/deg と小さく, Y 切片も 3.07 とゼロに近い値を示した. この結果, 最大圧力上昇率は負荷(IMEP), HTHR CA50, 燃焼期間の 3 つの関数として扱えることが分った. 式(1)のそれぞれの因子の係数は, ①負荷(IMEP)が小さく, ②HTHR CA50 が逆角側であり, ③燃焼期間が長いほど最大圧力上昇率が小さくなることを示している. また, 式(1)の HTHR CA50 と燃焼期間の

各係数は、HTHR CA50 を 1deg 遅らせるほうが燃焼期間を 1deg 延ばすよりも最大圧力上昇率の抑制に約 8 倍の効果があることを示しており、各因子が最大圧力上昇率に与える影響度を明確にすることができた。

図 16 は性能運転 1 及び性能運転 2 の IMEP 390kPa 以上の実験データを燃焼期間と HTHR CA50 で整理し、その中に等 IMEP 線（破線）と等最大圧力上昇率線（点線）を描き込んだものである。G01 燃料（■プロット）と比較すると G07 燃料（▲プロット）の HTHR CA50 は遅角側にあり、IMEP 390kPa から 450kPa の変動に対して G07 燃料は G01 燃料より HTHR CA50 及び燃焼期間が変動しにくいことが分る。その結果、G07 燃料は負荷に対する最大圧力上昇率の変動が小さくなっており、これは式(1)の考察結果と一致する。

Fig. 15 Goodness of fit for statistically calculated data by equation 1

Fig. 16 Relation between combustion period, HTH CA50, maximum pressure rise rate and IMEP in G01-G07 fuels

5. 二段階高温酸化反応の燃焼撮影

5・1 実験装置及び実験方法

実験で使用した図 8 の HCCI エンジンのベースはガソリンエンジンであるため、HCCI 運転時に使用していない点火プラグ用の穴にナック社製の耐熱耐圧エンドスコープを取り付け、イメージインテンシファイヤと高速度ビデオカメラ（GX-8）を用いて二段階高温酸化反応の燃焼撮影を行い（撮影波長 400-700nm）、熱発生率のデータと併せて解析した（図 17 参照）。

Fig. 17 Set-up of high speed video camera test

5・2 二段階高温酸化反応の燃焼撮影結果

クランク角度信号に高速度ビデオカメラを同期させて二段階高温酸化反応を撮影し、熱発生率と燃焼写真の比較を行った。図 18 に G07 燃料を用いて最大圧力上昇率 700kPa/deg（図 12 及び図 16 の γ ポイント）で撮影したときの二段階高温酸化反応の画像とその熱発生率を示す。G07 燃料は n-P/A 比が 0.73 であるため、図 5 より二段階高温酸化反応をする。上死点前 10deg で高温酸化反応が立ち上がり、熱発生率の増加に伴い HCCI 燃焼領域が増え、上死点後の熱発生率の縮退と共に画像が次第に暗くなる。この映像の中で、上死点前 1deg (-1(E)) で明るく写

っている画像が上死点 (TDC(F)) で一度減光し、上死点后 1deg (1(G)) で再び輝いている様子が観察され、異なるサイクルでも同じタイミングで燃焼の輝度変化が確認された。この上死点付近における燃焼画像の輝度変化の理由を調べるために、図 18 の実験結果に対し筒内平均温度の履歴を圧力データより計算した (図 19 参照)。青炎反応 ($\geq 940\text{K}$) は上死点前 10deg より始まり、熱炎反応 ($\geq 1150\text{K}$) は上死点前 1.84deg に開始している。このため、G07 燃料中のノルマルヘプタンは低温酸化反応 (冷炎反応) から酸化分解を開始して青炎反応を起こし、ベンゼン環構造が強固なトルエンは熱炎反応から酸化分解を開始する。図 18 の上死点 (TDC(F)) において燃焼画像が減光しているのは、G07 燃料中に含まれるノルマルヘプタンとその分解物の酸化分解反応の縮退とトルエンの熱炎反応からの酸化分解開始が重なった結果であり、燃料を構成する炭化水素の酸化分解温度に応じて HCCI 燃焼が進行していることを示唆している。ノルマルヘプタンとトルエンのように酸化分解温度が大きく異なる炭化水素を含む燃料 (G07 燃料) では、図 18 に示すようにノルマルヘプタンとその分解物による高温酸化反応が前半で、続いて残存するラジカルとトルエンによる高温酸化反応が後半 (熱炎反応) で起こり、その二段階の発光が画像からも観察された。二段階高温酸化反応では燃焼期間が遅角側に延び同時に HTHR CA50 が遅角するので、式(1)より最大圧力上昇率を下げられる効果があることが分った。つまり、二段階高温酸化反応では一段目の熱発生が上死点直前に起こるため、上死点後にピストンが下降しても温度上昇が継続して二段目の熱発生を起こすので、燃焼期間が延び HTHR CA50 を大きく遅角させることができる。

Fig. 18 Digital camera images of DP-HTHR combustion
(Fuel: G07, max dp/dθ: 700kPa/deg, Point γ)

Fig. 19 In-cylinder temperature history in Figure 18

さらに G01, G03, G05 燃料を用いて最大圧力上昇率 700kPa/deg (図 12 及び図 16 の α , β , δ ポイント) で撮影したときの高温酸化反応の熱発生率とその画像を、図 20 (G05 燃料)、図 21 (G03 燃料)、図 22 (G01 燃料) に示す。G05, G03, G01 燃料は n-P/A 比がそれぞれ 0.92, 1.56, ∞ である。このことから、G05 燃料では図 20 の 2 サイクル目に示すように低い確率で僅かな二段階高温酸化反応の発光が観察されることはあるが、G03, G01 燃料では図 21 及び図 22 に示すように二段階高温酸化反応は全く確認されなかった。また、図 12 より、 γ , δ , β , α の順に IMEP が小さくなり、図 16 よりこの順に燃焼期間が延びるので、図 18, 図 20, 図 21, 図 22 の順に燃焼画像が暗くなると同時に、画像に写っている時間が長期化していることが分る。

Fig. 20 Digital camera images of HTHR combustion
(Fuel: G05, max dp/dθ: 700kPa/deg, Point δ)

Fig. 21 Digital camera images of HTHR combustion
(Fuel: G03, max dp/dθ: 700kPa/deg, Point β)

Fig. 22 Digital camera images of HTHR combustion
(Fuel: G01, max $dp/d\theta$: 700kPa/deg, Point α)

以上のことから、燃料の組成が二段階高温酸化反応の発光のタイミング、発光の期間、及び発光の強さに影響を与えている様子が撮影画像からも確認され、本試験における燃焼画像と熱発生率データは高い整合性が取れていることが分った。

6. 結 論

GAS2 燃料から GAS4 燃料までの 3 種類の燃料と G01 燃料から G07 燃料までの 7 種類の燃料を用いてエンジン回転数 1000rpm, 過給圧力 155kPa abs, 吸気温度 58°C で HCCI エンジン実験を行い、以下の結論を得た。

1. 製油所の石油系基材であるパラフィン系炭化水素を多く含むナフサと芳香族炭化水素を多く含む改質ガソリンを条件(1)から条件(7)を満足するように混合した燃料を用いても、二段階高温酸化反応を実現できた。
2. HCCI エンジンの最大圧力上昇率を決定する因子は、負荷(IMEP), HTHR CA50, 燃焼期間の 3 つであり、統計的手法によりその関係について定量的な解析結果を得た (式(1))。
3. 式(1)より、負荷(IMEP)が小さいほど、HTHR CA50 が遅角側にあるほど、燃焼期間が長いほど、最大圧力上昇率は小さくなることが分った。式(1)の HTHR CA50 と燃焼期間の各係数は、HTHR CA50 を 1deg 遅らせるほうが燃焼期間を 1deg 延ばすよりも最大圧力上昇率の抑制に約 8 倍の効果があることを示しており、各因子が最大圧力上昇率に与える影響度を明確にすることができた。
4. ノルマルヘプタンとトルエンより構成される燃料を用いて高温酸化反応で二段階の発光を起こす燃焼を高速度ビデオカメラで撮影することに成功した。前半の発光はノルマルヘプタンとその分解物の酸化分解反応であり、後半の発光は残存するラジカルとトルエンの酸化分解反応 (熱炎反応) である。この結果は、燃料を構成する炭化水素の酸化分解温度に応じて HCCI 燃焼が進行することを示唆している。
5. 二段階高温酸化反応では上死点直前で一段目の熱発生が起き、上死点を過ぎても温度上昇が継続して二段目の熱発生を起すので、燃焼期間が延び HTHR CA50 を遅角させることができる。
6. 燃料の組成が二段階高温酸化反応の発光のタイミング、発光の期間及び発光の強さに影響を与えている様子が画像撮影により確認され、画像データと熱発生率データは高い整合性を示した。

文 献

- (1) Krasselt, J., Foster, D., Ghandi, J., Herold, R., Reuss, D., and Najt, P., "Investigation into the Effects of Thermal and Compositional Stratification on HCCI Combustion – Part1: Metal Engine Results", SAE Technical Paper SP-2242 (2009), 2009-01-1105, pp. 473-490
- (2) Herold, R., Krasselt, J., Foster, D., Ghandi, J., and Najt, P., "Investigation into the Effects of Thermal and Compositional Stratification on HCCI Combustion –Part2: Optical Engine Results", SAE Technical Paper SP-2242 (2009), 2009-01-1106, pp. 491-510
- (3) 岩間理, 山沖聡, 飯田訓正, "二成分系燃料を用いた燃料の層状吸気が HCCI 燃焼に与える影響", 自動車技術会論文集 Vol. 39, No. 5 (2008), 20084910, pp. 77-82
- (4) Shibata, G., and Urushihara, T., "Dual Phase High Temperature Heat Release Combustion", SAE Technical Paper SP-2182 (2008), 2008-01-0007, pp. 1-12
- (5) Shibata, G., "Improvement of HCCI Performance by Fuel Composition", Engine Research Center Symposium in University of Wisconsin-Madison (USA), 2009 June, pp. 1-44