壁面蒸発式エタノールディーゼル機関の燃焼*

(グロープラグによる燃焼)

佐々木 洋士*¹ 手代木 尚久*¹

Combustion of an Ethanol Diesel Engine with an M-combustion System
(Ignition by a Glow Plug)

Hiroshi SASAKI and Naohisa TESHIROGI

This paper gives the experimental results obtained with a two-stroke cycle single-cylinder research engine using an electrically heated combustion chamber to simulate the combustion chamber of a low-heat-rejection(LHR) DI diesel engine with an M-combustion system. In this report, the experiment was performed to apply the ethanol to a LHR DI diesel engine with an M-combustion system by hot surface ignition using a glow plug. It was found that the ignition and combustion of the ethanol is greatly affected by the combustion chamber surface temperature and the ethanol mixture is self-ignited by increasing the combustion chamber surface temperature to a very high level.

Key Words : Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Combustion, Ignition, Fuel, M-combustion System, Surface Temperature, Model Combustion Chamber, Ethanol

1. ま え が き

アルコール燃料をディーゼル機関に適用する代表的な方法として、軽油との混合、吸気管噴射(fumigation)、着火促進剤(セタン価向上剤)添加、軽油のパイロット噴射による二噴射式、火花点火や熱面によるアルコール噴霧の強制着火等が挙げられ、それぞれ適用する上で得失がある。この中で、強制着火方式による直接噴射式アルコール機関は、熱効率が本質的に優れるディーゼル機関の利点が活かされることから、高性能、高効率、低公害機関が実現されるものとして期待が大きい。しかし、強制着火方式による直接噴射式アルコール機関では、着火源における着火の安定性や可燃混合気の形成⁽¹⁾⁽²⁾が最大の課題であり、また、混合気の形成法はその後の燃焼にも大きな影響を与える。

そこで本研究は、混合気の形成法に特徴を持つ壁面蒸発燃焼機関において、グロープラグによる熱面着火方式をエタノールに適用した場合の基本的な燃焼特性

を実験的に明らかにすることを目的とした。特に、本研究では、混合気の形成及び燃焼に大きな影響を及ぼす燃焼室壁面温度に着目し⁽³⁾、実験は、壁面温度を大幅に変えることができるモデル燃焼室を二サイクル機関に取り付け、これをモータリングしておき、1サイクルのみ燃料を噴射、燃焼させ、そのときの指圧線図を解析する方法で行なった⁽³⁾⁽⁴⁾。

2. 実験装置および方法

2.1 モデル燃焼室 モデル燃焼室の構造、主要諸元をそれぞれ図1、表1に示す。モデル燃焼室は短い円筒形で、燃料噴射ノズルは円周部に取り付けられ、ノズルの噴射角を選ぶことにより任意の方向に燃料を噴射することができる。グロープラグ(外径約6mm、容量100W)は、図1に示すようにスワールの流れに垂直となるように燃焼室内に挿入されている。また、燃焼室円周上部約160degにわたって電気ヒータ(約150W)が取り付けられ、壁面温度を運転状態において約550Kから800Kまで変化させることができる。

* 平成元年10月15日 第67期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成元年4月10日。

*¹ 正員、千葉大学工学部(〒260 千葉市弥生町1-33)。

壁面温度は図1に示すA点で測定し、この値で壁面温度を代表させた。燃焼室への連絡口が偏心しているので、圧縮行程中に強いスワールが燃焼室内に生成される（スワール比約10）。また、連絡口の面積比が4%と通常の渦流室機関と比べて大きいので、燃焼室全体の形状は渦流室式であるが、初期及び中期の燃焼過程に限定すれば、渦流室の部分は吸気スワールを強化した小形直接噴射式ディーゼル機関の燃焼室とみなすことができる。なお、燃焼室内壁円周部および側壁部は共に熱伝導率の小さいステンレス鋼を用い、その肉を厚くとり、加熱部以外の燃焼室壁面温度も高温を保つようにした。

2.2 実験装置の構成 機関本体の主要諸元、実験装置の構成をそれぞれ表2、図2に示す。モデル燃焼室を取り付けた機関本体は同期電動機によりVベルトを介して約470rpmの一定回転速度で駆動される。燃料はタンクから流量計を経て燃料噴射ポンプへ導かれる。また、ノズルからの戻りの量も測定される。燃料噴射ポンプ（プランジャ径7mm）は、クランク軸からタイミングベルトで駆動され、プーリの取り付け位相を変えて噴射時期を任意に設定できる。燃料はポンプの燃料ラックを、噴射量零の位置から任意の噴射量位置まで、ソレノイドで急速に移動させることにより1

回だけ燃焼室に噴射される。このソレノイドは、下死点信号を任意の数だけ間引き、間引いた後の下死点信号から噴射時期に同期するように一定のクランク角度だけ遅延する回路によって発生する信号で作動するので、機関は任意の回転間隔で燃焼させることができる。吸入空気はサージタンク（約180L）入口に取り付けられた丸型ノズルで流量を測定された後、吸気加熱装置を経て供給される。燃焼圧力はピエゾ指圧計（キスラー601A）により渦流室で測定し、また、各部の温度は壁面温度の他、吸入空気温度を機関の入口および掃気ポート部において、排気温度を排気ポート出口約150mmの位置で、CA熱電対でそれぞれ測定した。

表1. モデル燃焼室の主要諸元

Type	Swirl Chamber
Volume of Combustion Chamber	35.3 cm ³
Compression Ratio	20.8 : 1
Compression Ratio at Scavenging Port closed	16.8 : 1
Volume of Combustion Chamber / Clearance Volume	68.5 %
Passage Area / Cylinder Bore Area	4.0 %

表2. 機関本体主要諸元

Type	Two-Stroke-Cycle Single Cylinder
Bore	90 mm
Stroke	110 mm
Swept Volume	700 cm ³
Scavenging System	Loop Scavenging
Scavenging Port Timing	61 degABDC & BBDC
Exhaust Port Timing	71 degABDC & BBDC

図1. モデル燃焼室の構造

図2. 実験装置の構成

2.3 実験方法 実験は、5回転に1回の割合で燃料を噴射、燃焼させ、空気過剰率約2.1、吸入空気温度453K一定とし、グロープラグ温度、壁面温度及び噴射時期を変化させて行なった。なお、壁面温度を変えても吸入空気量は変わらないので、燃料噴射量はすべて同一である。ノズルの噴口径は0.3mm、開弁圧は16.7MPaとした。噴射方向は、図1に示すように、燃焼室中心線に対して75degの角度で、燃焼室壁面の加熱部に直接当たり、スワールに沿う方向とした。この場合、燃料の壁面までの到達距離は約14mm、噴射期間は約11degCAである。この噴射方向では燃料噴霧がグロープラグに直接触れないので、壁面に付着した燃料が蒸発し、形成される混合気がスワールによって流され、グロープラグの熱面に達するものと考えられる。燃焼圧力は連続する50サイクル採取し、そのアンサンブル平均の指圧線図から燃発生率等を算出し、さらに一部の条件では、50サイクル中の前半の30サイクルについて、個々に検討した。使用したエタノールは、変性99%合成エタノールで、潤滑剤としてステアリン酸を約1wt%溶解してある。

3. 実験結果および考察

3.1 着火に及ぼすグロープラグ温度の影響 図1に示す噴射方向とグロープラグの位置関係におけるエタノール混合気の着火性を確認するために、グロープラグ温度を変えて実験を行なった。グロープラグ電流 I_g とグロープラグ温度の関係を表3に示す。なお、

表3. グロープラグ温度

Current I_g	A	6	7	8	9
Output Power	W	43	59	78	100
Temperature	K	894	999	1093	1187

図3. 指圧線図(30サイクル、グロープラグ電流の影響)

温度の測定は大気中である。噴射時期 $IT=10\text{degBTDC}$ 、壁面温度 $T_s=673\text{K}$ において、グロープラグの電流を6Aから9Aまで変えた場合の30サイクルの個々の指圧線図及び30サイクルの最高圧力、最大圧力上昇率、着火時期をそれぞれ図3、4に示す。図3から、本実験のように、エタノール噴霧が直接触れない位置にグロープラグがある場合でも、エタノールの着火が可能となることがわかる。すなわち、壁面に付着したエタノールが蒸発、形成された混合気がスワールで流され、グロープラグの位置に達し、着火することが明らかである。しかし、電流が6Aと、グロープラグ温度が比較的低い場合でも一応着火が可能であるが、着火時期、最高圧力の変動がかなり大きい。これに対して、電流を7A以上にして、グロープラグ温度を高くした場合には、着火時期、最高圧力の変動は小さくなり、また、平均的な着火時期も前進し、着火遅れが短縮される。しかし、電流が9Aの場合では、エタノールの噴射開始とほぼ同時に着火して、着火遅れが極めて短くなるサイクルが現れ、逆に着火時期の変動が大きくなるが、それ以外のサイクルの着火時期の変動はさらに小さくなる。これは、エタノール混合気が自己着火する温度に達するのに必要な時間が、グロープラグ温度の上昇とともに短くなるためと考えられる。以上のことから、着火の安定性、サイクル変動を考慮し

図4. 燃焼特性値(30サイクル)

て、以下の実験は、グロープラグの電流を7 Aで行なった。

3・2 燃焼に及ぼす壁面温度の影響 噴射時期4 degBTDCにおいて、30サイクルの指圧線図を、壁面温度が低い場合と、高い場合についてそれぞれ図5に示す。壁面温度が低く、噴射時期を4 degBTDCと遅くした場合では着火は上死点後となり、その時期も大幅に変動している。しかし、壁面温度を高くすることによって、この変動は小さくなる。一方、図6に示すように、壁面温度が非常に高くなった場合では、グロープラグ温度が高くなった場合と同じように、着火遅れが極めて短くなるサイクルが現れることがわかる。

図7に、50サイクルのアンサンブル平均の指圧線図から読み取った、最高圧力 P_{max} 、最大圧力上昇率 $(dP/d\theta)_{max}$ 、着火遅れを示す。最高圧力は噴射時期4 degBTDCの場合を除いて、壁面温度が上昇するほど低下し、最大圧力上昇率も低くなる傾向を示す。また、着火遅れは、壁面温度が低い段階では壁面温度の

(a) 壁面温度が低い場合

(b) 壁面温度が高い場合

図5. 指圧線図(グロープラグ電流:7A)

上昇とともに急激に前進するが、壁面温度が高くなるのにしたがって前進の割合は小さくなり、着火時期はほぼ一定になる。しかし、壁面温度が750 K以上ではそれからさらに着火遅れが短縮される。これは、図6に示すように、壁面温度が非常に高い場合では、着火遅れが極めて短くなるサイクルが現れ、このようなサイクルを含めた50サイクルの平均の指圧線図より着火時期を求めたためである。なお、噴射時期4 degBTDCで、壁面温度の上昇とともに最高圧力、最大圧力上昇率が高くなるのは、着火時期が上死点後となるので、着火遅れの短縮とともに着火時期が上死点に向かって

図6. 指圧線図(グロープラグ電流:7A)

図7. 燃焼特性値(壁面温度の影響)

進むためである。

次に、50サイクルのアンサンブル平均の指圧線図、燃焼経過をそれぞれ図8、9、10に示す。指圧線図では、壁面温度を高くすることにより、明らかに着火時

図8. 燃焼経過(グロープラグ電流:7A, IT=4 deg BTDC)

図9. 燃焼経過(グロープラグ電流:7A, IT=7 deg BTDC)

図10. 燃焼経過(グロープラグ電流:7A, IT=10 deg BTDC)

期が進み、特に、壁面温度が低い時では、僅かな壁面温度の上昇で大幅に着火時期が進むことがわかる。また、最高圧力は、4 deg BTDCの場合を除いて、壁面温度が高くなると低下している。熱発生率は、鋭いピークとなだらかな丘をなす形状を示し、予混合燃焼と拡散燃焼とに区別されると考えられる。熱発生率では、壁面温度を高くするほど予混合燃焼のピークが低下し、その時期も進むことがわかる。しかし、拡散燃焼は壁面温度の上昇による変化は比較的小さく、グロープラグによるエタノールの壁面蒸発燃焼では、壁面温度の影響は、予混合燃焼には大きく、拡散燃焼には小さいことがわかる。

これらの壁面温度の影響は次のように説明される。壁面温度が高くなるほど壁面に付着したエタノールの蒸発が活発となって、可燃混合気の形成が速くなり、着火遅れが短縮される。このために、着火遅れ期間中に形成される予混合気量も増加せず予混合燃焼のピークが低下する。すなわち、予混合燃焼に及ぼす壁面温度の影響は、着火遅れ期間中における予混合気形成速度や予混合気量が異なることで説明することができる⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、着火時期、それに続く予混合燃焼に及ぼす壁面温度の影響は非常に大きく、また、エタノールの沸点を考慮すると、壁面温度が低い場合でもエタノールの蒸発は比較的速いと考えられる。したがって、高温の壁面はエタノールの蒸発を促進し、エタノール混合気の形成量を増加させるだけでなく、さらに、エタノール蒸気や混合気を加熱し、グロープラグでの着火を促進させる効果も大きいと考えられる。すなわち、高温の壁面は、着火の前に混合気の温度を高め、グロープラグにおける着火を容易にしているものと考えられる。これは、3.1においてグロープラグ温度により着火遅れが変わることから説明することができる。

一方、拡散燃焼において、壁面温度の影響が小さく、燃焼終了も壁面温度でそれほど変わらないのは、エタノールの蒸発は壁面温度が低い場合でも比較的早く終了し、その結果、拡散燃焼はエタノール蒸気と空気との混合速度で律速されるためと考えられる。このために、燃焼終了は壁面温度の変化ではそれほど変わらず、壁面温度を高くした場合では着火時期が進むのでその分燃焼期間が長くなり、燃焼全体に占める拡散燃焼の割合が多くなっている。なお、ここでは燃焼の終了を熱発生率が0となる付近と判断した。

3.3 壁面温度の高温化による熱面着火 グロープラグ温度が比較的低い状態でも燃焼が可能となることは図3より明らかである。そこで、壁面温度の高温

図11. 指圧線図(30サイクル)

化のみでの熱面着火を試みた。噴射時期を13degBTDCまで進め、壁面温度を843Kまで上昇させた場合における連続する30サイクルの指圧線図を図11に示す。この図から、明らかに、噴射時期を進め、壁面温度を高くすればグロープラグの着火補助が無くとも比較的安定した着火が行なわれ、燃焼が可能となることがわかる。しかし、着火遅れが極めて長くなるので、燃焼は急激となり、最高圧力、最大圧力上昇率が高くなる。

このような高温の壁面のみによる燃焼は、壁面に付着したエタノールの蒸発とともに、高温の壁面から熱を受け、高温の混合気を形成し、自己着火する結果と考えられる。すなわち、高温の壁面は、壁面に付着した燃料の蒸発を促進し、混合気の形成を活発にするだけでなく、さらにエタノールを加熱し、混合気を着火しやすい状態にして自己着火を可能としたものと考えられる。以上のことは、3・2において、壁面温度の高温化はエタノール混合気を高温にしてグロープラグでの着火を容易にすると考察したことを裏付けている。また、混合気が自己着火直前のような着火しやすい状態になれば、火花点火のようなエネルギーの小さい着火補助でも、着火が容易と考えられ、特に、火花点火に

よれば、着火位置や着火時期の設定の自由度が大きいので、グロープラグに比べて有利と考えられる。

4. ま と め

以上、壁面蒸発式エタノールディーゼル機関において、グロープラグによる燃焼に及ぼす壁面温度の影響をまとめると以下のようになる。

(1) 壁面蒸発燃焼方式で、グロープラグによりエタノールは確実に燃焼が行なわれる。また、グロープラグ温度が比較的低い場合でも着火する。

(2) 壁面温度の高温化により、着火遅れが大幅に短縮される。これは、エタノールが高温の壁面から蒸発するので、混合気を高温にし、着火しやすい雰囲気にする効果による。

(3) 噴射時期を進め、壁面温度を非常に高くした場合では、グロープラグによる着火補助なしでも燃焼が可能である。

本研究において、壁面温度の範囲、燃料噴射量、噴射率、噴射時期、回転数、スワール強度、排出ガス特性などの影響について、さらに追究する必要がある。しかし、アルコール燃料をディーゼル機関に適用する方法として、一つの可能性が示されたものと考えられる。終りに、実験に協力された当時本学学生の小野塚誠君、峯野猛君に謝意を表する。

文 献

- (1) 金野・瀬古・酒井・堀、自動車技術会学術講演会前刷集862、(1986)、587。
- (2) 瀬古・堀、自動車技術会学術講演会前刷集872、(1987)、609。
- (3) 佐々木・手代木、機論、51-472、B (1985)、4117。
- (4) 佐々木・手代木、機論、52-484、B (1986)、4094。

討 論

〔質問〕 西 脇 一 宇〔立命館大学理工学部〕

図8～10によれば、壁温の高いほど予混合燃焼期間の燃焼率が低減し、その結果燃焼質量割合も低下している。このことは高温壁では壁への熱損失が増大することを意味するのか。

〔回答〕 図8～10において、壁面温度が高くなるのにしたがって、着火時期が大幅に進み、その結果、予混合燃焼のピークが低下し、この期間における燃焼

割合も低下している。しかし、拡散燃焼期間では、壁面温度を高くしても、熱発生率に大きな差はみられず、また、燃焼割合は、ほぼ上下に平行移動したように変化しており、壁面温度は拡散燃焼には大きな影響を及ぼさないことを示している。したがって、壁面温度を高くした場合において、燃焼割合が低下するのは、壁面温度の上昇により、大幅に着火遅れが短縮され、着火遅れ期間中における予混合気量が少なくなり、予混

合燃焼量が減少するためと考えられる。

なお、本モデル燃焼室において、壁面が高温となる加熱面の面積は、上死点においても、燃焼室総表面積の約6%で、ご指摘のような高温の壁面によって冷却損失が増大することの影響は小さいものとする。

〔質問〕 青 柳 友 三〔日野自動車工業(株)〕

例えば図9において熱発生率の積分値(質量燃焼割合)に差が出ているのは、燃料の一部が未燃で排出されたことを意味するののか。

〔回答〕 西脇氏への回答をご参照いただきたい。

56 巻 522 号, B 編 (1990-2) 正誤表

執筆者名	ページ	欄	行	誤	正
相原利雄ほか	530	右	13	$(\nabla \cdot \rho V l) =$	$(\nabla \cdot \rho V i) =$
原口忠男ほか	548	右	15	…エチレンアルコール…	…エチルアルコール…