直噴ディーゼル機関におけるアルコール噴霧の混合気形成過程 および着火特性に関する一考察*

内田 浩二^{*1}, 齊藤 弘順^{*2}, 立石 又二^{*2}

A Study on the Mixture Formation Process and Ignition Characteristics of an Alcohol Spray in a DI Diesel Engine

Kouji UCHIDA^{*3}, Hironori SAITOH and Mataji TATEISHI

^{*3} Graduate school of Mechanical Engineering, Sojo University,
4-22-1 Ikeda, Kumamoto-shi Kumamoto, 860-0082 Japan

This paper revealed the reason of poor self-ignition quality of alcohol spray from the viewpoint of mixture formation considering fuel properties. Ignition characteristics of Ethanol and Diethyl Ether blended fuels were experimentally investigated with changing their blend ratio in order to clear the effects of fuel's physical and thermal properties on ignition. Experimental results and prediction of mixture formation of blended fuels showed that stoichiometric air/fuel ratio (L_{th}) and latent heat for vaporization (γ) were main parameters on ignition. Alcohol spray becomes lean situation faster than conventional diesel fuel such as Gas oil due to their smaller L_{th} . On the contrary, temperature rise of alcohol spray up to ignition point is slower than Gas oil caused by their larger γ . This causes poor self-ignition quality of alcohol spray. Namely, it is difficult for an alcohol spray to be a mixture of suitable mixing ratio and temperature for self-ignition at the same time and place.

Key Words: Alcohol, Spray, Ignition, Combustion, Recycling Energy System

1. 緒 論

1・1 研究の背景 現在我々は化石資源枯渇問題ならびに地球温暖化等の世界規模での環境問題に直面しており、質、量ともに現代の産業活動に要求されるエネルギー需要に応え、且つこれらの諸問題を解決する技術を構築することが重要な課題である。そこで本研究では太陽エネルギーをベースとした再生循環可能なエネルギーシステムの構築が必要であると考え、植物バイオマスベースのアルコールをエネルギー源とした、着火・燃焼に対する高い制御性を有する高効率圧縮着火噴霧燃焼エンジンシステムの確立を目指そうとするものである。

1・2 研究経緯と目的 これまで、アルコールを燃料とした圧縮着火方式のエンジンシステムは数多く提案され^①、多くの試みがなされている^{②④}が、アルコール燃料は自己着火性が悪く、着火・燃焼が不安定であり、実用化には到っていない。これに対し本研究で

は、アルコール燃料の着火性の悪さは、アルコール燃料噴霧による着火に到るまでの混合気形成過程における物理化学的プロセスが軽油等とは異なる為と考え、著者らはこれまでに5種類の低級ノルマルアルコールを燃料として実機に供試し、その着火・燃焼特性を実験的に調べると共に、エタノールと軽油に対する混合

Fig.1 Estimation of time dependent data of mean temperature of a spray and mean excess air ratio of a spray tip

* 原稿受付 2004年11月22日.

^{*1} 正員, 崇城大学大学院工学研究科(旧名: 熊本工業大学)
(〒860-0082 熊本市池田 4-22-1).

^{*2} 正員, 崇城大学工学部.

E-mail: g0313d01@cc.sojo-u.ac.jp

気形成→着火→燃焼の一連のプロセスについての理論的検討を行ってきた⁹⁾。その結果、次の知見が得られている。図1は後述する計算方法によって算出した噴霧全体平均温度 T_{qm} と噴霧先端平均空気過剰率 λ_p の時間履歴を軽油とエタノールで比較したものである。図を見ると軽油は着火適正濃度混合気の形成要件 ($\lambda_p=1$) が満たされたとき熱量供給要件 ($T_{qm}>T_{ig}$ Gas oil) は既に達成されている。これに対し、エタノールは着火適正濃度混合気の形成要件が軽油に比べ早く、その時には熱供給要件がまだ達成されていない。故に熱供給要件が達成されるころには混合気の希薄化が進行することが予測される。つまり、アルコール燃料の自己着火性の悪さおよび着火の不安定さは、着火適正濃度混合気の形成要件 (濃度的要件) と着火に必要な噴霧への熱量供給要件 (熱的要件) の同位置・同時刻での達成が困難であることに起因すると考えられる。

この結果を踏まえ、本研究では主に物理的な側面から噴霧混合気形成過程を捉え、着火要件の同位置、同時刻での達成の困難さが何に起因するのかをアルコールの熱物性および燃料特性の観点から原因究明することを目的とした。

そこでベースとなるアルコールに将来性を考慮して⁹⁾エタノールを採用し、溶解性が良好であり常温で液相を保ち、且つエタノールと特性の異なるジエチルエーテルを混合し、混合割合の変化による物性値の変化が及ぼす着火・燃焼特性の影響を実験的に調べた。

主 な 記 号

C	: 噴孔流量係数	
c	: 比熱	[kJ/(kg・K)]
d_v	: 噴孔径	[mm]
G_a	: 噴霧内導入空気量	[kg]
G_f	: 燃料量	[kg]
Hu	: 燃料低位発熱量	[MJ/kg]
L_h	: 理論空燃比	[kg/kg]
Δp_f	: 有効噴射圧力	[MPa]
Q	: 噴霧への必要供給熱量	[kJ]
T	: 温度	[K]
t	: 時間	[msec]
X	: 噴霧先端到達距離	[mm]
γ	: 燃料の蒸発潜熱	[kJ/kg]
θ	: $1/2$ 噴霧角	[rad]
λ	: 空気過剰率	
ρ	: 密度	[kg/m ³]
添 字		
a	: 空気	

∞	: 圧縮空気
b	: 沸点
f	: 燃料
fg	: 燃料気相
fl	: 燃料液相
ig	: 最低着火点
o	: 初期値
tip	: 噴霧先端

Table 1. Thermal and fuel properties of tested fuel

Fuel notation		C ₂ H ₅ OH (E)	E:D=7:3 (ED73)	E:D=5:5 (ED55)	E:D=3:7 (ED37)	(C ₂ H ₅) ₂ O (D)	Gas Oil
Stoichiometric air/fuel ratio	[kg/kg]	9.01	9.66	10.1	10.5	11.18	14.6
Density	[kg/m ³]	785	762	747	731	708	825
Specific heat (liquid)	[kJ/(kg·K)]	2.723	(2.715)	(2.709)	(2.703)	2.695	2.372
Specific heat (gas)	[kJ/(kg·K)]	2.329	(2.204)	(2.121)	(2.038)	1.913	1.915
Boiling point	[K]	351.7	(338.5)	(329.8)	(321.0)	307.8	443~663
Heat of vaporization	[kJ/kg]	854.8	(697.1)	(592.0)	(486.8)	329.1	187.2
Minimum ignition temp.	[K]	636	same as (D)	same as (D)	same as (D)	433	530
Lower heating value(LHV)	[MJ/kg]	26.8	28.9	30.3	31.7	33.8	44.4

2 供試燃料の熱物性および燃料特性

実験にはエタノール(E)とジエチルエーテル(D)の混合割合を重量比で E:D=10:0, 7:3, 5:5, 3:7, 0:10 とした 5 種類を用意した。以降、説明の為に各燃料をそれぞれ E, ED73, ED55, ED37, D と表現する。

表 1⁹⁾に今回使用した燃料 5 種類の熱物性および燃料特性一覧を示す。表には比較のため軽油の値も併記した。また、混合燃料の比熱、蒸発潜熱、低位発熱量については両燃料が同じエチル基を持つことから、両燃料が溶解しているものと仮定し、E と D の重量比から算出した。また表より、ジエチルエーテルの最低着火温度がエタノールより低いことがわかる。このことから、ジエチルエーテルが着火剤的な役割を果たし、エタノール単体の場合よりも着火性が改善されるのではないかという予測の下に実験を行った。

3 実験装置および実験方法

表 2 に本研究に用いた供試エンジンの主要目を示す。4 サイクル汎用直噴小型ディーゼルエンジンで、静的燃料噴射時期は BTDC19.0° である。図 2 に示すようにリエントラントトロイダル型燃焼室に 4 噴孔ノズル

を設置し、図示の位置（スワール流の方向に対して噴霧の下流側）にグロープラグを設置している。グロープラグは市販小型トラック用 24volt, 5Ωのものを用い、常時ONの状態 で運転した。

全体の計測システムは、渦電流式動力計を用いて運転し、燃料噴射圧力、針弁リフトおよびシリンダ内圧力を測定し、計測結果をデジタルレコーダに記録するとともに、東京メータ株式会社燃焼解析装置によりシリンダ内圧力を解析して熱発生率等を 100 サイクル平均として算出した。また、供試する燃料は揮発性が高いことから燃料ラインでの気泡発生を防ぐため、ギアポンプを用いて加圧し、冷却した後に燃料噴射系へ供給した。また、運転は毎回の噴射特性をほぼ同一にするため、1 サイクルの燃料噴射量を一定 (35mm³/st: 800rpm の条件で燃料 E: λ=1.90, ED73: λ=1.77, ED55: λ=1.65, ED37: λ=1.62, D: λ=1.55) に保ち、回転数を 800rpm~1600rpm まで 200rpm ごとに実験を行った。

4. 実験結果および考察

4・1 着火特性 本研究において、着火遅れはインジェクター内の針弁リフト初めから熱力学的解析結果である熱発生率の上昇初めまでの期間と定義した。

図3に回転数の変化による各燃料の着火遅れの違いを示す。図を見るといずれの回転数においても、総じてジェチルエーテルの混合割合の増加に伴い、着火性の改善が認められる。また、回転数に対する着火遅れの依存性について見るとジェチルエーテルの混合割合が 50%以下 (E, ED73 および ED55) の燃料では回転数の上昇に対して着火遅れはほぼ変わらず、混合割合が 70%以上 (ED37, D) の燃料では回転数の上昇に伴い、着火遅れが若干短くなる傾向にある。

図4は 1200rpm における各燃料の噴射開始(●)ー噴射終了(○)時期および着火(▲)ー燃焼終了(△)時期をクランク角度で示したものである。燃焼終了時期は熱発生率の値がピークを越えた後、負に転ずる点と定義した。図中の●ー○間および▲ー△間はそれぞれ噴射期間[deg]および燃焼期間[deg]を示している。

図より噴射期間はジェチルエーテルの混合割合の変化によらず、ほぼ一定であることがわかる。但し、着火(▲)ー噴射終了(○)期間はジェチルエーテルの混合割合の増加に伴い大きくなっている。軽油の場合と比較すると、ED37 および D では少なくとも燃料を噴射しながら燃える乱流拡散燃焼的な期間が存在するものと考えられる。

Table 2. Principal particulars of test engine

Name of Engine	D800-11AM (Mitsubishi heavy Industry co.Ltd)
Engine Type	4Stroke DI Diesel
Number of Cylinder	1
Bore × Stroke	82mm × 78mm
Stroke Volume	411ml
Compression Ratio	18:1
Rated Power	5.15/2400 kW/rpm
Combustion Chamber	Re-entrant troidal type
Ignition Type	Glow assisted compression ignition
Fuel Injection Pump	Bosch M type : dpi=6.5mm
Nozzle Type	Hole type : dN×Nn×φN=0.2φ×4×150°

Fig2. Configuration of combustion system

Fig.3 Effect of (C₂H₅)₂O mixing ratio on ignition delay with changing engine operating speed

4・2 燃焼特性 図5は 1200rpm の場合におけるクランク角度に対する熱発生率の変化を示す。

図を見ると燃焼の形態が大概か2つに分類される。各燃料別に見ると、E, ED73, ED55 まではジェチル

エーテルの混合割合が増加するにつれ、熱発生率の立ち上がりが徐々に急になり、ピークの位置も早くなり、その値が大きくなっている。これに対し ED37、D では着火後の熱発生率の立ち上がりが E、ED73、ED55 に比べ、かなり急激に上昇し、かつピークの位置も早くなっており、特に ED37 では軽油のそれと類似していることが確認できる。

ジエチルエーテル 50% 以下の混合燃料について図 3 と照らし合わせると、ジエチルエーテルの混合割合の減少に伴い着火遅れが長くなる結果、予混合気量が増加するが、熱発生率パターンは上述のよう示されており、一般的な予混合燃焼の概念とは異なる傾向を示している。これは、図 1 に示す噴霧混合気形成過程に立ち返ると、アルコール燃料は混合気の希薄化が早く、予混合気量の増加に対し、混合気自体の濃度は希薄な状態となるため、着火遅れの増加に伴い緩慢な燃焼が得られたと考えられる。

4・3 熱物性および燃料特性の影響 このような燃料の違いによる着火燃焼特性の変化は着火時における噴霧の空間平均的濃度および温度の違いによるものと考え、混合気形成過程の観点から解析した。

和栗らの噴霧運動量理論⁽¹⁰⁾によれば、噴霧先端到達距離 X は次式で表される。

$$X = \left(\frac{2C\Delta P_{inj}}{\rho_a} \right)^{0.25} \cdot \left(\frac{t \cdot d_N}{\tan \theta} \right)^{0.5} \quad (1)$$

また、 X 点での噴霧の断面平均空気過剰率 λ_X は

$$\lambda_X = \frac{2 \tan \theta}{L_{th} \cdot C^{0.5}} \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^{0.5} \cdot \frac{X}{d_N} \quad (2)$$

このときの 1/2 噴霧角 θ については

$$\tan \theta = 0.427 \left(\frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^{0.325} \quad (3)$$

噴霧全体平均温度については、噴射開始から瞬時値としては運動量、熱量ともバランスが取れているものと仮定すれば次式が成立する。

$$G_f [c_{pf}(T_b - T_o) + \gamma_f + c_{fg}(T_{spm} - T_b)] = G_a \cdot c_a \cdot (T_{co} - T_{spm}) \quad (4)$$

ここで、式(4)の左辺は燃料が初期温度 T_o から T_{spm} に到るまでに必要な要求熱量であり、右辺は圧縮空気が燃料に与える供給熱量を表している。また、微粒化された燃料が空気をエントレインして形成する噴霧形状を円錐と仮定すれば空気質量 G_a は次式で表される。

Fig.4 Variation of injection and combustion timing depending on the fuel property (1200rpm)

Fig.5 Variation of heat release ratio depending on fuel

Fig.6 History of time dependent data of mean temperature of spray to ignition timing on each fuel

$$G_a = (1/3) \cdot \pi \cdot \tan^2 \theta \cdot X^3 \cdot \rho_{co} \quad (5)$$

ここで式(1)および(5)を式(4)に代入すれば、噴霧全体平均温度を時間の関数と定義できる。

前述の図1から、アルコール燃料の着火要件は熱的要因が支配的であると考えられ、安定した着火を得るためには、より短い時間での噴霧温度の上昇（高い温度上昇率）が必要であると言える。そこで図6は噴霧温度に着目するため、回転数 1200rpm の実験結果として得られた噴射開始から着火に到るまでの時間変化に対する噴霧全体平均温度 T_{spm} の推定値を算出し各燃料と比較した。ただし、計算は物理的な視点での混合気形成過程をマクロな視点で捉えている。図より各燃料ともジエチルエーテルの最低着火温度（434K）では着火しておらず、ほぼ一定温度（580K 近傍）で着火していることが明らかである。このことから実験前の予想に反し、ジエチルエーテルが着火剤的な役割を果たしておらず、時間に対する温度上昇率に影響を与えていることがわかる。これを踏まえ、図7は着火温度を 580[K] と仮定したときの、各燃料の単位質量当たりの顕熱および蒸発潜熱を式(4)より算出し、各燃料を比較した。尚、棒グラフの全体の高さは燃料の単位質量当たりの要求熱量（式(4)左辺の顕熱と潜熱の合計）にあたる。図より、要求熱量が小さくなるにつれ、着火遅れが短くなる傾向にある。沸点から着火温度に到るまでに要する顕熱（図7中の $\square$ ）についてはジエチルエーテルの混合割合によらず、ほぼ同じ熱量であるのに対し、燃料液から燃料蒸気に到るまでに要する熱量（図7中の $\square$ と $\square$ ）はジエチルエーテルの混合割合が増加するにつれ、その値が小さくなっているが、特に蒸発潜熱の減少が顕著である。すなわち、前述の噴霧全体の時間に対する温度上昇率を左右する主たるパラメータは蒸発潜熱であると考えられる。

図8は噴射開始から着火までの噴霧全体平均温度 T_{spm} と噴霧先端平均空気過剰率 λ_{tip} の推定値を燃焼特性の異なる ED73（予混合燃焼的）および ED37（軽油に類似した拡散燃焼的）について比較したものである。 λ_{tip} の時間的変化を見ると、ED37（一点鎖線）のほうが ED73（実線）に比べ、緩やかに上昇している。この違いは式(2)より、理論空燃比が大きくなったことが主要因であると考えられる。それに対し、 T_{spm} は ED37 のほうが常に ED73 より高い値を示している。 T_{spm} については図7で述べたよう蒸発潜熱が小さくなったことに起因するものと考えられる。

以上のことよりジエチルエーテル混合割合の変化に

- $\square$ Latent heat for vaporization
- $\square$ Sensible heat from boiling point to ignition point
- $\square$ Sensible heat to boiling point
- Ignition delay

Fig.7 Comparison of sensible heat and latent heat for vaporization of each fuel to ignition temperature (580K)

Fig.8 History of time dependent data of mean temperature of spray and mean excess air ratio of spray tip

よる着火性の改善は、燃料特性としての最低着火温度の低さによるものではなく（着火剤的役割は果たさない）、蒸発潜熱と理論混合比の変化によって、濃度的要件達成が遅くなり、熱的要件達成が早期化され、要件達成時期の整合性という点で ED73 の場合よりも ED37 のほうが改善され、その結果として、着火遅れが短くなったと考えられる。

また、図5と図8を照らし合わせると、燃焼特性が混合気形成過程に依存していることが明らかである。

つまり、図8において、それぞれの燃料に対し燃料噴射期間と着火時の噴霧濃度に着目すると、ED73の燃料は噴射終了時期近くになってようやく着火要件を満たすが故に、希薄な予混合燃焼が生じたものと考えられる（図8に示す噴霧概念図を見ると断面平均空気過剰率 $\lambda=1$ の位置が噴霧のほぼ中央にあり、噴霧全体として希薄化していることがわかる）。それに対し、ED37は比較的濃混合気の状態では着火要件を満たすために、予混合気量が抑えられ乱流拡散燃焼を伴う軽油に類似した燃焼特性が得られたものと思われる。

4・4 今後の課題 本研究の最終的な目的は植物バイオマスベースのアルコールを燃料とした高効率なエンジンシステムの確立にある。この観点から考えると、燃料としてはメタノール、エタノール単体が候補となるであろう。今回の実験結果および解析に基づき、着火の改善を考えれば、理論空燃比を大きくし、蒸発潜熱を小さくする必要がある。しかし、物性値は燃料が決まれば、今回のように他の燃料を混合する以外にその値を変更することができない。但し、蒸発潜熱について言えば、それに見合う熱量を噴霧に対して供給することができれば、アルコール燃料であっても安定した着火および制御燃焼を実現可能であることが図5から確認することができる。従って、今後の課題としては、噴霧に対する熱供給の方法論として、圧縮比の上昇、内部（Hot）EGRによる筒内初期温度の上昇、グロープラグによる局所的な熱供給等、混合気形成過程の観点からの着火燃焼特性の改善が必要であるといえる。

5. 結 論

以上の実験結果および考察から以下の結論を得た。

1. アルコール燃料の着火燃焼特性は混合気形成過程における空間平均的濃度および温度の時間変化に依存する。更に時間に対する濃度および温度上昇率に影響を与える主たるパラメータはそれぞれ理論空燃比および燃料液から燃料蒸気に到るまでに要する熱量の特に蒸発潜熱である。
2. 蒸発潜熱を補う熱量を噴霧に対し供給できれば、アルコール燃料であっても制御燃焼（乱流拡散燃焼的）が可能である。

謝 辞

本研究にあたり、実験に協力してくれた学部生および修士学生諸兄に謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 古浜庄一・神本武征・金栄吉・大聖泰弘・古山幹雄・吉織清夫・渡部英一 編、エンジンの辞典、(1994)、pp.749-752、朝倉書店
- (2) E.U.Ubong, Ph.D thesis, Development of a Spark Assisted Direct Injection Multifuel Diesel Engine Especially for Alcohol Fuel, (1989), Acta Polytechnica Scandinavia
- (3) P.Zelenka and P.Kapus, Development and Vehicle Application of Multifuel DI-alcohol engine, ImechE, C389/127(1992), 81-87
- (4) W.A.Goetz, C.G.Barringer and M.A.Bozzelli, Utilizing Neat Mithanol and Glow Plug Ignition in DI Diesels: Laboratory Testing of a Single and Multi-Cylinder Engine, SAE Technical Paper Series, (1994), 103-118
- (5) 齊藤弘順・立石又二・内田浩二, 「直噴ディーゼル機関におけるアルコール燃料の圧縮着火・噴霧燃焼特性」, 機論, 70-694, B(2004), 204-211
- (6) 齊藤弘順・立石又二・松木大樹, 「グローアシスト圧縮着火アルコールエンジンの着火燃焼特性」, 第17回内燃機関シンポジウム講演論文集, pp.1-6, 2002
- (7) Saitoh,H, Tateishi,M and Uchida,K, Effects of heat supply methods into a spray of alcohol fuels on ignition and combustion characteristics in a small DI alcohol engine, Proc. CD of 30th FISITA World Automotive Congress, Paper No.F2004V222, 2004
- (8) 柴田和雄・木谷収, バイオマス, 下巻, 1981, pp.135-143, 学会出版センター
- (9) 日本機械学会編, 流体の熱物性値集, (1997), 434-435, 丸善
- (10) 日本機械学会編, 伝熱工学資料 改訂第4版, (1986), 313-325, 丸善
- (11) 和栗雄太郎・藤井勝・網谷竜夫・恒屋礼次郎, ディーゼル機関燃料噴霧の到達距離に関する研究, 機論, 25-156(1959), 820-826