

バイオマス・エネルギーの有効利用に関する研究（Ⅱ）

（エタノールの圧縮点火機関への適用）

澤 則弘*, 梶谷 修一*, 堀 昭三*

（平成2年8月10日受理）

A Study on Effective Utilization of Biomass Energy(Ⅱ)

(Effects of Ethanol Fuel on Compression Ignition Engine's Performance)

Norihiro SAWA*, Shuichi KAJITANI* and Shozo HORI*

ABSTRACT—The engine performances and exhaust gas characteristics of pre-chamber type compression ignition engine operated with a composite emulsified fuel made by gas oil, ethanol and water were investigated. As results, the thermal efficiency of the composite emulsified fuel operation was the same level as that of gas oil operation. And the ethanol distributed in the gas oil promoted the diffusion combustion duration, which was indicated the shortened total combustion duration. Therefore, the maximum thermal efficiency was achieved at a little advanced injection timing as compared to the water/gas oil emulsified fuel operation. The NO_x and smoke emission with the composite emulsified fuel operation reduced about a half of gas oil operation with the same level of engine noise.

1. ま え が き

近来、化石エネルギー（石油）資源の枯渇が問題視されているが、太陽エネルギーは莫大で、年間 3×10^6 EJ といわれ、化石エネルギー資源の約75倍に相当する⁽¹⁾。このため、太陽エネルギーに依存したバイオマス由来のアルコールへの転換が主要な研究課題といえる。エネルギー効率のよい C₄ 光合成経路をもつ作物の増産が太陽エネルギーの効率よい補足になり、これら作物からのエネルギー取得法に関する研究も着実に進展している。とくに、農産物資源に富むブラジルやアメリカでは、ガソリン混和用アルコールがアルコール発酵で生産され、アルコール混入ガソリンは Gasohol と名づけられ、実用されている。しかし、エネルギー源のより一層

のアルコールへの転換を計るためには、産業用動力源である圧縮点火機関（ディーゼル機関）への適用が必要不可欠である。アルコールを燃料とする圧縮点火機関においてはアルコールの低セタン価と高気化潜熱とに起因する着火性の悪さを解決し、その特性を十分に活用することが必要である。そのためには、(1)着火促進剤の添加、(2)補助燃料による着火、(3)雰囲気条件の改善、(4)外部着火方式の採用などが挙げられ、種々の研究が試みられている。しかし、これらの研究は工業生産性の高いメタノールに関するものが主流をなしている^{(2)~(4)}。

本研究ではエタノールの有効利用を取り上げ、含水エタノールと軽油からなる複合乳化燃料を予燃焼室式圧縮点火機関に供給した場合の機関性能、燃焼特性お

*茨城大学工学部機械工学科（日立市中成沢町）

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

および排気特性に及ぼす影響を実験的に調べた。なお、含水メタノールと軽油の複合乳化燃料についても同様の実験を行い、代表的実験結果について比較検討した。その結果を次に述べる。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

供試機関は予燃焼室式四サイクル圧縮点火機関で、その主要緒元は内径×行程95×115mm、行程容積815 cm³、圧縮比20、定格出力 4.41 kW/20rps である。

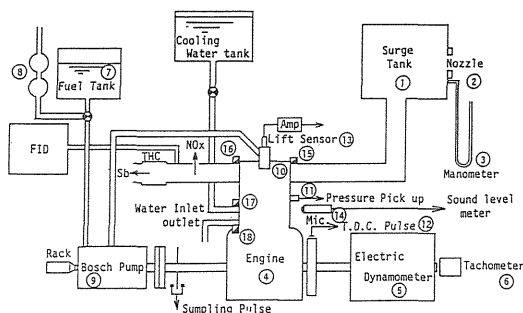


Fig. 1 Experimental apparatus

実験装置は図1に示すように、吸入空気量測定装置（サージタンク①、丸形ノズル②、マンメータ③）、供試機関④、交流形電気動力計（7.5 kW, 650~2000 rpm）⑤、機関回転計（電磁式回転検出器およびデジタル回転計）⑥、燃料流量測定装置（燃料タンク⑦、容積型燃料流量計⑧）、ボッシュ式燃料噴射ポンプおよびラック微動調整用マイクロメータ⑨、燃料噴射弁（ピントルノズル）⑩などから構成されている。さらに燃焼圧力測定用歪計式指圧計⑪、上死点マーカ⑫、燃料噴射弁リフト・センサ（渦流型アナログ変位センサ）⑬、燃焼騒音測定用マイクロホンおよびサウンドレベルメータ⑭および吸気温度、排気温度、冷却水出入口温度測定用熱電対⑮、⑯、⑰、⑱を取り付けた。

排気特性としては全炭化水素 THC 濃度を FID ガスクロトグラフで、排煙濃度をボッシュ式煙濃度計で測定し、窒素酸化物濃度 NO_x は亜鉛還元ナフチルエチレンジアミン法 (JIS K0104) で、ホルムアルデヒド濃度 R-CHO は北川式検知管で測定した。

2.2 供試乳化燃料

実験に用いた燃料は軽油 (JIS 1 号規格, 密度 ρ

[gf/cm³] (4~20°C) : 0.84), エタノール : 0.789, メタノール : 0.79 および蒸留水である。安定した乳化燃料の製造には 2 液間の界面張力の低減と 2 液間の密度差の減少が必要である。2 液間の界面張力の低減には 2 種類の界面活性剤の混合使用によっても可能であり⁽⁵⁾, 一方分散相であるエタノール, メタノールに水を混合すると連続相である軽油との密度差は小さくなる。しかしながら混合領域によっては O/W 型乳化燃料となり機関の潤滑, 腐食の観点から適当でない。そこで W/O 型乳化燃料領域で, かつ水に対しアルコールの添加割合が最大となる 50~60% とし, これと軽油との乳化燃料を静止型管内混合機 (東レ製ハイミキサー)⁽⁶⁾ を用いて製造した。なお W/O 型には HLB 値 3.5~6.0 が適していること⁽⁵⁾ から界面活性剤は第一工業製薬製 S40-H (HLB 値 4) を軽油質量の 1% 添加した。ここで含水率 $y = G_w / (G_w + G_{em})$, 含水エタノール (メタノール) 率 $R_{em} = (G_w + G_{em}) / (G_w + G_{em} + G_o)$ と定義する。この際, 軽油, 水乳化燃料では $R = G_w / (G_w + G_o)$ で含水率とする。ただし, G は質量を, 添字 w, e, m, o はそれぞれ水, エタノール, メタノール, 軽油を表す。なお軽油, 水, エタノール複合乳化燃料を GWE 燃料, 軽油, 水, メタノール複合乳化燃料を GWM 燃料, 軽油, 水, 乳化燃料を GW 燃料と略記する。

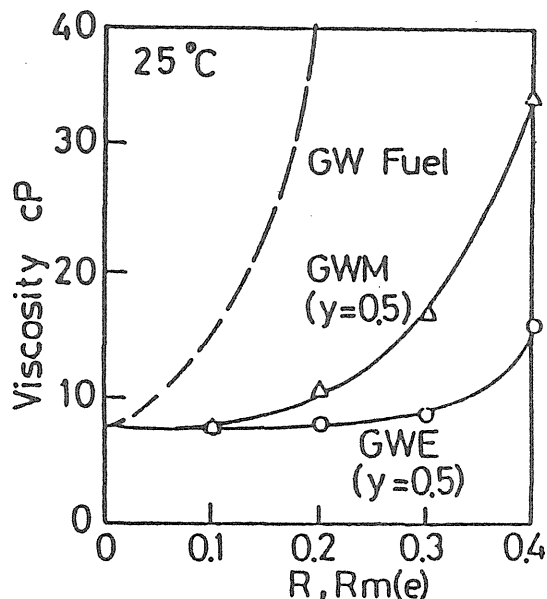


Fig. 2 Viscosity of fuel used

図2に $y=0.5$ で R_e , R_m を $0.1 \sim 0.4$ と変化させた際の粘度 (cP) を示す。GW 燃料に比較し、水にエタノールあるいはメタノールを混合した GWE(M) 燃料の粘度は大幅に低くなる。このときメタノールより、エタノールを添加した方が分散粒子径は大きくなり (界面活性剤とエタノールとの相互作用による凝集エネルギーの変化が関与する⁷⁾) 粘度は低くなる。したがって、GW 燃料の流動特性の改善のみを考えると、メタノールよりエタノールの水への添加の方が適しているといえる。

2.3 実験方法

実験は、まず所定の燃料で約15分間暖気運転を行ったのち、冷却水出口温度を $T_w=80\text{C} \pm 1\text{C}$ 、機関速度を $N=20\text{rps}$ および所定の平均有効圧力を $\text{BMEP}=0.542\text{ MPa}$ (4/4負荷) に設定し、燃料噴射開始設定時期を4~6種類に変え、それぞれの設定時期について吸入空気量 G_a 、燃料流量 G_f 、吸気温度 T_a 、排気温度 T_e 、冷却水出入口温度 T_{w1} , T_{w2} 、燃焼騒音 SPL, THC, S_b , R-CHO および NO_x 濃度を測定した。なお、実際の噴射開始時期は設定噴射開始時期とは必ずしも一致せず、負荷や燃料の種類によっても変わるので噴射弁リフトの立ち上がりから求めたいいわゆる動的噴射開始時期を噴射開始時期 θ_{inj} として用いた⁸⁾。さらに、シリンダ内燃焼圧力、噴射弁リフト、上死点マークなどを直流増幅器を通してデジタルメモリスコープに500サイクル同時記録し、デスクトップ・コンピュータを用いてその平均圧力線図を求め、その線図を用いて次式から有効熱発生率 $(dQ_e/d\theta)$ をクランク角 1C A 間隔で算出した。

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{1}{\kappa - 1} \left(\kappa P \frac{dV}{d\theta} + V \frac{dP}{d\theta} \right)$$

ここに、 θ : クランク角, κ : 比熱比, P : 圧力, V : シリンダ体積である。

この平均圧力線図および有効熱発生率曲線から燃焼特性値として図3に示すように燃焼最高圧力 P_{max} 、燃焼最高圧力上昇率 $(dP/d\theta)_{max}$ 、予混合燃焼の最高有効熱発生率 $(dQ_p/d\theta)_{max}$ およびこれらの生成クランク角 $\theta(P_{max})$, $\theta[(dP/d\theta)_{max}]$, $\theta[(dQ_p/d\theta)_{max}]$ さらに図3で定義した着火遅れ θ_{lag} 、燃焼期間 θ_c などを求めた。このような実験を燃料の種類を変えて実施した。

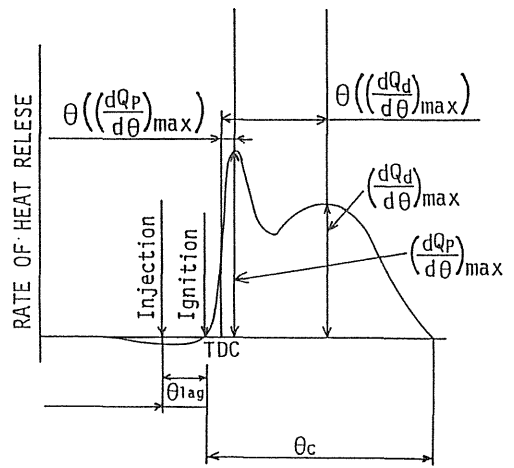
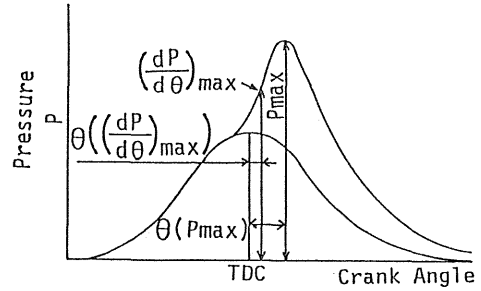


Fig. 3 Definition of combustion characteristics

3. 実験結果および考察

3.1 機関性能 (熱効率)

エタノール・水・軽油乳化燃料を用いた場合もメタノール・水・軽油乳化燃料も同様の実験結果が得られたので、前者の実験結果を ($y=0.5$) と後者の $R_m=0.4$ ($y=0.5$) の実験結果を代表例として図4に示す。図においては、負荷一定 ($P_e=0.542\text{ MPa}$) の実験のため、 η_e は特定の噴射開始時期 θ_{inj} で最大となり、その値 $\eta_{e,max}$ および $\eta_{e,max}$ の与える θ_{inj} は含水エタノール率 R_e や含水メタノール率 R_m に比例して順次増加している。これは着火遅れ期間が R_e や R_m に比例して増加するためである。図5には供給燃料の気化潜熱 (L.H.) と着火遅れとの関係を示しているが、燃料の気化潜熱の大小が着火遅れを主として左右することがわかる。すなわち、気化潜熱による作動ガスの温度降下は (全てが上死点前 10C A で気化すると仮定)、

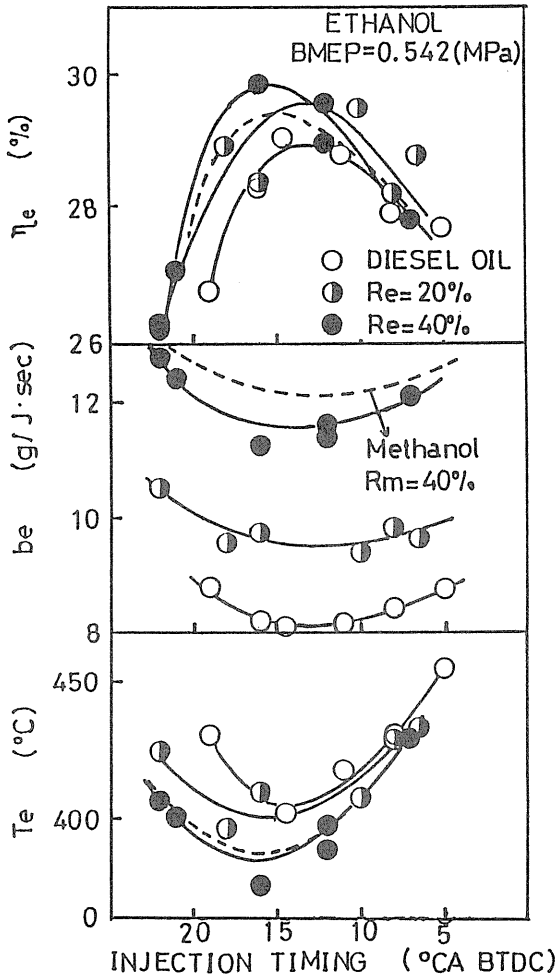


Fig. 4 Engine performance and injection timing

$R_{e(m)}=0.2$ で $30\sim 35^\circ\text{C}$, $R_{e(m)}=0.4$ で $46\sim 60^\circ\text{C}$ となることから当然ながら $R_{e(m)}$ が増加すると着火遅れ期間は増加し、また噴射開始時期が上死点に近づくとも圧縮による作動ガスの温度上昇効果で着火遅れ期間は短縮する。したがって、噴射開始時期を変化させたときの着火遅れ期間は θ_{inj} が上死点に近づくに伴い短縮することになるが、 $R_{e(m)}=0$ (軽油)と比較すると $R_{e(m)}$ が $0.2, 0.4$ と増加するとそれぞれ約 $1.5\sim 2.0^\circ\text{C}$ と増加する。いま、同一の R_e, R_m で比較すると、燃料間に大きな着火遅れ期間の差のないことがわかる。

次に、各 R_e, R_m につき正味熱効率の最大値 $\eta_{e,max}$ を与える噴射開始時期 θ_{inj} (条件A) における η_e, b_e, T_e および軽油を使用したときの正味熱効率の最大値 ($\eta_{e,max}$) と

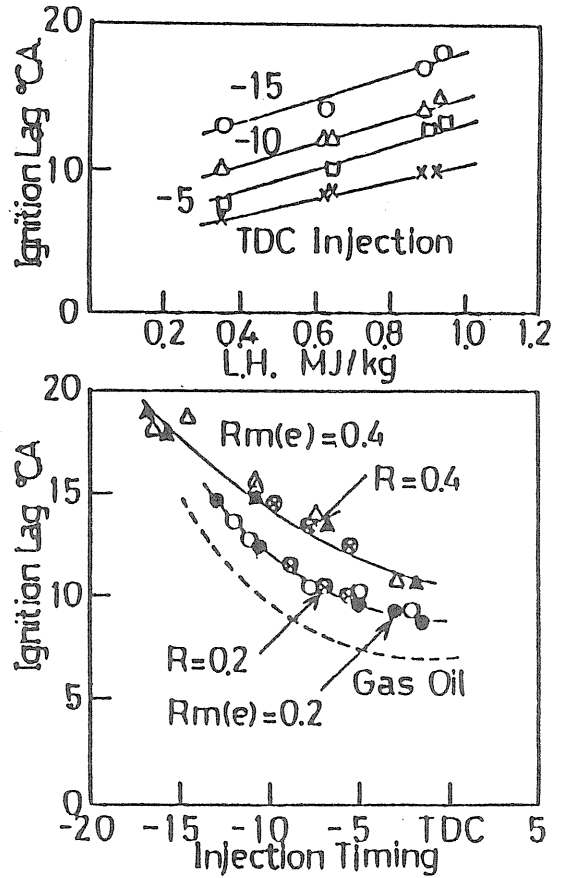


Fig. 5 Ignition lag and latent heat of fuel

同じ値の η_e を与える θ_{inj} (条件B) における η_e, b_e, T_e を読み取り、比較したのが図6である。図によると熱効率 η_e の向上にはメタノール系よりもエタノール系が有効であり、しかも $R_e=20\%$ 程度まではエタノールの添加量が多いほど η_e が向上することがわかる。なお、燃料消費率はメタノール系もエタノール系もほぼ同じであるが、排気温度は発熱量の高いエタノール系の方が全般的に高くなっている。

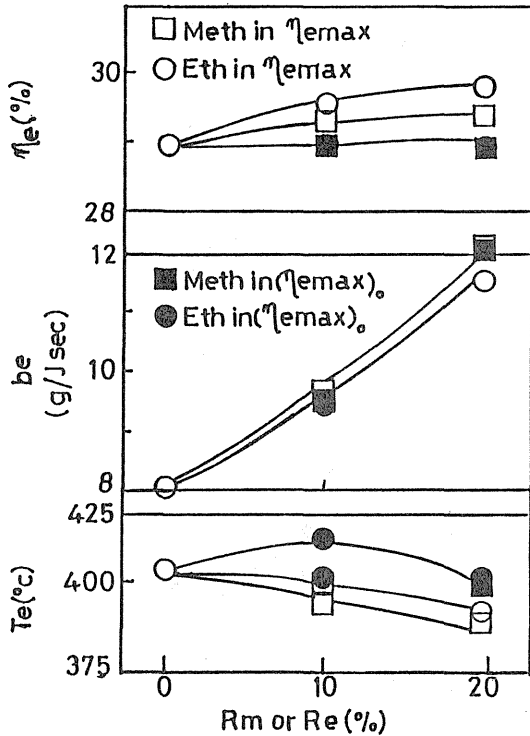


Fig. 6 Engine performance and ethanol content (R_e), methanol content (R_m)

3.2 排気特性

燃料噴射開始時期 θ_{inj} を変えた場合の排煙濃度 S_b および炭化水素濃度 THC を図 7 に、 $\eta_{e,max}$ を与える θ_{inj} (条件 A) および ($\eta_{e,max}$) と同じ値の η_e を与える θ_{inj} (条件 B) における S_b, THC 濃度を図 8 に、着火遅れ θ_{lag} と S_b および THC 濃度との関係を図 9 に示す。図において、 S_b および THC 濃度は θ_{inj} が小さくなると著しく低減し、 θ_{inj} の選択がきわめて重要であることがわかる。なお、同一 θ_{inj} で比較すると、 R_e や R_m の影響も大きく、とくに S_b 濃度は R_e, R_m の増加につれて著しく低減する。したがって、図 4 と対比すると θ_{inj} としては $\eta_{e,max}$ を与える θ_{inj} に選定し、 R_e, R_m を増加させると η_e の向上と THC および S_b の低減が達成できることになる。なお、 η_e の向上にはエタノール系がメタノール系より有利であったが、 S_b の低減に関しては若干メタノール系が有効のように思われる。このように、 R_e, R_m の増加に伴って S_b が減少する原因としては、供給燃料の同一発熱量当たりの①含有炭素量の低下、②蒸発潜熱の増加に伴う燃焼温度の低下、したがって

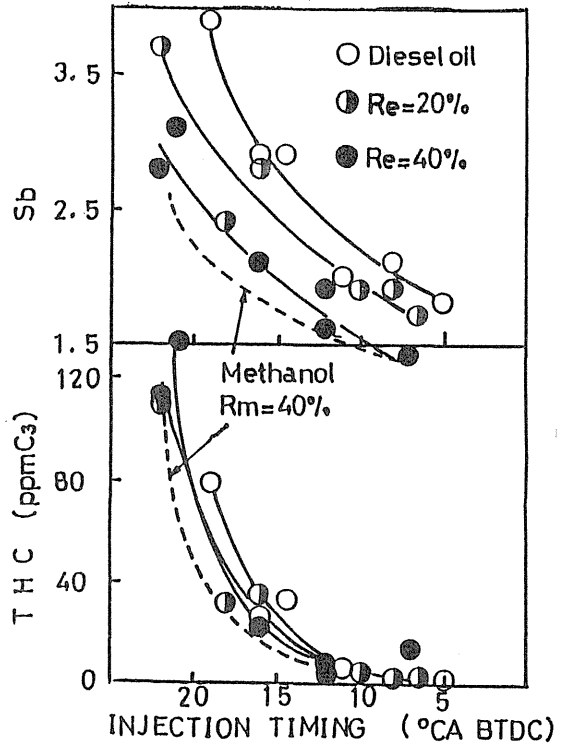


Fig. 7 Exhaust emission and injection timing

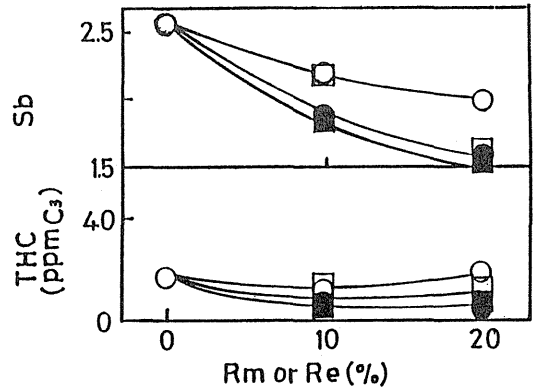


Fig. 8 Exhaust emission and R_e, R_m

熱解離の減少などが挙げられる。同一 R_e, R_m で比較すると着火遅れ θ_{lag} が短いほど (θ_{inj} を小さくすると θ_{lag} も短くなる) THC および S_b 濃度は減少しているが、これは θ_{lag} が短いほど、予混合燃焼割合は小さく、拡散燃焼割合が大きくなるので、前者における急激燃焼時の生成が少なくなるためと思われる。

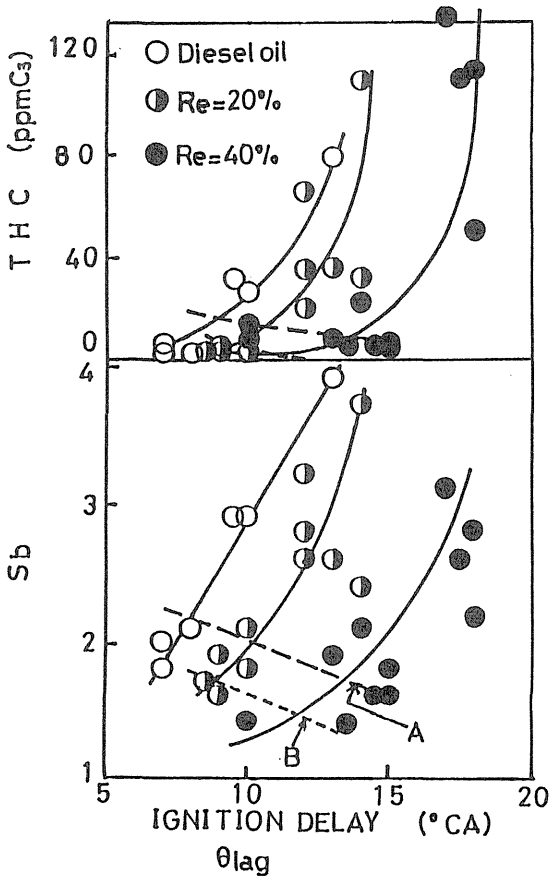


Fig. 9 Exhaust emission and injection delay

3.3 燃焼特性

燃焼特性値として最大燃焼圧力 P_{max} , 最大圧力上昇率 $(dP/d\theta)_{max}$, これと関連が深いとされている機関騒音 SPL を図10に, $P_{max}, (dP/d\theta)_{max}$ の生成時期 $\theta(P_{max}), \theta[(dP/d\theta)_{max}]$ を図11に, 最大予混合有効熱発生率 $(dQ_p/d\theta)_{max}$, 最大拡散熱発生率 $(dQ_d/d\theta)_{max}$, これらの生成時期 $\theta[(dQ_p/d\theta)_{max}], \theta[(dQ_d/d\theta)_{max}]$ を図12に, さらに着火遅れ θ_{lag} および燃焼期間 θ_c を図13に示している。図において, 全般的に R_e, R_m が大きいほど, $P_{max}, (dP/d\theta)_{max}, (dQ_p/d\theta)_{max}$ およびこれらと関連の深い SPL は増加し, この傾向は θ_{inj} が大きいほど顕著である。この場合, R_e, R_m に比例して着火遅れ θ_{lag} が増加するまで, $\theta(P_{max}), \theta[(dP/d\theta)_{max}]$ および $\theta[(dQ_p/d\theta)_{max}]$ はいずれも後にずれる (大きくなる)。これに対し, $(dQ_d/d\theta)_{max}$ は R_e, R_m に関係なく θ_{inj} が小さくなると増加する傾向がある。したがって,

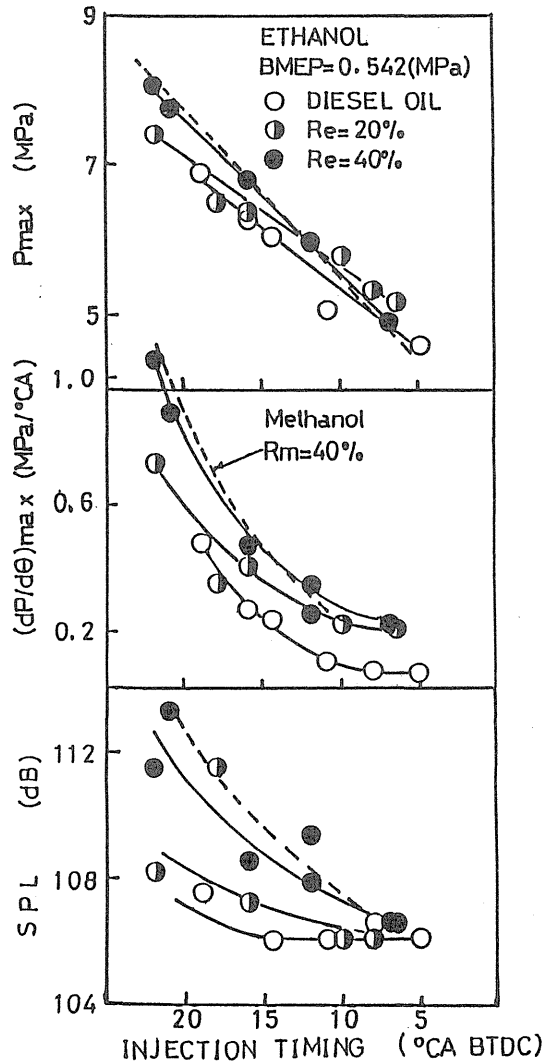


Fig. 10 Combustion characteristics and injection timing

$(dQ_p/d\theta)_{max}$ と $(dQ_d/d\theta)_{max}$ との間には負の相関があることがわかる。このような燃焼特性値の R_e, R_m による変化を図6と同様に条件A, Bで比較したのが図14, 図15である。図によると, それぞれの R_e, R_m について, (η_{emax}) と同じ η_c を与える θ_{inj} を選択するならば, P_{max} および $(dP/d\theta)_{max}$ は R_e, R_m に関係なくほぼ一定で, $R_e, R_m=40\%$ でも SPL の増加を 1dB におさえることができる。

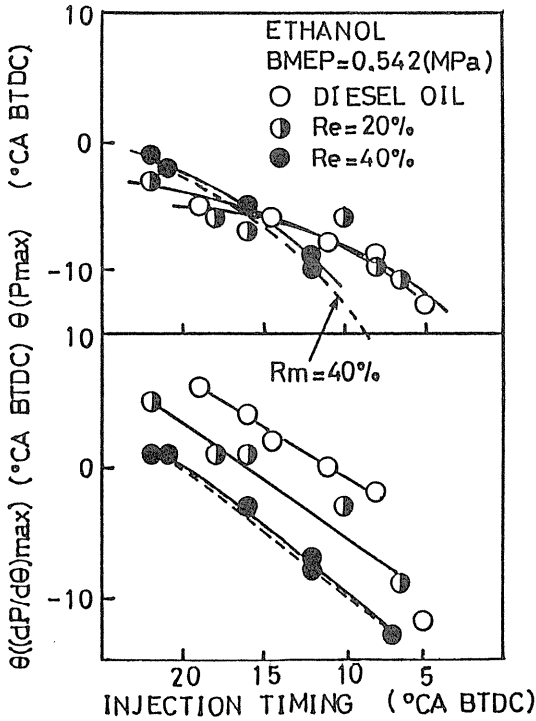


Fig. 11 Combustion characteristics and injection timing

次に、 P_{max} および $(dP/d\theta)_{max}$ の値を着火遅れ θ_{lag} で表示したのが図16である。同図には $(\eta)_{max}$ を与える θ_{inj} および $(\eta_{e,max})$ と同じ η_e を与える θ_{inj} に θ_{inj} を設定した場合の実験結果を点線A, Bで併記している。図によると $P_{max}, (dP/d\theta)_{max}$ いずれも θ_{lag} に比例して増大しており、本実験範囲では θ_{lag} および Re, R_m に比例して増加することがわかる。いま、文献(9)の方法を用いて熱発生率曲線から予混合燃焼割合 F_{pre} および予混合燃焼量 G_{pre} を求め、 θ_{inj} および θ_{lag} でまとめた。その結果を図17および図18に示す。図において、 F_{pre} および G_{pre} は $\theta_{inj}=16^\circ$ A BTDC付近で最小に、また θ_{lag} が或る値で最小になる傾向がある。文献(9)では実験範囲が狭いが θ_{inj} が小さいほど F_{pre}, G_{pre} は増加しており、その理由として θ_{lag} の増加を挙げているが、本実験では出力一定実験であり逆に θ_{lag} は θ_{inj} に比例して増加するので $\theta_{inj} > 16^\circ$ A BTDCの範囲で F_{pre}, G_{pre} の増加の説明にはなるが、 $\theta_{inj} < 12^\circ$ A BTDCにおける F_{pre}, G_{pre} の増加を説明することはできない。同図には運転時の空気過剰率 λ を併記しているが F_{pre}, G_{pre} と λ の間には負の相関があり、 F_{pre}, G_{pre} には θ_{lag} のみならず

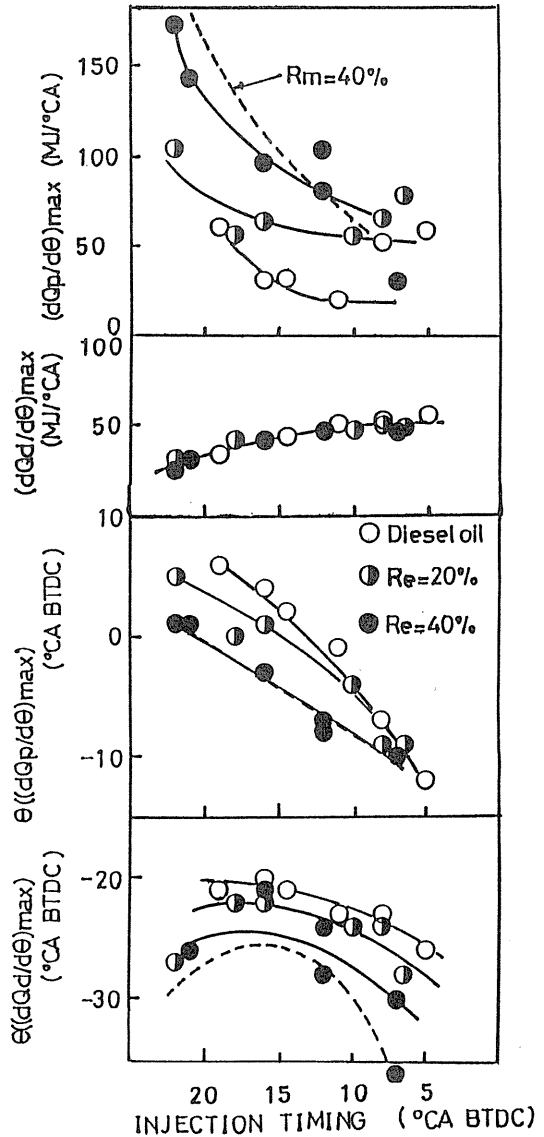


Fig. 12 Combustion characteristics and injection timing

λ が関与していることがわかる。したがって、 S_b およびTHCと F_{pre}, G_{pre} の間には必ずしも相関があるとはいえない。

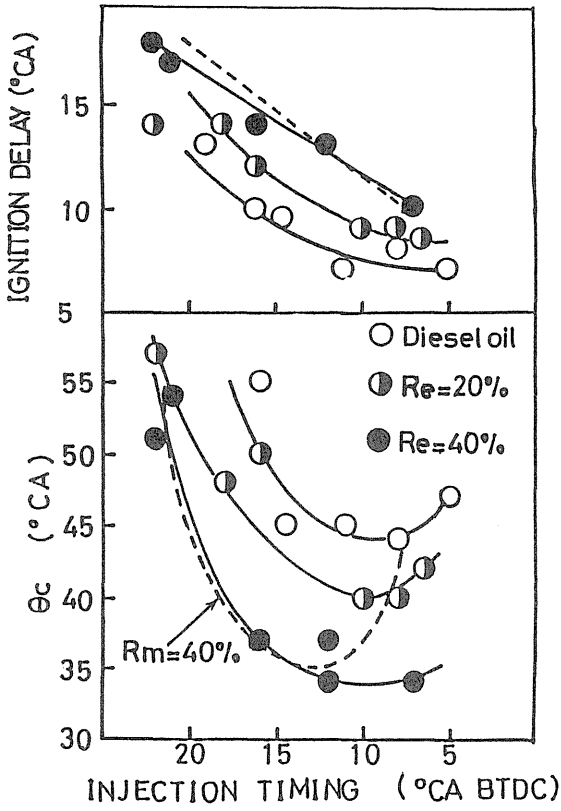


Fig. 13 Combustion characteristics and injection timing

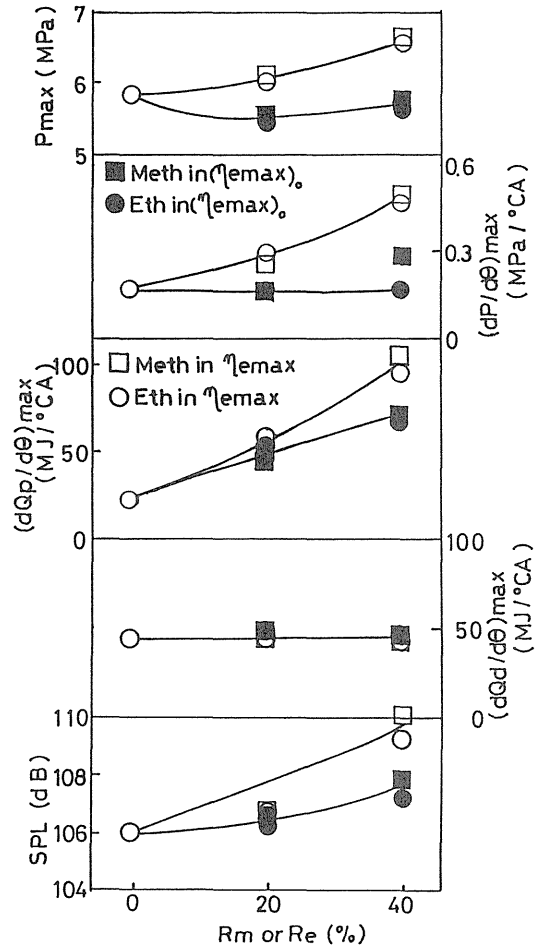


Fig. 14 Combustion characteristics and R_e , R_m

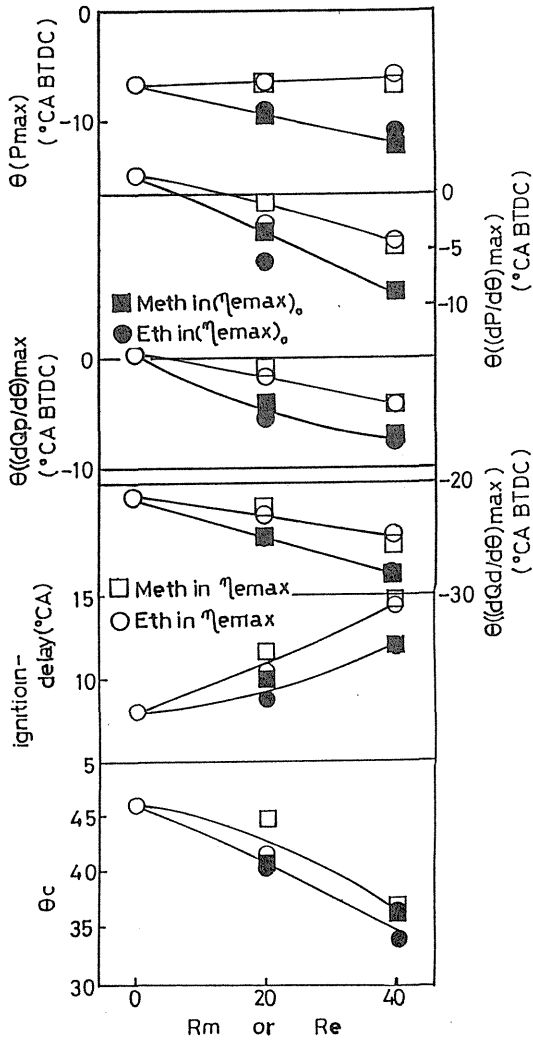


Fig. 15 Combustion characteristics and R_m, R_e

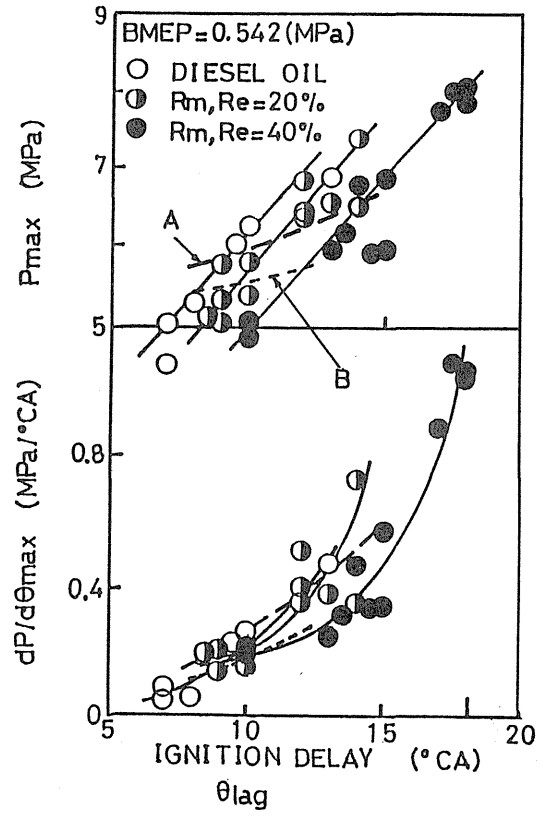


Fig. 16 Combustion characteristics and injection delay

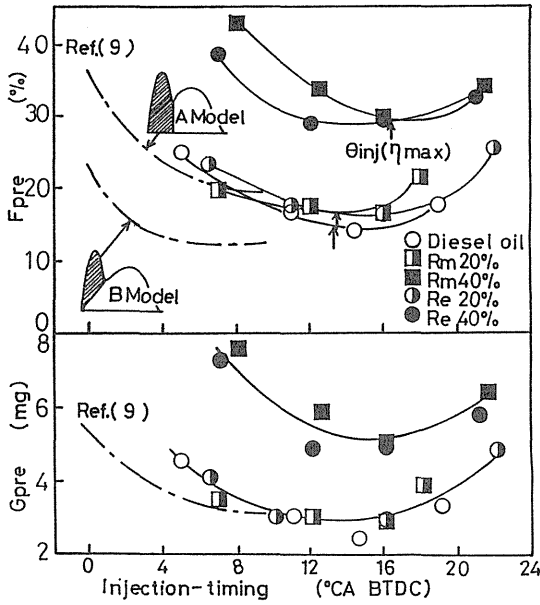


Fig. 17 Pre-combustion ratio and injection timing

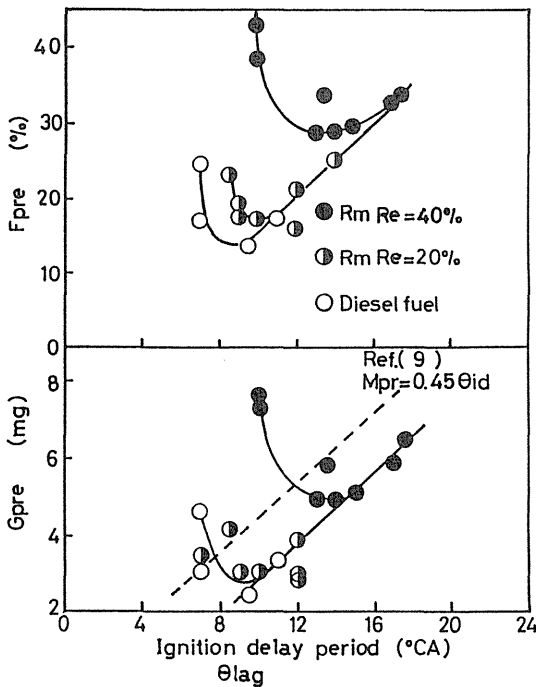


Fig. 18 Pre-combustion ratio and ignition delay period

4. まとめ

エタノール・水・軽油乳化燃料を予燃焼室式圧縮点火機関に使用し、機関性能、排気エミッション（主として S_b および THC ）および燃焼特性を実験的に調べたが、その結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 正味熱効率 η_e は所定の噴射開始時期 θ_{inj} で最大 η_{emax} となり、この θ_{inj} は含水エタノール率 R_e に比例して増加する。 R_e に応じて最適の θ_{inj} を選択するならば $R_e \leq 20\%$ の範囲では R_e に比例して η_e は増加する。この場合メタノール系燃料よりもより有用である。
- (2) 排煙濃度 S_b および全炭化水素濃度 THC は噴射開始時期 θ_{inj} が上死点に近づくほど (θ_{inj} が小さい)、著しく減少する。同一 θ_{inj} で比較すると R_e が大きいほど S_b および THC 濃度は低減するが、とくに前者の低減は著しい。したがって η_{emax} を与える θ_{inj} を選定し、 R_e を増加させると η_e の向上と S_b および THC 濃度の低減を達成することができる。
- (3) 一般に R_e が増加すると燃焼最高圧力 P_{max} 、最大燃焼圧力上昇率 $(dP/d\theta)_{max}$ およびこれらと関連の深い機関騒音 SPL は増加し、この傾向は θ_{inj} が大きいほど顕著である。しかし (η_{emax})_{gas oil} と同じ η_e を与える θ_{inj} を選択するならば $P_{max}, (dP/d\theta)_{max}$ は R_e に関係なくほぼ一定で $R_e = 40\%$ でも SPL の増加を 1dB 以内におさえることができる。

終わりに、この研究を行うにあたり実験を担当した、当時学部学生であった清水伯紀君（現鈴木自動車工業㈱）および森田勝利君（現マツダ）の両君に謝意を表す。

参考文献

- (1) 山澤編：バイオマスエネルギー，朝倉書店，(1982)
- (2) Nagakura K.ほか：Proc.8th Int. Symp.AFT (1989),567
- (3) 藤田ほか：日機論，53-486,(1984),654
- (4) 澤ほか：日立地方講演会講演論文集，(1987),105
- (5) 辻：乳化・可溶化の技術，工学図書，(1979)
- (6) 東レ㈱：技術資料，ND ENG-HM-EML-2,(1979)
- (7) 北村ほか：石油学会誌，30-4,(1987)
- (8) 梶谷ほか：日機論，56-526,(1990-6),1818
- (9) Alkidas,A.C.:ASME,'86-ICE-4,(1986)