直接噴射式希薄予混合圧縮着火機関における 着火時期制御に関する研究*

原田 明^{*1}, 浅海 靖男^{*2}, 青柳 友三^{*1}

A Study of Ignition Timing Control on Premixed Lean DI Compression Ignition Engine

Akira HARADA^{*3}, Yasuo ASAUMI and Yuzo AOYAGI

^{*3} New ACE Institute Co., LTD., 2530 Karima Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0822 Japan

Recently, pre-mixed lean combustion has gained the attention of many researchers, who are investigating compression ignition characteristics of this type of mixture. Previous research in our laboratory has shown that low NO_x combustion can be obtained by PREDIC (PREmixed lean Diesel Combustion). While NO_x emissions were very good, the fuel consumption was greater than that of a conventional engine, due to a lack of ignition timing control. So in this study, ignition timing control was attempted using two fuels. Results showed that ignition timing control was possible using a low cetane fuel (such as methanol or α -methyl naphthalene) after the diesel fuel main injection. The injection timing and quantity of methanol affected the ignition timing of PREDIC.

Key Words: Diesel Engine, Fuel Injection, Premixed Combustion, Emission, Ignition Timing Control

1. ま え が き

ディーゼル機関は熱効率がよく、CO₂排出量が少ないため地球温暖化の観点から注目されているが、その一方で都市の環境改善のためにさらなる排出ガス低減が求められている。近年低NO_xな燃焼が可能である希薄予混合燃焼が注目され、数多くの報告がなされている^{(1)~(7)}。武田ら⁽⁷⁾は早期燃料噴射によって希薄予混合ディーゼル燃焼(Premixed Lean Diesel Combustion: 以下 PREDIC と略す)を実現し、筆者らもその低NO_x燃焼について報告⁽⁸⁾を行ってきた。しかし、PREDICでは着火時期の制御が難しいため、運転領域が狭いことおよび燃費が悪化することなど解決すべき問題がある。従来燃焼では着火が可能な雰囲気中に燃料を噴射しており、着火遅れは空気と燃料の物理的な混合時間が化学的な反応の時間よりも支配的であり、噴射時期で着火時期をほぼ制御できる。一方、本方式では噴射時期が早期であり着火までの物理的な混合時間は噴射時期では制御できず、結果的に化学的な反応が支配的となるため⁽⁹⁾着火時期の制御が困

難である。PREDICに通常の軽油を用いた場合ではセタン価が高いために過早着火をする。予混合圧縮着火機関を成立させるために着火時期の制御方法の確立が不可欠であり、着火特性に関する研究および種々の着火時期制御の試みが行われている。たとえば着火特性に関しては2ストローク機関において種々の燃料を供試した研究⁽⁹⁾がある。着火時期制御に関しては気体燃料を用いてオクタン価の異なる2種の燃料の混合割合を変化させる方法⁽²⁾、着火源としての燃料を筒内に噴射する方法⁽³⁾、吸気管への水噴射⁽¹⁰⁾などがある。また天然ガスによる予混合圧縮着火機関では微量のホルムアルデヒドを吸気管から供給することにより着火時期の制御を行った報告⁽¹¹⁾もある。液体燃料を用いた場合ではEGR⁽¹²⁾、吸気中への不活性ガスの供給⁽¹³⁾、早期噴射の後に着火源としての燃料を筒内に噴射する方法⁽¹⁴⁾、燃料のセタン価の変更⁽⁷⁾、低セタン価燃料であるメタノールを燃料として用いる方法⁽¹⁵⁾、セタン価の異なる含酸素燃料を軽油へ混合する方法⁽¹⁶⁾などが試みられている。しかしPREDICのような直接噴射式希薄予混合圧縮着火機関において、着火を支配している筒内ガス温度と燃料の着火性に注目した研究は少ない。そこで本研究では直接噴射式希薄予混合圧縮着火機

* 原稿受付 2000年10月17日。

^{*1} 正員、(株)新エシシー研究部(☎ 305-0822 つくば市刈間 2530)。

^{*2} (株)新エシシー研究部。

E-mail: haradaa@olive.ocn.ne.jp

Table 1 Engine specifications and test condition

Engine type	DI 4-cycle Single cylinder		
Bore × Stroke	135mm × 140mm		
Displacement	2004cm ³		
Cylinder head	2intake, 2exhaust valves		
Combustion chamber	φ98mm shallow dish		
Compression ratio	16.5		
Swirl ratio	0.5		
Injection system	Accumulator type		
Injector	Center	Side	
Injection nozzle	Pintle type	φ0.17mm × 2-2	←
Injection pressure	100MPa	50MPa	100MPa
Fuel	Diesel fuel JIS#2	Methanol	α-MN*

* α-methyl Naphthalene

Fig. 1 Schematic diagram of injection system

Table 2 fuel properties

	JIS#2	Methanol	α-MN*
Cetane Number	62	3	0
Density g/cm ³	0.828	0.797	1.027
Viscosity @303K ×10 ⁻⁶ m ² /s	4.048	0.705	2.594
Calorific value J/g	42617	20112	39140
Distillation			
IBP K	461		
T50 K	556	BP 337	BP 517
T90 K	612		
EP K	640		
Heat of vaporization kJ/kg	177	1080	319
Aromatic content vol-%	29.8	0	100
Sulfure content mass-ppm	400	0	15000

* α-methylnaphthalene

Fig. 2 Spray locations

関において、セタン価の異なる2種類の燃料を筒内に早期噴射し、燃料の着火性と燃料の持つ蒸発潜熱により筒内ガス温度を同時に変化させることで着火時期の制御を試みた。

2. 実験装置

2・1 供試機関 実験に用いたエンジンは直接噴射式の水冷4サイクル単気筒ディーゼル機関である。主な仕様を表1に、また実験装置図を図1に示す。燃料噴射装置は蓄圧式であり高速電磁弁の開閉で噴射の開始、終了を制御するシステムである。エンジンには3本のインジェクターが搭載されており、各インジェクターの噴射時期・噴射量はそれぞれ独立に制御できる。このうち中央に配置されたインジェクターにはシート上部に2本のスワール溝を有しているピントルタイプのノズルを用いている¹⁰⁾。シリンダヘッドの両側には着火時期制御用の燃料を噴射するために2本のノズル(噴孔径0.17mm噴孔数2)が装着されている。なお燃焼室は燃焼室径がφ98mmの浅皿型である。

2・2 供試燃料 供試燃料は主燃料としてセタン価62のJIS2号軽油を、着火時期制御用としては着火時期の遅延を目的としているため、低セタン価で蒸発潜熱が大きいメタノールと低セタン価で蒸発潜熱がメタノールの約1/3であるαメチルナフタレン(以後α-MNとする)を用いた。供試燃料の性状を表2に示す。

2・3 実験方法 図2に示すように主燃料となる軽油を中央に配置されたインジェクターから噴射した後、着火時期制御用の燃料を燃焼室の両側に設けられた2本のインジェクターから噴射をし、それぞれの燃料割合および噴射時期を変化させ実験を行った。

3. 実験結果と考察

3・1 噴射時期の影響

3・1・1 メタノールを用いた場合 表3に軽油のみを噴射した場合と、軽油を噴射した後にメタノールを噴射した場合の実験条件を示す。図3にメタノール噴射の噴射時期が燃費および排出ガス特性に及ぼす影響について示す。運転条件はエンジン回転速度1000rpm、空気過剰率は3.1である。なお空気過剰率にはメタノールに含まれる酸素も考慮している。軽油の噴射量は40mm³/st、メタノールの噴射量は36mm³/stである。また軽油の噴射時期は軽油だけの場合でNO_x濃度が20ppm以下となる噴射時期(以降MLNと呼ぶ: Minimum Injection timing advance for Low NO_x combustion)の-70°CA ATDCである。軽油だけの場合は空気過剰率を同一とするために噴射量は54mm³/stとなり、MLN

Table3 Test condition of methanol injection

	● Diesel fuel with methanol	■ Diesel fuel only
Nozzle	Center Pintle type	Side $\phi 0.17\text{mm} \times 2-2$ Pintle type
Fuel	JIS#2	Methanol
Pinj	100MPa	50MPa
q	40mm ³ /st	36mm ³ /st
Inj.timing	-70° CA ATDC	Varied

Fig.3 Effect of injection timing on engine performance and emissions

Fig.4 Effect of methanol injection on cylinder pressure, ROHR and mean gas temperature

は -90°CA ATDCとなる。なお、このときの供給熱量はいずれの条件でもほぼ等しい。また図中の燃費は軽油に換算した値となっている。メタノールの噴射時期により燃費と排出ガスが変化している。噴射時期が -50°CA ATDC付近で NO_x 濃度が20ppm以下となっており、かつ燃費も良く軽油だけの場合に対して約10%改善している。噴射時期をさらに進角すると NO_x 濃度は低いものの燃費が悪化する。これは CO 、 THC 濃度が増加していることから燃焼効率が悪化しているためと考えられる。またスモークの増加は、軽油の噴霧とメタノールの噴霧が衝突し局所的に濃い混合気が存在したためと考えられる。一方、噴射時期を遅角した場合には NO_x 濃度が増加し、燃費も悪化している。 NO_x 濃度が増加したのはメタノールの噴射時期が遅いため着火までの時間が短く、メタノールの混合気が希薄にならないためと考えられる。

図4に筒内圧力、針弁リフト、熱発生率および筒内平均ガス温度を示す。条件は軽油だけの場合と、図3において最も燃費が良かった条件、すなわち軽油噴射時期 -70°CA ATDC、メタノールの噴射時期は -50°CA ATDCである。メタノールを噴射することで低温酸化反応での熱発生量が減少し、高温酸化反応の開始時期（着火時期と呼ぶ）が大幅に遅延し、セタン価の低い燃料を用いた場合と同様な傾向⁽¹⁶⁾を示している。このことから低温酸化反応での熱発生量が減少した理由は、メタノールの噴射時期が進角することで低沸点でかつ蒸発潜熱が大きいメタノールが筒内全体に拡がり、混合気全体としてのセタン価が低くなったためと考えられる。着火時期が上死点付近になり等容度が増加したことが燃費の改善理由と考えられる。またメタノールを噴射する場合は軽油の噴射量が、軽油だけの場合に比べ少ないために噴射時期が遅角し、ライナー壁に付着し燃焼に寄与しない燃料量が減少したことも燃費の改善要因と推定できる。

図5に図3の条件における熱発生率を示す。メタノールの噴射時期が -10°CA ATDCの場合には軽油の高温酸化反応の後半にメタノール噴射による拡散燃焼と考えられる熱発生が認められ、 NO_x の生成要因であると考えられる。噴射時期が -20°CA ATDCでは、低温酸化反応の開始時期がさらに進角し、高温酸化反応で熱発生率の最大値も増加しており急激な燃焼となっている。これはメタノールが希薄になる前に着火したと考えられ、図3に示す様に NO_x の生成要因となっていると考えられる。逆に、噴射時期を進めると低温酸化反応の開始時期は遅角し、熱発生量が少なくなっている。高温酸化反応の開始時期も上死点に近づき等容度の高い燃焼となっており、このことが燃費が改善した要因と考えられる。メタノールの噴射時期が進角するにしたがい高温酸化反応

の開始時期が遅角する理由としては、噴射時期が早期なほどその時期での筒内ガス温度が低いために筒内温度低下に対する蒸発潜熱の効果が大きく現れたこと、および軽油とメタノールの混合が進み混合気が均一化すること

Fig.5 Effect of methanol injection timing on ROHR

Fig.6 Effect of methanol injection on mean gas temperature histories.

で、局所的にセタン価の高い軽油の混合気が希薄化したことが考えられる。

そこでメタノールを噴射した場合の圧縮行程中の筒内平均ガス温度履歴について比較をした。図6はメタノールの噴射時期が $-70^{\circ}\text{CA ATDC}$ および $-10^{\circ}\text{CA ATDC}$ のときの圧縮行程の筒内平均ガス温度履歴である。メタノールを $-70^{\circ}\text{CA ATDC}$ で噴射した場合には約 $-65^{\circ}\text{CA ATDC}$ から温度が低下しており、燃料の蒸発潜熱の影響が確認できる。その結果、低温酸化反応が開始する $-25^{\circ}\text{CA ATDC}$ 付近ではメタノールの噴射時期が $-10^{\circ}\text{CA ATDC}$ の場合に比べ筒内温度が低下しており、このことが着火時期遅延の要因となっている。

3・1・2 α メチルナフタレンを用いた場合

前節においてセタン価が低くかつ蒸発潜熱が大きいメタノールを主燃料の軽油の後から噴射することで着火時期を変化させることが可能であることがわかった。そこでこの蒸発潜熱の効果を明確にするためにセタン価が低く、蒸発潜熱はメタノールの約1/3と少ない α -MNを用いて実験を行った。

図7に α -MNの噴射時期を変えた場合の燃費および排出物特性について示す。運転条件はエンジン回転速度1000rpm、空気過剰率は3.2である。軽油の噴射量は

Fig.7 Effect of α -MN injection timing on engine performance and emissions

26mm³/st, 噴射時期は-90°CA ATDCであり, α -MNの噴射量は24mm³/stである。 α -MNの噴射時期が早期の場合にはNO_x濃度は低くなるが, 遅角するにしたがい α -MNの混合気が希薄にならないためにメタノールを噴射した場合と同様にNO_xが増加するが, 燃費の変化はほとんどない。このときの熱発生率を図8に示す。熱

発生率の形状は軽油だけの場合に比べ α -MNを噴射することで低温酸化反応での熱発生量が少なくなり, 高温酸化反応の開始時期が遅延しているが, α -MNの噴射時期の影響はほとんどない。このことが燃費に対する噴射時期の影響が少ない要因である。図9に α -MNを-70°CA ATDCにした場合と α -MNを噴射しない場合の圧縮行程の筒内平均ガス温度履歴を示す。図6のメタノールを噴射した場合は異なり, α -MNは沸点が高く蒸発しづらいために, 噴射による筒内のガス温度変化が少ない。このことが噴射時期が変化しても着火時期が変わらない理由であると考えられる。したがってメタノールを噴射した場合に噴射時期による着火時期への影響が現れたのは, 蒸発潜熱の影響であることは明らかとなった。

3・2 噴射量の影響 軽油の噴射量を変えた場合にメタノールの噴射量が熱発生率におよぼす影響について調査した。その結果を図10に示す。軽油の噴射量が40mm³/stの場合にはメタノールの噴射量を変えることで燃焼開始時期が変化している。さらに軽油の噴射量が54mm³/stと多い場合でも同様であるが, 筒内の平均ガス温度が高いために, 軽油の噴射量が40mm³/stの場合に比べて遅延効果は少なくなっている。軽油の噴射量が増加してもメタノールの噴射量と噴射時期を変化させることで, 燃焼開始時期を制御することが可能であることがわかった。

3・3 噴射量割合の影響 図11に空気過剰率が3.2, 軽油の噴射時期は-90°CA ATDCとし, 軽油と α -MNの噴射量割合を変えた場合に α -MNの噴射時期がエンジン性能におよぼす影響について示す。 α -MNの噴射量が多くなるにしたがい燃費が改善され同一噴射時期でもNO_x濃度が低くなっているが, スモーク濃度は増加している。図12に α -MNの噴射時期が-80°CA ATDCのときに, 噴射量の割合を変えた場合の熱発生率

Fig.8 Effect of α -MN injection timing on ROHR.

Fig.9 Effect of α -MN injection on mean gas temperature histories.

Fig.10 Effect of methanol quantity on RORH

を示す。 α -MNの噴射量の増加に伴い、高温酸化反応の開始時期が遅角しており、このことが燃費の改善要因である。さらに反応開始時期が遅延したことで筒内平均ガス温度が低く、また α -MNの噴射から燃焼開始まで

Fig.11 Effect of α -MN quantity on engine performance and emissions

Fig.12 Effect of α -MN and JIS#2 quantity on ROHR

Fig.13 Effect of nozzle hole diameter on smoke density

の混合時間が長期化したために、 NO_x 濃度が低減したと考えられる。またスモーク濃度が増加したのは多環芳香族である α -MNの量が増加したため⁽¹⁷⁾と考えられ、図13に示すように噴射ノズルの噴孔径を0.17mmから0.08mmへ変更し、噴霧の微粒化を促進することでスモーク濃度は大幅に低減できる。

4. ま と め

直接噴射式希薄予混合圧縮着火機関における着火時期の制御について研究を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 軽油の早期噴射後に、セタン価の低い燃料であるメタノールあるいは α -MNを筒内へ噴射することにより着火時期を制御することができた。また着火時期の最適化を図ることで燃費が低減できた。
- (2) メタノールを噴射した場合には蒸発潜熱が大きいために、筒内のガス温度が低下し、過早着火が抑制される。また噴射時期が早期であるほど噴射時期の筒内ガス温度は低いために、圧縮行程中の筒内の温度低下も大きく、着火時期が遅延する。
- (3) 筒内のガス温度が高い場合すなわち負荷が高い場合にはメタノールの割合を多く、負荷が低い場合には軽油の割合を多くし、運転条件によって軽油とメタノールの噴射量の割合を任意に変更することで、着火時期の制御が可能である。

最後に本研究の実験は日暮一昭研究員、清水良司研究員、佐復真人研究員が担当したことを申し添える。

参 考 文 献

- (1) 柳原：機械学会講演資料，No.95-10，VI(1995)，p45-47.
- (2) 古谷・川島・太田：機論，62-595,B(1996),p408-414.
- (3) 鈴木・小池・石井・小高：自技会講演前刷集，961(1996),p89-92.
- (4) 五十嵐・飯田：機論，64-618,B(1998),p279-286.
- (5) R.H.Thring, SAE Paper, 892068,(1989).
- (6) P.M.Najt and D.E.Foster, SAE Paper, 830264,(1983).
- (7) 武田・中込・新村：機論，62-599,B(1996),p347-354.
- (8) 原田・佐々木・宮本・赤川・辻村：自技論，Vol.29, No.4(1998),p41-46.
- (9) 山岡・小熊・飯田：機論，65-640,B(1999), p284-291.
- (10) Magnus Christensen and Bengt Johansson, SAE Paper,1999-01-0182,(1999).
- (11) 太田・古谷・小島・河野：自技会講演前刷集，No.73-99,(1999),p9-12.
- (12) 佐藤・柳原・水田：自技会講演前刷集，963(1996),p81-84.
- (13) 島崎・中込・新村：自技論，Vol.29, No.3(1998),p61-65.
- (14) 島崎・赤川・辻村：機械学会講演論文集，Ⅲ(1998),p563-564.
- (15) 瀬古・黒田：内燃機関シンポジウム講演論文集，(1997),p223-228.
- (16) 原田・佐々木・宮本・赤川・辻村：自技論，Vol.31, No.1(2000), p17-22.
- (17) 小林・秋山・中島・佐々木：自技会講演前刷集，942(1994),p193-196.