希薄予混合圧縮着火機関の燃焼室内ガス成分分析
による燃焼機構解明*小川 英之^{*1}, 李 辰 宇^{*2}, 登坂 茂^{*3}
藤原 康博^{*3}, 宮本 登^{*1}Combustion Mechanism Analysis with In-Chamber Gas Composition
Measurements in a Premixed Lean Compression Ignition EngineHideyuki OGAWA, Li CHENYU, Shigeru TOSAKA,
Yasuhiro FUJIWARA and Noboru MIYAMOTO

The in-chamber and exhaust gases from a premixed lean compression ignition engine were evaluated with high-speed direct gas sampling and gas chromatography. The results showed that in a premixed lean CI engine the in-chamber concentrations of THC and CO were always much higher than in conventional diesel combustion and remained nearly constant after the main part of the heat release was finished. The THC near the piston cavity wall was much higher than the the center of the combustion chamber and near the cylinder head. Deposition of fuel on the piston face was proved to be the main reason for higher THC emissions from premixed lean CI engine. The experiments with the model fuels showed that during combustion amounts of unburnt hydrocarbon components with lower boiling points decreased more than higher boiling point components, while there was little difference in the relative fractional amounts based on component ignitability.

Key Words: Internal Combustion Engine, Premixed Combustion, Fuel, Compression Ignition, Hydrocarbon, Gas Chromatography, Emission, Gas Sampling

1. ま え が き

予混合圧縮着火燃焼は、通常のディーゼル燃焼に比較して NO_x と黒煙を大幅に低減し得るが、THCとCOが著しく増加するほか、着火時期の制御が困難なことや低空気過剰率下におけるノッキングの発生などが実用上の障害となる^{(1)~(3)}。これらの問題に対して、通常のディーゼル機関において報告例⁽⁴⁾⁽⁵⁾があるように、燃焼室内ガスを直接採取して成分分析することが燃焼機構の解明に有効であるものと考えられるが、予混合圧縮着火燃焼に対する直接ガス採取の試みはまだ行われていない。

本研究では、予混合圧縮着火機関の燃焼室内ガスを高速ガスサンプリングシステムによって採取し、排気とともにガスクロマトグラフを用いて成分分析を行うことにより、未燃炭化水素の組成とその発生機構を中心に燃焼特性の解明を試みた。燃焼室内ガスは、着火

前の圧縮行程から膨張行程後半まで時期を任意に設定して採取した。実験では、供試燃料として通常の軽油に加えて数種の既知炭化水素を成分とするモデル燃料3種類を用い、未燃炭化水素の組成に対する燃料成分の分子構造、着火性および沸点の影響を解析した。運転条件としては、安定した圧縮着火燃焼が得られる空気過剰率を原則としたが、過早着火によるノッキング限界と失火限界においても実験を行い、それらの機構解明も試みた。

2. 実験装置および方法

供試機関は、表1に諸元を示す単気筒、四サイクルの直接噴射式ディーゼル機関である。供試機関は、本来図1(a)に示すトロイダル形燃焼室を有しているが、良好な予混合圧縮着火を確保するため図1(b)に示す浅皿形キャビティを試作して圧縮比を18.0から12.0に低下させた。燃料噴射系にはコモンレール式燃料噴射システムを用い、噴射時期の広範な変更を容易にした。空気過剰率として安定した圧縮着火燃焼が得られる $\lambda=4$ とすることを原則としたが、過早着火によるノッキング限界である $\lambda=3$ と失火限界である $\lambda=5$ についても実験を行った。

燃料には通常のJIS2号軽油のほか、数種の既知炭

* 原稿受付 1998年7月9日。

^{*1} 正員, 北海道大学大学院工学研究科(☎060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)。^{*2} 准員, 北海道大学大学院。^{*3} 正員, 北海道工業大学工学部(☎006-0817 札幌市手稲区前田7条5丁目)。

E-mail: h-ogawa@eng.hokudai.ac.jp

Table 1 The tested engine and operating conditions

	Conventional diesel	Premixed lean
Type	Single cylinder	←
Bore × stroke	φ 133 mm × 140 mm	←
Displacement	1950 cm ³	←
Combust. chamber	Toroidal (φ 67 mm)	Shallow dish (φ 114 mm)
Compression ratio	18.0	12.3
Swirl ratio	2.2	←
Injection system	Common rail system	←
Injection nozzle	φ 0.34 mm × 4	φ 0.19 mm × 5
Injection pressure	20 MPa	100 MPa
Engine speed	1100 rpm	←
Coolant temp.	80°C	←
Injection timing	λ = 4, 5	10° CA BTDC
	λ = 3	Not tested
		145° CA BTDC

(a) Conventional diesel (b) Premixed lean

Fig. 1 Tested engine and a gas sampling position

化水素からなる 3 種類のモデル燃料を用いた。各モデル燃料の成分およびその性状は表 2 に示すとおりである。モデル燃料 A は 51 vol% のノルマルパラフィン(炭素数 13~16)を主成分とし、7 種類の単組成炭化水素を各 7 vol% 含んでおり、未燃炭化水素組成に対する各成分の分子構造による影響を調べるのに用いた。モデル燃料 B は *n*-トリデカンとテトラリンが体積割合で等量の混合物であり、各成分の着火性による影響を、またモデル燃料 C は炭素数が 7, 10, および 13 のノルマルパラフィンを等量含有した混合物であり、各成分の沸点による影響をそれぞれ調べるのに用いた。

高速ガスサンプリングバルブは図 1 に示す位置に装着した。実験では、短期間でできるだけ多くのガスを採取するためポペット形バルブをおもに用いたほか、採取位置の影響を調べるに際しては空間分解能の高いニードル形バルブを用いた。ガスの採取期間は両バルブとも約 10°CA であり、採取期間の中央値を採取時期とした。ガスの採取量は上死点近傍でポペット形の場合が標準状態で 26 cm³、ニードル形の場合が 13

Table 2 Components of model fuels

Fuel	Components	Cetane number	Boiling point (°C)	Blending ratio (vol %)
A	n-Paraffin	90	(255) [*]	51
	n-Decane	76	174	7
	Decaline	48	194	7
	Tetraline	32	207	7
	Heptamethylnonane	15	241	7
	Dipentene	11	176	7
	Xylene	4	142	7
B	α-Methylnaphtalene	0	239	7
	n-Tridecane	88	234	50
C	Tetraline	32	207	50
	n-Tridecane	88	234	33.3
	n-Decane	76	174	33.3
	n-Heptane	56	98	33.3

※ The parenthesis at n-paraffin designates 50% distillation temperature

(a) Cylinder head (b) Cavity center (c) Cavity bottom

Fig. 2 Gas sampling positions in the combustion chamber

cm³ である。ポペット形バルブの場合には、図 1 のとおり直接シリンダヘッドに装着してガスを採取したが、ニードル形バルブの場合にはステンレス鋼管(内径 2 mm)をバルブ入口に装着し、採取位置を図 2 に示す 3 箇所を設定した。バルブからのガス採取に際しては、高沸点成分の凝縮を防ぐため加熱したシリンジによりバルブ出口から直接採取し、FID を検出器とするガスクロマトグラフに挿入して炭化水素の成分分析を行った。この際、分離カラムの充てん剤には 100~300°C において分離能の高いシリコン 0 V-101 を使用した。一方、CO に関してはサンプリングバックに採取して NDIR により定量した。

3. 実験結果および考察

3.1 予混合圧縮着火機関の排気エミッション

燃焼室内ガス組成を解析するに先立ち、供試機関において通常の軽油を用いた表 1 に示す条件で希薄予混合圧縮着火燃焼を行った。その結果を通常のディーゼル燃焼と比較して図 3 に示す。予混合圧縮着火燃焼を行うことにより、熱消費率(BSEC)の大幅な悪化を伴うことなく極めて低 NO_x でしかも無煙燃焼が実現されている一方、通常のディーゼル燃焼と比較して THC と CO が多量に排出されている。さらに、予混合圧縮

Fig. 3 Exhaust emissions and BSEC in the premixed lean CI and ordinary diesel operation with diesel fuel

着火燃焼が可能な運転範囲は、ノッキングと失火によって制限され、正味平均有効圧が 0.3 MPa 以上 ($\lambda < 3$) では、過早着火によるノッキングが発生して運転が困難となる一方、無負荷 ($\lambda > 5$) では失火に至る。

3・2 予混合圧縮着火機関の燃焼室内および排気中のガス組成 図 4 は、予混合圧縮着火および通常のディーゼル燃焼における未燃ガス濃度の推移とインジェクタ線図の解析結果をそれぞれ比較して示している。この場合、空気過剰率は 4 で、燃料はモデル燃料 A であり、縦軸の T_{mean} は圧力から計算したシリンダ内ガスの平均温度である。予混合圧縮着火燃焼の熱発生率線図には 15°CA BTDC 付近で小さな発熱が明らかに認められた後、比較的緩やかで大規模な燃焼が行われており、典型的な希薄予混合圧縮着火燃焼の様態を呈している。

燃焼室内の THC および CO 濃度は、通常のディーゼル燃焼に比べて予混合圧縮着火燃焼のほうが終始著しく高濃度で推移している。これら予混合圧縮着火燃焼の未燃成分は、主燃焼が終了した 20°CA ATDC 以

Fig. 4 THC and CO concentrations in the in-chamber and exhaust gases, pressure, mean gas temperature, and rate of heat release in premixed lean CI and ordinary diesel combustion with model fuel A ($\lambda=4$)

降においても、酸素が残留していて酸化が進行するのに足るガス温度であるにもかかわらず、濃度が一定かあるいはむしろ増加する傾向を示し、排気ではさらに高い濃度となっている。特にこの THC の推移特性は、圧縮行程中に燃焼室壁面に付着した一部の燃料が主燃焼終了後の膨張行程から排気行程にかけて蒸発し、その蒸発量が酸化量と均衡しているか、あるいは若干大きくなっていることによるものと考えられる。

また、燃料噴射量を考慮すれば圧縮行程着火前での THC 濃度は、燃焼室内を完全均一と仮定すると 10 000 ppmC 以上になるはずであるが、サンプリングによる計測値が 2 000 ppmC 以下と著しく低くなっている。この結果から壁面に付着している燃料がかなり多いこと、あるいは採取位置から離れているキャピティ底部に濃混合気が滞留していることが推察される。

図 5 は、図 4 と同一条件の予混合圧縮着火燃焼時の燃焼室内および排気中における未燃炭化水素の成分割合 (HC/THC: メタン換算濃度で採取ガス中の全炭化水素に占める各成分の割合) を示している。なお、図 5 の上に位置する燃料成分ほどセタン価が高くなっている。主燃焼期間中に燃料成分よりも低沸点の分解成分が急速に生成されているが、この成分を別とすれば燃焼室内および排気中における各成分割合の変化は極め

Fig. 5 HC fractions in the in-chamber and exhaust gases in the premixed lean CI combustion with model fuel A ($\lambda=4$)

Fig. 6 In-cylinder pressure, mean gas temperature, and rate of heat release in the premixed lean CI combustion for three excess air ratios with diesel fuel

て大きなものではなく、特にこの場合のように多種少量の成分からなる燃料を用いた実験によっては、分子構造あるいはセタン価などが異なる成分の割合の推移にも大きな差異は認めにくい。しかし、各成分の中で沸点が最も低いキシレンが燃焼開始直後から終始低い割合を示す一方、高蒸留温度のノルマルパラフィンの割合が膨張行程後半から排気にかけて増加していることから、未燃炭化水素組成に対して沸点の影響が示唆される。未燃炭化水素組成に対する燃料成分の着火性および沸点による影響については後に詳述する。

Fig. 7 THC and CO concentrations in the in-chamber and exhaust gases for three excess air ratios with diesel fuel

3・3 空気過剰率が燃焼室内および排気中のガス組成に及ぼす影響

図6は、空気過剰率 λ をパラメータとして予混合圧縮着火燃焼のシリンダ内平均温度、圧力および熱発生率を示している。ここでは通常の軽油を燃料としており、空気過剰率 $\lambda=3$ は過早着火によるノッキング限界の正味平均有効圧BMEP=0.3 MPaに、 $\lambda=4$ は静粛で安定した燃焼が得られるBMEP=0.2 MPaに、 $\lambda=5$ は失火限界となるBMEP=0.05 MPaにそれぞれ対応する。主燃焼の前に小さな熱発生がいずれの空気過剰率においても見受けられ、特に $\lambda=3$ の場合には他の二者に比較してこの熱発生量が大きく、その時期も早くなっている。一方、 $\lambda=4$ と $\lambda=5$ の指圧線図および熱発生率に差異はさほどないが、主燃焼後の平均温度は $\lambda=4$ に比較して $\lambda=5$ の場合は著しく低くなっている。

図7は、図6における3条件の希薄予混合圧縮着火燃焼に対するシリンダ内および排気中の未燃THCとCOの各濃度を示している。 λ が3および4の場合には主燃焼開始時からTHCが顕著に低下すると同時にCOが生成されているのに対し、失火限界に当たる $\lambda=5$ ではほかの二者に比較して主燃焼時におけるTHCの減少量が小さく、COの増加がさらに顕著である。また、いずれの空気過剰率でも図4で示したモデル燃料Aの結果と同様に主燃焼が終了した後のシリンダ内THCはあまり変化せずに推移する。しかし、燃料Aに比較して通常の軽油を用いたこの場合にはTHCとCO濃度が2倍以上と著しく高く推移している。この原因として通常の軽油には多様な高沸点

Fig. 8 HC fractions in the in-chamber and exhaust gases for three excess air ratios with diesel fuel

成分が含まれていることが考えられる。

図8は、図6および図7と同一条件における未燃炭化水素組成の推移を示している。なお、炭素数で12以下はおもに分解成分を、13~15は燃料成分を、16以上は燃料の重縮合成分を若干含む燃料成分をそれぞれ主成分としている。ノッキング限界である $\lambda=3$ では、燃料の分解成分と考えられる炭素数12以下の成分の割合が終始大きく、発熱が開始する前に分解反応がかなり進行していることが明らかである。一方、 $\lambda=4$ および $\lambda=5$ では炭素数が13から15の燃料成分が未燃炭化水素の主体となっており、燃料成分がほとんど変化せずにそのまま排出されている。

3.4 採取位置によるガス組成の差異 予混合圧縮着火燃焼では通常のディーゼル燃焼に比較して混合気の均一性が著しく高いと思われるが、前述したように壁面近傍では燃料の付着などにより炭化水素濃度が高くなっていることが推察される。図9は、通常の軽油を燃料とした際のガス採取位置によるTHCおよびCO濃度推移の差異を示している。この場合のガスの採集位置は、図2に示すシリンダヘッド近傍、燃焼室中央、およびピストンキャビティ底部の3箇所である。なお、キャビティ底部の採取は、ピストンが移動するため上死点付近に限定される。図9において、キャビティ底部のTHC濃度はほかの2箇所に比較してかなり高くなっていることから、噴射燃料が壁面に著

Fig. 9 THC and CO concentrations in the in-chamber and exhaust gases at different sampling positions with ordinary diesel fuel ($\lambda=4$)

しく付着すると同時に、これが予混合圧縮着火燃焼における排出THCの増加に大きく関与しているものと思われる。一方、膨張行程では採取位置によるTHC濃度の差異が小さいのに対し、圧縮行程中ではシリンダヘッド近傍の濃度が燃焼室中央部に比較して低いことから、3.2節で述べたように早期噴射を行ったとしても膨張行程に比べて圧縮行程では混合気の不均一性がかなり強いことが明らかである。

3.5 燃料成分の着火性がガス組成に及ぼす影響

前述のように、通常の軽油を用いた際のTHCおよびCO濃度(図7)は、モデル燃料Aの各濃度(図4)に比較して終始高く推移していた。この原因として、通常の軽油がモデル燃料に比べて多様な低着火性成分あるいは高沸点成分などを含んでいることが考えられる。そこで、燃料成分の着火性とガス組成との関係をより明らかにするため、高着火性のノルマルトリデカンと低着火性のテトラリンからなるモデル燃料Bを用いて実験を行った。図10は、モデル燃料Bを用いた際のインジケータ線図の解析結果およびTHCとCOの各濃度推移を示している。図4に示したモデル

Fig. 10 THC and CO concentrations in the in-chamber and exhaust gases, pressure, mean gas temperature, and rate of heat release diagrams with model fuel B ($\lambda=4$)

Fig. 11 Hydrocarbon fractions in the in-chamber and exhaust gases with model fuel B ($\lambda=4$)

燃料 A の結果と同様な結果が得られているが、膨張行程および排気中における THC 濃度は、沸点が比較的高いノルマルパラフィンを主成分とするモデル燃料 A に比べて燃料 B ではさらに低く推移している。

図 11 は、モデル燃料 B を用いた予混合圧縮着火燃焼時のシリンダ内および排気中における未燃炭化水素の成分分析結果である。着火性の低いテトラリンが初期の小さな熱発生から主燃焼にかけてその割合が著しく減少し、その後 100°CA ATDC までほぼ一定で推移するのに対し、着火性が高いノルマルトリデカンの割合は初期の小さな熱発生時に若干増加した後、排気

Fig. 12 THC and CO concentrations in the in-chamber exhaust gases, pressure, mean gas temperature, and rate of heat release diagrams with model fuel C ($\lambda=4$)

Fig. 13 Hydrocarbon fractions in the in-chamber and exhaust gases with model fuel C ($\lambda=4$)

に至るまではほぼ一定で推移する。このような着火性が低いテトラリンのほうが燃焼過程でかなり減少するという予せぬ結果は、ノルマルトリデカンの沸点が 234°C とテトラリンの 207°C に比べて若干高いことが混合気形成を阻害する方向に大きく作用したためと考えられる。いずれにせよ早期燃料噴射による予混合圧縮着火燃焼において、燃料成分の着火性は未燃炭化水素組成に対しさほど大きな影響を与えないことがわかる。

3・6 燃料成分の沸点がガス組成に及ぼす影響

3・5 節で燃料成分の沸点による影響が示唆されたこ

Fig. 14 Relationship between boiling points of components in model fuels and percentage of unburnt components in injected fuel ($\lambda=4$)

とから、その結果をより明確にするために、沸点の異なる3種類のノルマルパラフィンからなるモデル燃料Cを用いて実験を行った。図12は、モデル燃料Cを用いた際のインジェクタ線図の解析結果および未燃THCとCOの各濃度推移を示している。いずれもモデル燃料A、Bと同様な特性が得られており、燃焼自体には燃料によって大きな差異がないことがわかる。

図13は、モデル燃料Cを用いた際のシリンダ内および排気中の未燃炭化水素成分割合を示している。燃焼過程において沸点が低いノルマルヘプタンとノルマルデカンの割合は顕著に減少し、いったん消失にさ至っているのに対し、沸点が最も高いノルマルトリデカンは燃焼過程で相対的に増加した後も排気に至るまで終始全未燃炭化水素の50%以上を占めている。したがって、予混合圧縮着火燃焼における排出未燃炭化水素は、壁面に付着した燃料の高沸点成分が大きく関与していることが理解でき、燃料の低蒸留温度化が未燃炭化水素低減に有効であるものと考えられる。

燃料の沸点成分の影響をさらに明確に示したのが図14である。図14は、前述した三つのモデル燃料を総括して横軸に各成分の沸点を、縦軸に噴射燃料中の各成分の中で排気まで未燃のまま残留したものの割合(未燃残留割合: HC_{ex}/HC_{fuel})を取っている。モデル燃料Aに含まれる各成分の未燃残留割合が相対的に高めではあるが、沸点が高くなるほど未燃残留割合が増加しており、特に150~180°C付近でその増加が顕著である。キャビティの壁面温度は150~180°C程度⁽⁶⁾であると推定されることから、壁面温度より高い沸点成分が未燃炭化水素に大きく関与していることが考えられる。

4. 結 論

本研究では、通常のディーゼル機関の圧縮比を12に低下させ、噴射方向のみを変更しただけの予混合圧縮着火機関に関し、シリンダ内および排気中におけるガスを高速ガスサンプリングシステムとガスクロマトグラフを用いて分析し、おもに未燃炭化水素の組成推移特性と発生機構の解明を試みるとともに燃焼特性についても検討した。その結果を要約するとおよそ以下のとおりである。

(1) 予混合圧縮着火機関の燃焼室内におけるTHCおよびCO濃度は、通常のディーゼル機関に比べて終始極めて高く推移する。この未燃炭化水素の増加は、噴射燃料が衝突するキャビティ底部のTHC濃度が燃焼室中央部やシリンダヘッド壁面付近の濃度に比較してかなり高いことから、燃焼室壁面に付着した噴射燃料が膨張行程から排気行程にかけて蒸発することに大きく起因しているものと考えられる。

(2) 予混合圧縮着火燃焼では、高沸点の燃料成分ほど未燃で排出される割合が高くなる。

(3) 燃料成分の着火性は未燃炭化水素の組成にさほど大きな影響を与えない。

(4) 予混合圧縮着火機関において、空気過剰率の増加に伴って失火限界に接近すると、燃焼・酸化によるシリンダ内THC濃度の減少量が少なくなる一方、COの生成量が大きくなる。

(5) 空気過剰率の低下に伴ってノッキング限界に近づく、圧縮行程の熱発生以前から分解成分と思われる低沸点炭化水素が多く生成されるのに対し、それ以外の条件ではそのような分解成分がほとんど生じない。

本研究を遂行するに当たり北海道大学大学院学生 酒井厚君、同 南昌宏君、ならびに当時北海道工業大学学部学生 木暮仁君、同 石戸谷拓君の協力を得た。ここに謝意を表する。

文 献

- (1) Takeda, Y., Nakagome, K. and Niimura, K., SAE Paper, No. 961163 (1996).
- (2) Yokota, H., Kudo, Y., Nakazima, H., Kakegawa, T. and Suzuki, T., SAE Paper, No. 970891 (1997).
- (3) Yanagihara, H., Sato, Y. and Mizuta, J., Proc. 17th Int. Viena Motor Symp. (1996), 303-314.
- (4) 三輪恵・濱地康之・池上詢, 機論, 45-398, B (1979), 1566-1575.
- (5) 池上詢・三輪恵・李新和, 機論, 51-471, B (1985), 3810-3816.
- (6) イマンレクソワルドヨ・北村融・小川英之・宮本登・榎本良輝, 機論, 61-590, B (1995), 3581-3587.