ディーゼル機関のアルコールブレンドおよびフューミゲーションにおける着火遅れ*

権 純翼**・新井雅隆***
廣 安博之****

Ignition Delay for Alcohol Blends and
Fumigation in Diesel Engine

By Soon-Ik Kwon, Masataka Arai and Hiroyuki Hiroyasu

The effects of temperature and pressure on the ignition delay for alcohol blends and fumigation were studied in a constant volume combustion bomb and a diesel engine. In the experiment using the bomb, the effect of blending ethanol with a diesel fuel (DF2) on the ignition delay was investigated. The test covered the whole mixing range of ethanol-DF2 blends. The ignition delay for the fumigation of methanol or the diesel fuel was measured in a D.I. diesel engine. The test parameters were; fuel quantity fumigated into an inlet pipe, intake air temperature, and injection timing of the diesel fuel from a main nozzle. The cylinder temperature in the engine was measured by a fine thermocouple with a compensation circuit under the motored condition. Single shot injection was adopted to reduce residual gas from a previous cycle. The measured results showed that, for the ethanol-DF2 blends, the ignition delay increased by increasing the ethanol content in the blends. For the fumigation method, the ignition delay decreased by increasing the quantity of the fuel fumigated into the inlet pipe, and the tendency became larger at the low cylinder temperature. Methanol fumigation showed a larger effect on the ignition delay than the diesel fuel fumigation.

1. ま え が き

ディーゼル機関の燃焼室内に噴射された燃料は微粒化された後、加熱、蒸発、着火、燃焼する。燃料が燃焼室内に噴射されてから着火するまでの、いわゆる、着火遅れはその後に続く燃焼、ひいては機関の性能に大きな影響を及ぼす。このため従来から実機、定容燃焼器、急速圧縮装置を用いて多くの研究がなされてきた。一方、石油系燃料を使用する場合、排気中の媒煙、 NO_x などによる大気汚染が常に問題となる。その対策については種々の研究がなされてきたが、なお十分に解決されていない部分が残されている。その対策の一つとして、含酸素燃料であるアルコールを使用すると排気特性、特に微粒子の低減に効果があり、また代替燃料の面からもディーゼル機関用の燃料として注目されてきている。

アルコールをディーゼル機関用の燃料として使用する場合、石油系燃料よりも気化潜熱が大きく、自己着火温度も高いのでアルコール燃料単独では着火しにくい。そ

の着火性改善方法としてスパークアシスト方式、グロープラグ方式などの強制着火による方法、アルコール燃料を吸気管より吸入させメインノズルからの軽油を着火源とするフューミゲーション法、二つの燃料を混合して噴射させるブレンド法、熱面により着火させる方法および着火促進剤をアルコール燃料に添加する方法などがある。それらの中で機関の大きな改造なしに簡単に応用できる方式としてブレンド法とフューミゲーション法があげられる。この二つの方法については様々な研究がなされてきたが^{1)~9)}ほとんどが機関性能、排気特性などの研究であり、着火遅れなどの基本的な燃焼特性値についての研究はほとんどなされていない。

そこで、本研究ではまずアルコールブレンド法による着火遅れの変化を調べるため電気炉を組み込んだ定容燃焼器を用いて圧力と温度を独立して変化させ、エタノールと軽油の混合燃料を一回だけ噴射し、その時の着火遅れを測定した。またアルコールフューミゲーション法による着火遅れの変化は、実機の吸気管内にメタノールあるいは軽油を噴射してシリンダ内に吸入し、シリンダ内へ着火源になる軽油を噴射して測定を行った。

2. 実験装置および方法

2.1 ブレンド法 図1に実験装置の概略を示す。

*原稿受付 昭和63年12月15日

昭和63年秋期学術講演(昭和63年11月17日)

**学生会員 広島大学(東広島市西条町下見)

***広島大学(東広島市西条町下見)

****正会員 広島大学(東広島市西条町下見)

図1(a)はブレンド法の実験に用いた定容燃焼器である。これは内径180 mm、長さ540 mmの水冷式圧力容器①に10 kWの電気炉を組み込んだもので、電気炉の内寸法は直径130 mm、長さ510 mmである。電気炉内には霧

囲気温度測定用のクロメル-アルメル熱電対5本と、外部モータ③で駆動する攪拌用ファン②を設けている。5本の熱電対からの出力はデジタルボルトメータ⑮とデジタルプリンタ⑭により記録する。また熱電対の出力

1. Bomb	2. Fan	3. Motor	4. Oscilloscope
5. Electric Furnace	6. Pyrex Glass	7. Photo-transistor	
8. Motor	9. Rack	10. Solenoid	11. Injection Pump
12. Needle Lift Sensor	13. Compressor	14. Digital Printer	
15. Digital Voltmeter	16. Pen Recorder	17. Nozzle Holder	
18. Thermocouple	19. Voltage Regulator		

(a) 定容燃焼器

1. Oscilloscope	2. Data Recorder	3. DC Amplifier
4. Thermocouple Compensation Circuit	5. Pressure Transducer	
6. Thermocouple	7. Needle Lift Sensor	8. Dummy Nozzle
9. Control Circuit	10. Dynamometer	11. Engine
12. Rotary Encoder	13. Heater	14. Laminar Flow Meter
15. Accumulator	16. Injection Nozzle	

(b) エンジン

図1 実験装置の概略図

はペンレコーダ⑩で同時に示され、炉内温度分布が監視される。炉内の温度分布の調節は電圧調節器⑨により電気炉への供給電力を調節して行った。燃料はエタノール（純度 99.5 %）と軽油（JIS 2号）を混合したものを使用し、エタノールの質量分率を 0～95%まで変化させて実験を行った。測定中は混合燃料が二相に分離するのを防止するため燃料タンク内を電磁式攪拌器で常に攪拌させた。この状態で燃料を列形噴射ポンプ⑪を用いて噴射量零の状態にモータリングさせておき、噴射時にはコントロールラックをソレノイド⑩で一回だけ引くようにして燃料を一回だけ噴射させた。測定時の噴射ポンプの回転数は 400 rpm とした。一回あたりの噴射量は約 140 mg（軽油の場合）、噴射期間は 9 ms である。使用した噴射ノズルはホル形 DLOS-301 であり開弁圧は 10 MPa とした。噴射時期はノズルホルダ⑫に取り付けた光切断式のニードルリフト検出器⑬によって検出した。

電気炉内部でおこる発火を検出するために圧力容器内部にある電気炉観察窓⑥の直前に発火検出器⑦を設置した。これは広角形フォトランジスタ（東芝製、TPS 603、受光角は 160 度）を水冷ジャケットに収めたものである。この発火検出器は炉内のどの位置で発火が起ころうとも十分検出可能であることを確認している。また発火検出器各種の負荷抵抗の場合について応答速度を検討したが、着火遅れ時間に相当する数 ms の時間測定では問題にはならなかった。発火遅れの測定はストレージ式オシロスコープ④に現れたニードルリフト信号の立ち上がり点と発火検出器からの出力波形の立ち上がり点との時間差を読みとることによって行った。

2.2 フューミゲーション法 フューミゲーション法の実験に用いた機関は四サイクル直接噴射式ディーゼル機関であり、ボア 135 mm、ストローク 130 mm、行程容積 1860 cm³、圧縮比 15.5 である。その諸元を表 1 に、実験装置の概略を図 1(b)に示す。機関を残留ガスと機関運転時の熱的影響をなくすために 600 rpm でモータリングしておき、吸入行程時に吸気管内に設置した噴射ノズルより燃料を一回だけ噴射した。その直後の圧縮行程時に、メインノズルより軽油を噴射させその時の圧力上昇遅れを測定した。メインノズルの燃料噴射はダミーノズルを用いた一回噴射装置により行った。吸気管噴射燃料としてはメタノール（純度 99.6 %）と軽油（JIS 2号）を用いた。

吸気管噴射ノズルは自動車用 EFI ノズルであり、その噴射圧はアキュムレータ内の圧力により調整した。本実験ではメタノール噴射時 0.6 MPa、軽油噴射時 2.0 MPa とした。この圧力において噴射された燃料は微粒化されている。また吸気管噴射ノズルの噴射量はノズルに付いているソレノイドの作動時間を制御することによって 0～120 mg/cycle まで変化させた。なお、メインノズルの噴射量は前報¹⁰⁾の実験結果より噴射量は着火遅

表 1 エンジンの諸元

Item	Specification
Type	1-Cylinder Water Cooled 4 Cycle D.I. Diesel Engine
Bore x Stroke	135 x 130 mm
Total Volume	1860 cc
Clearance Volume	128.3 cc
Cavity Volume	110.3 cc
Compression Ratio	15.5 : 1
Valve Timing	
Inlet Valve Open	17° BTDC
Close	35° ABDC
Exhaust Valve Open	35° BBDC
Close	5° ATDC
Injection Pump	Bosch AD Type (Plunger Dia 10 mm)
Nozzle	DLL160 S 254 (Dia 0.25 mm 4 Holes)

れに関係ないのでここでは 70 mg/cycle と固定して行った。吸気管噴射ノズルは吸気ポートから 490 mm の位置に空気の流れに順方向に噴射するように設置した。この位置から吸気ポートまでの吸気管容積は 1480 cm³ であり行程体積より少ないので噴射した燃料は吸入空気とともに大部分がシリンダ内に吸い込まれると思われる。吸入空気量はサージタンク入口に取付けた層流流量計で測定した。吸気温度はヒータにより常温から 513 K まで変化させた。

シリンダ内の温度測定は直径 50 μm のクロメル-アルメル熱電対をシリンダ内の噴霧の着火位置の予想点と壁面の効果が少ない点を考慮して図 2 に示す位置に取り付

図 2 熱電対設置位置

けて測定した。この位置のガスについては壁面への熱損失が少ないので T.D.C. で最高温度になると考えられる。また、熱電対の応答遅れを補償するために熱電対の出力を一次遅れとみなし、O P アンプの演算機能を利用した補償回路を作成した¹⁰⁾。この時の応答遅れは熱電対の出力の最高点と T.D.C. の間の時間として補償回路により補償した。この補償した温度曲線と熱電対の測定温度を図 3 に示す。本実験ではモータリング状態において、この補償回路を通した着火遅れ期間中の平均温度をシリンダ内空気の代表温度として使用した。この温度は吸気管噴射燃料の気化潜熱による温度降下は含まれている。しかし、メインノズルから噴射された軽油の気化潜熱の効果は無視した。

図 3 補償温度曲線

3. 実験結果

3.1 エタノール混合軽油の着火遅れ 図 1(a)の定容燃焼器による実験に用いたエタノールと軽油の混合割合は混合物全質量に対するエタノールの質量分率（パーセント）で表すことにした。メタノールの場合、軽油に対する溶解度が室温で 1% 以下のため、メタノールと軽油の混合は不可能であった。したがって本実験ではエタノール混合軽油を使用した。

エタノールの質量分率が 10% 以下の場合にはエタノールは軽油に完全に溶解する。図 4 はこのようにエタノールが軽油に完全に溶解するときの着火遅れを示す。エタノール混合軽油と軽油だけの着火遅れの差が高温域には少し見られるが全体的には差がほとんどない。

図 5 はエタノールの質量分率を 20～80% まで変化した場合の着火遅れを示す。この場合には軽油とエタノールは溶解せず、放置しておくくと二相に分離してしまう。このため測定中は燃料タンク内を電磁式攪拌器で常に攪拌させた。それと同時に列形噴射ポンプのプランジヤで混合燃料を常に循環させ二相への分離を防止した。エタノールの質量分率を増していくと着火遅れのばらつきが大きくなる。着火遅れの値は高温域では質量分率 50% までは軽油の場合と大差がないが、低温域ではその差が大

きく、長い着火遅れを示す。またエタノール質量分率が 50% を越えると高温域でも軽油との差が大きくなり、長い着火遅れが見られる。

図 4 エタノールが軽油に溶解するときの着火遅れ

図 5 エタノールと軽油が混合するときの着火遅れ

エタノールの質量分率 95% 混合軽油（軽油の質量分率 5%）の着火遅れを図 6 に示す。この場合は軽油がエタノールに溶解している状態である。エタノールの質量分率 20～80% までの着火遅れの増加に対して 95% の着火遅れの増加が非常に大きい。また高温域でも着火遅れのばらつきが大きい。

図6 軽油がエタノールに溶解するときの着火遅れ

図7 エタノール混合割合の影響

図7はいまでの結果より、横軸にエタノールの質量分率をとり、雰囲気温度一定のときの着火遅れの変化を示したものである。この時の温度は燃料噴射時の雰囲気温度であり、エタノール混合軽油の気化潜熱は含まれていない。したがって、実際の着火温度は図7に示した雰囲気温度より低くなると考えられる。また気化潜熱による温度降下量はエタノールの質量分率の増加とともに大きくなるし、エタノールの添加により混合燃料の着火性の減少のため着火遅れが長くなると思われる。エタノールの質量分率が60%を越えると着火遅れの増大が大き

なり、特に80～95%で変化が大きいことがわかる。なお、エタノール質量分率が95%以上になると、雰囲気温度が低いところでは着火しにくくなる。

3.2 フューミゲーションによる着火遅れ

図1(b)の機関を用いた実験で、噴射時期 10° BTDC における吸気管噴射量と着火遅れの関係を図8に示す。この温度は燃料噴射時と着火時の平均温度であり、メインノズルからの軽油噴射なしに吸気管噴射だけを行った場合のシリンダ内の温度である。したがって、メタノールあるいは軽油の吸気管噴射による気化潜熱は含まれているがメインノズルからの軽油噴射による温度降下は含まれていない。図8(a)はメタノールをフューミゲーションさせた場合である。吸気管噴射量を増加させるほど着火遅れが短くなる。メタノールは気化潜熱が大きいので噴射量の増加によって圧縮温度も低くなる。しかし同一シリンダ温度下で比べると、メタノール混合によって予混合気形成が促進されて、吸入された予混合気が圧縮過程に低温酸化反応を起こして熱発生とともに中間生成物を生じ¹¹⁾、シリンダ内に極めて着火しやすい雰囲気を作り、噴射された主燃料の着火を助け着火遅れが短くなると考

(a) メタノール

(b) 軽油

図8 吸気管噴射量と着火遅れ

えられる。また雰囲気温度が低いほどメタノール量の増加による着火遅れの減少率が大きくなっている。図8(b)の軽油をフューミゲーションさせた場合は雰囲気温度が低い時、吸気管噴射量が50 mg までは着火遅れが短くなるがそれ以上噴射量を増加しても着火遅れにはあまり影響がない。

図9は雰囲気温度700 K, 850 K のときの吸気管内噴射量の吸入空気量に対する当量比と着火遅れの関係を示す。メタノールフューミゲーションの場合(図9(a))、雰囲気温度700 Kにおいて当量比増加によって着火遅れが急激に短くなるが850 Kにおいてはゆるやかに減少している。軽油フューミゲーションの場合(図9(b))も850 Kではほとんど変わらず、また700 Kにおいても当量比が0.35を越えるとほとんど変わらない。これにより雰囲気温度が高い時、着火遅れに対するフューミゲーションの影響はほとんど見られないのがわかる。

(a) メタノール

(b) 軽油

図9 吸気管内の当量比と着火遅れ

図9を一つのグラフにまとめたのが図10である。これはフューミゲーションを行わない場合の着火遅れを基準として、着火遅れ減少比を縦軸に示している。これから

もわかるように高温より低温、軽油よりメタノールのほうが吸気管噴射量を増加させた場合、着火遅れの減少の割合が大きい。これは同一温度に対して示すと軽油よりメタノールのほうが気化性がよく、可燃性混合気の形成量が多いので、これの軽油噴霧への巻き込み量が大きくなるためと考えられる。

図10 吸気管内の当量比と着火遅れの減少割合

図11にメタノールのフューミゲーションにおいてメインノズルの噴射時期を変化させた時の着火遅れを示す。吸気管噴射量が多いほど、雰囲気温度が低いほど噴射時期が着火遅れに及ぼす影響が大きい。また噴射時期10°~15° BTDC 付近でその影響が最も大きいのがわかる。

図11 メインノズルの噴射時期の変化(メタノール)

図12は軽油のフューミゲーションの場合である。吸気管噴射量が着火遅れに及ぼす影響はメタノールより小さい。また噴射時期に対する変化も小さくなっている。

図13はシリンダ内の平均圧力3.0 MPa においてメタノールの吸気管噴射量を変化させた時の着火遅れを $\log \tau_p$ と $1000/T_a$ の関係でまとめたものである。同一圧力下では、雰囲気温度が低いときは吸気管噴射量の着火遅れに及ぼす影響が大きい、高温域に移るとその影響

図12 メインノズルの噴射時期の変化(軽油)

図13 同一圧力でのメタノール噴射量と着火遅れ

は少なくなる。

以上に示したようにフューミゲーションの場合、着火遅れ期間中の平均温度が高い時には噴射量の増加が着火遅れに対する影響があまり見られないが平均温度が低いときにはその影響が大きくなる。また軽油よりメタノールのフューミゲーションのほうが気化性がよく発火源になる軽油噴霧の周囲で可燃混合気が多量に存在するようになるので着火しやすい条件になると考えられる。

4. 結 論

エタノール混合軽油の着火遅れを定容燃焼器を用いて測定した。また、実機でメタノール又は軽油を吸気管噴射してフューミゲーションさせた場合の着火遅れを吸気管への噴射量、吸入温度、メインノズルの噴射時期を変化させて測定した。以上の実験の結果、次のような結論を得た。

(1) エタノール混合軽油の着火遅れは、エタノール混合割合が20%までは軽油の場合とほとんど変わらない。20%を越えると着火遅れのばらつきが大きくなり、混合割合が大きくなるとともにまず低温の着火遅れが大きくなる。さらにエタノールの質量分率50%を越えると高温側でも着火遅れが大きくなる。

(2) 吸気管噴射によるフューミゲーションにおいて同一温度下では吸気管噴射量の増加によって着火遅れが短くなる。また、雰囲気温度が低い方がその影響が大きい。

(3) 吸気管噴射燃料としてメタノールのほうが軽油より着火遅れに及ぼす影響が大きい。

終わりに、本研究は芦田健君の熱心な助力によって行われたこと、西田恵哉助手から有益な助言をいただいたことを記し、ここに感謝の意を表します。

文 献

- 1) 池上・ほか2名, 内燃機関合同シンポジウム, (1981), 133.
- 2) 三輪・ほか3名, 内燃機関合同シンポジウム, (1981), 157.
- 3) 村山・ほか4名, 内燃機関合同シンポジウム, (1982), 139.
- 4) Henein, N.A and Saeed, M.N, SAE Trans. 843343.
- 5) Moses, C.A, Ryan, T.E and Likos, W.E, 4th Alcohol Fuel, Technology on Int. Symp.(1980-10), vol. 2. 493.
- 6) Rodica A. Baranescu, SAE Trans. 860308.
- 7) Starke, K.W, 4th Alcohol Fuel, Technology on Int. Symp.(1980-10), vol.2. 635.
- 8) 近久・ほか3名, 機論(B論), 48-433(昭57-9), 1784.
- 9) 是松・ほか2名, 機論(B論), 53-492(昭62-8), 2642.
- 10) 権・ほか2名, 舶機誌, 24-1(1989), 26.
- 11) 齊藤, 内燃機関の燃焼, (昭48), pp 277-286, 山海堂.
- 12) 新井・ほか2名, 機論(B論), 50-453(昭59-5), 1345.
- 13) 宮本・ほか2名, 機論(B論), 48-433(昭57-9), 1775.
- 14) 佐々木・ほか1名, 機論(B論), 51-472(昭60-12), 4117.
- 15) 瀬古・ほか1名, 機論(B論), 52-481(昭61-9), 3401.

〔質 疑 応 答〕

質問者 同志社大学工学部 藤本 元

【質問】

精力的な貴研究に敬意を表します。下記につき御教示下さい。

(1) 図4～図6の実験線はどのようにしてひかれたの

でしょうか、特に $1000/T_a$ に対する $\log \tau_i$ が折れる点の決め方をお示し下さい、また同一条件にたいする実験回数もお示し下さい。

(2) 図4で高温域の差があると記述されていますが、図4では有意差はほとんどないと思える可きではないでしょうか。

(3) 上記(1)に関連しますが、図6は実験点から見て一本の直線とみなす可きではないでしょうか。

(4) 図8(a)では800 Kまで、(b)では750 Kまで q によらず τ_p は一定すなわち q の τ_p に対する影響は殆んど無いと見る可きではないでしょうか。

【回答】

(1) まず低温側の直線を求め、その直線からはずれる高温側のデータに対して第2の直線をデータの信頼性を考慮にいれて求めた。また、図中の各データ点は、それぞれ一回の実験に対応している。

(2) 低温側にくらべ実験データでは明らかな差が認められるがデータの信頼性の面からして有意の差とは考えてない。

(3) 図ははん雑であるが他のデータとの統一解釈として低温側と高温側で異なる傾向を持つと考えられる。

(4) 吸気管噴射量の着火おくれに対する影響は、ある雰囲気温度以上では少ないと考えられる。

質問者 三井造船(株) 坂根 篤

【質問】

興味深いご研究に敬意を表します。次の点についてお教え下さい。

1) 図9(b)で、軽油の自発火温度より高い温度で実験を行っているにもかかわらず、フューミゲーションさせた燃料ではなく、噴射した主燃料のほうで着火がおこる理由についてお教え願いたい。

2) 図10において、いずれの条件の場合もある当量比以上になると τ_p/τ_o の変化が非常に小さくなっている。その理由についてお教え願いたい。

【回答】

(1) 主たる原因として次の点が考えられる。

均一に混合された副燃料自身の着火おくれ時間が長く、自着火に到る前に主燃料の着火が起こること、また主および副燃料とも1回噴射で実験を行っているため実際にフューミゲートされた燃料が計算上の当量比より若干下回ることにより、自着火するためには相当の着火おくれ時間が必要なこと。

(2) フューミゲーションにより着火点が移動すると予想され、その効果がある当量比所までは顕著に表われる。それ以上当量比が高くなると着火点が主噴霧の特定の位置に固定され、着火おくれ時間の変化が少なくなるものと考えられる。しかし、これはフューミゲーションによる着火おくれ時間の短縮のメカニズムにふれる本質的な問題であり、現在、明確な説明を行うことはできない。

質問者 京都工芸繊維大学 串山 正

【質問】 1. 図4, 5, 6において、エタノール単独噴射のときはどうなりますか。また、 $1.2 \times 1000/T_a$ K⁻¹ を境にエタノールの混合比による着火遅れの特性が異なるのはどのように考えたらよろしいのでしょうか？

【回答】

着火遅れは $1.2 \times 10^3/T_a$ K⁻¹ 近辺を境にしてエタノールを混合させた場合だけでなく、軽油の場合も傾向が変化する。高温雰囲気中では化学的着火おくれは十分短かいが、それ以前の蒸発や空気との混合などの物理的な現象に要する時間が温度の上昇とともにさほど短くならないため、全体として着火おくれ時間が温度の上昇とともに低温の場合ほど減少せず、これが温度依存性の変化の原因である。

エタノール混合割合の増加とともに、この温度依存性の変化はより低温側(図5の右側)から出現するようになるがこれはエタノールの気化熱(873 J/g)が軽油の気化熱(約250 J/g)の3倍以上であり、蒸発により混合気の温度が局部的に低下し、着火おくれを長くしているためと考えられる。

エタノール単独噴射の場合は大気圧および0.2 MPaの条件では発火が確認されるが、3 MPaのような高圧下では発火が観察できなかった。前述したとおりエタノールの蒸発による温度低下が大きく、非定常噴霧を扱ったこの実験では着火以前に噴霧は容器内の空気と十分に混合する。またエタノールが蒸発により混合気形成されて化学的着火おくれ因子が問題とされるころには、さらに空気との混合が進行し、混合気濃度は希薄で可燃限界以下となるため最終的に着火に至らなかったと考えられる。