

バイオマス・エネルギーの有効利用に関する研究（I）

（菜種油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31日受理）

A Study on Effective Utilization of Biomass Energy (I)

(Adaptability of Rape-Seed Oil for Compression Ignition Engines)

Norihiro SAWA*, Shuichi KAJITANI*, Shozo HORI*

ABSTRACT—In order to develop pre-combustion chamber compression ignition engine using rape-seed oil as a fuel, combustion process, exhaust emission and power characteristics were measured. And the experimental results for the rape-seed oil fuel were compared with the values for normal gas-oil fuel operation. Moreover, the same experiments for emulsion fuel composed of rape-seed oil and hydrous methanol were carried out.

Consequently, it was cleared that rape-seed oil and its emulsion fuel are usefull as fuel of pre-combustion chamber compression ignition engine.

1. ま え が き

近来、石油系エネルギーの代替として、バイオマス・エネルギーの利用が注目され、陸生バイオマス（林産、農産および廃棄物バイオマス）や水生バイオマスの現存量の推定と利用度、取得バイオマス量などについての事前評価が行われている。農産バイオマス、とくに草本性植物の種子より採取される植物油は身近に存在するので、石油系燃料の代替として内燃機関に利用することが検討され、ディーゼル機関に適用した場合の運転性能、排煙濃度、潤滑油劣化など実用性に重点をおいた実験的研究^{(1)~(9)}が活発である。とくに菜種油は植物油の中では発熱量が高いので、軽油と比較検討され遜色のないことが報告されている^{(9)~(9)}。しかし、詳細にみると運転条件（たとえば負荷）によって正味熱

効率の優劣は逆転しており、その理由は明確でない。これを解明するためにはその燃焼特性を明らかにする必要がある。

元来、菜種油は(1)揮発性が悪く、引火点が高い。(2)軽油よりも動粘度が高く、噴霧粒径が大きい。(3)含酸素燃料であり、着火後の燃焼速度は速く、可燃範囲も広い。(4)炭素/水素比が軽油より低い（約7に対して約6.4）。(5)発熱量は軽油より低いが理論空燃比での単位混合気量当たりの発熱量は軽油とほとんど同じである、ことなどが特徴的で、これらが特に着火特性を左右し、しかも運転条件によってその影響度合も異なり、機関性能、排気特性などに複雑に影響することが推測できる。そこで、本研究では予燃焼室式ディーゼル機関に菜種油を使用した場合の燃焼特性や機関性能の解明に主眼をおき、軽油を燃料とした場合と比較検討し

た。さらに、全負荷の場合についてのみ菜種油と含水メタノールとの乳化燃料を使用し、その特徴についても若干考察したので報告する。

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・ディーゼル機関で、その主な諸元を表1に示す。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、丸型ノズル②）、マノメータ③）、供試機関④、交流電気動力計（7.5 KW,650~2500rpm）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、燃料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、冷却水出入り口温度測定用熱電対⑮、⑯、⑰、⑱を取り付けた。

Table. 1 Specification of engine used

| | |
|-----------------------|---|
| Engine type | Pre-Combustion chamber type diesel engine |
| Cylinder number | 1 |
| Rated output | 4.41 kW/20 rps |
| Cylinder bore×stroke | 95×115 mm |
| Stroke volume | 815 cm ³ |
| Compression ratio | 1:20 |
| Fuel pump | Bosch type |
| Fuel nozzle | Pintle type |
| Fuel injection timing | 12~17° CA BTDC |

排気特性としては全炭化水素 THC 濃度を FID ガスクロマトグラフで、排煙濃度 S_b 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。

燃料は市販の軽油、菜種油およびメタノールを使用した。菜種油と含水メタノールの乳化燃料は静止型管内混合器（東レ製）を用いて乳化した、いわゆる油中含水メタノール形乳化燃料である。この場合、含水率 $Y=G_w/(G_w+G_m)$ 、含水メタノール含有率 $R_m=(G_m+G_w)/(G_m+G_w+G_i)$ と定義する。ここに G_m 、 G_w 、 G_i はメタノール、水および菜種油の質量である。

2.2 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後、冷却水出口温度を $T_w=80\pm 1^\circ C$ 、機関速度を $N=20$ rps および所定の平均有効圧力 BMEP 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 、冷却水出入り口温度 T_{w1} 、 T_{w2} 、燃焼騒音 SPL、全炭化水素 THC、排煙 S_b 、アルデヒド R-CHO、および窒素酸化物 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。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 $1^\circ C$ 間隔で算出した。

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

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2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 $(dQ_e/d\theta)_{max}$ 、およびこれらの生成クランク角 $\theta(P_{max})$ 、 $\theta[(dP/d\theta)_{max}]$ 、 $\theta[(dQ_e/d\theta)_{max}]$ 、さらに図2で定義した着火遅れ期間 θ_{lag} 、燃焼期間 θ_c などを求めた。このような実験を BMEP=0.542 MPa

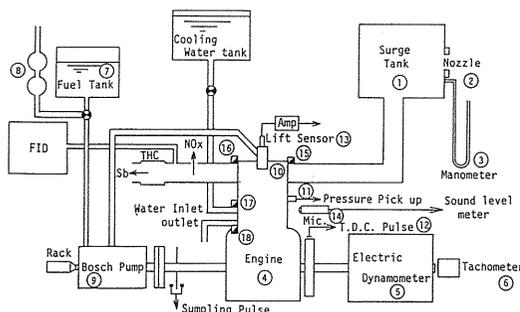


Fig. 1 Experimental apparatus

(4/4 負荷), 0.271 MPa (2/4 負荷) および 0.049 MPa (ほぼ無負荷) で実施した。次に, この一連の実験について燃料の種類を変えて実施した。

火遅れ期間 θ_{lag} は増加している。このように θ_{lag} は燃料噴射開始時の機関温度 (主として予燃焼室内壁温度およびシリンダ内圧縮空気温度) と燃料の性状 (蒸発性状, 着火性など) に大きく左右され, BMEP の影響は比較的小さいことがわかる。

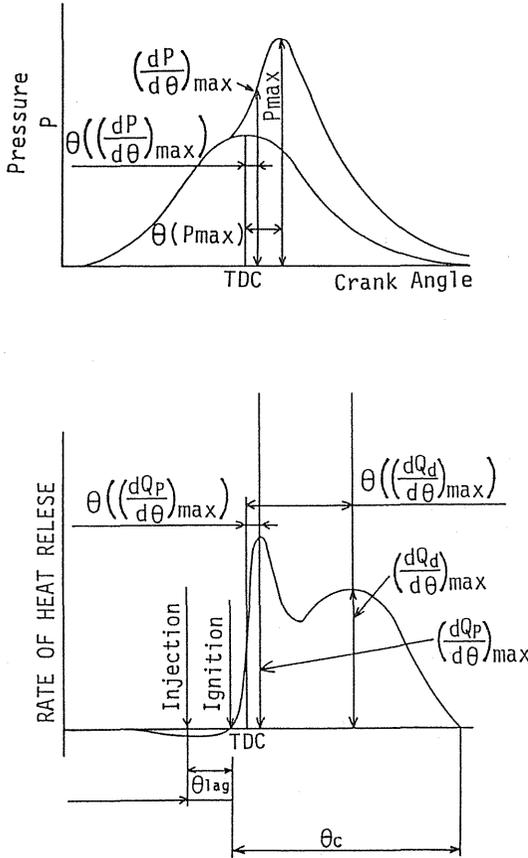


Fig. 2 Definition of combustion characteristics

3. 実験結果および考察

3.1 燃焼特性

代表的燃焼特性値として, 機関性能と関連の深い燃焼最高圧力 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 $\theta(P_{max})$, $\theta[(dP/d\theta)_{max}]$, $\theta[(dQ_p/d\theta)_{max}]$, さらに着火遅れ期間 θ_{lag} , 燃焼期間 θ_c などを求め, 図 3, 4, 5, 6, 7 および 8 に示している。図 3~図 8 において, いずれの BMEP の場合も燃料噴射開始時期 θ_{inj} が上死点に近いほど着火遅れ期間 θ_{lag} は短い。また, 燃料の種類について比較すると (図 4), 乳化燃料 > 菜種油 > 軽油運転の順に着

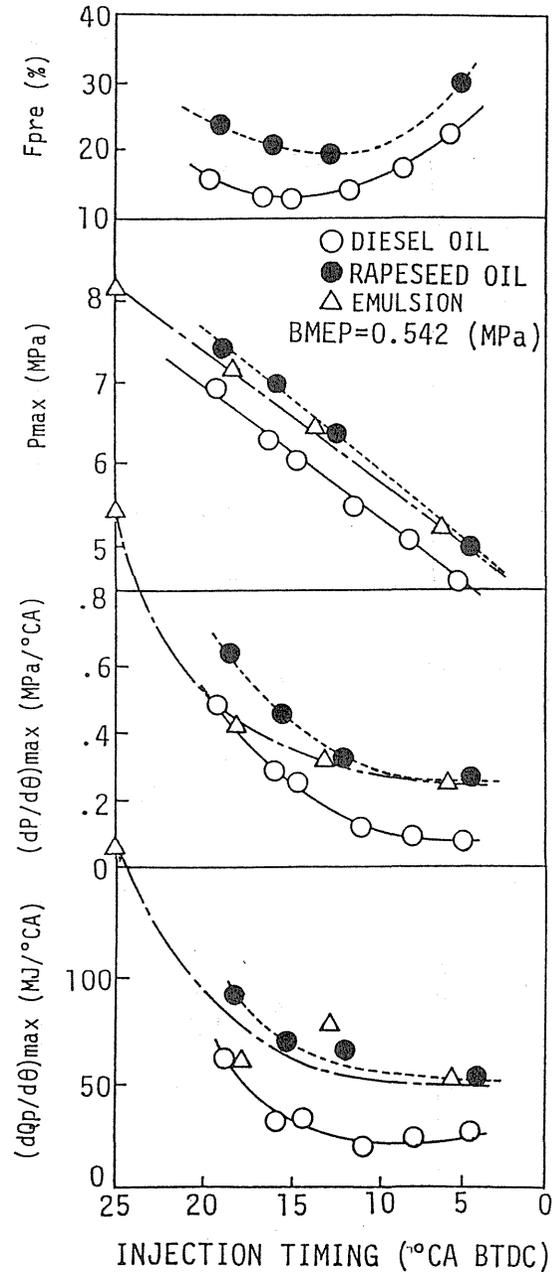


Fig. 3 Combustion characteristics and injection timing (BMEP=0.542 MPa)

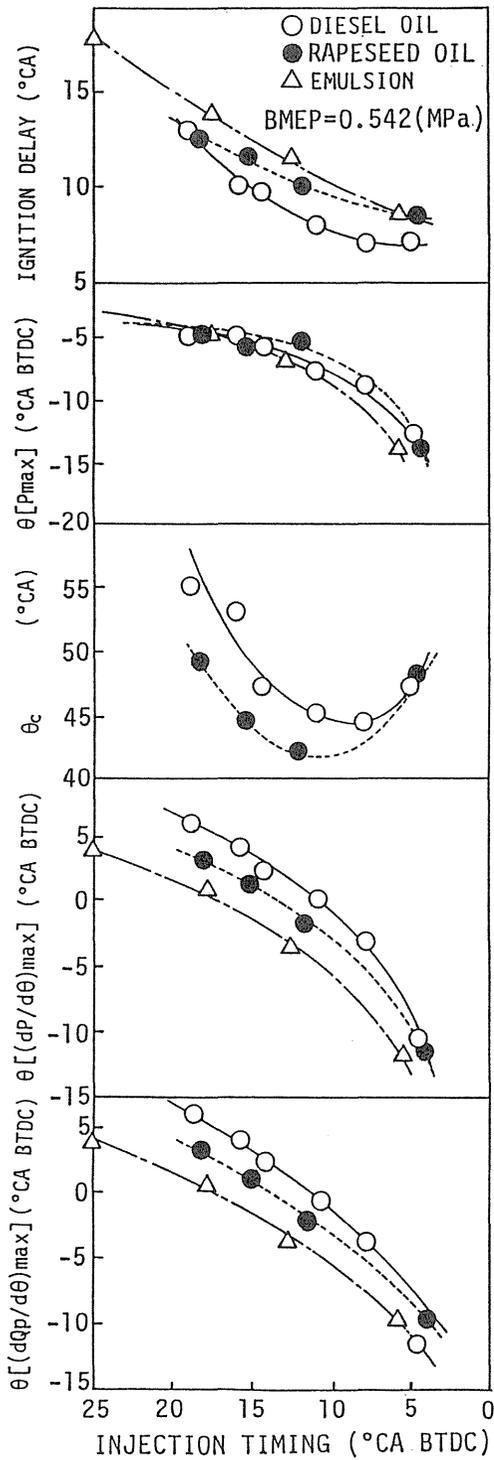


Fig. 4 Combustion characteristics and injection timing (BMEP=0.542 MPa)

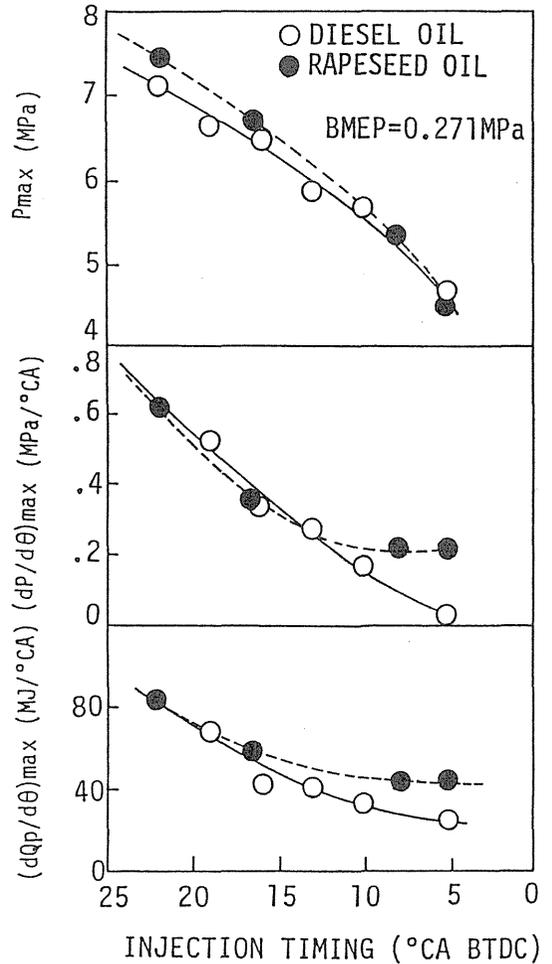


Fig. 5 Combustion characteristics and injection timing (BMEP=0.271 MPa)

図3には A.C.Alkidas¹⁰⁾ の手法で有効熱発生率曲線から予混合燃焼割合 F_{pre} を求め、併記している。この場合、菜種油運転の方が軽油運転よりも着火遅れ θ_{ign} が大きいので、予混合燃焼割合 F_{pre} が大きい。このことは勿論のこと、 $(dQ_p/d\theta)_{max}$ や $(dP/d\theta)_{max}$ も大きく、その生成時期 $\theta[(dQ_p/d\theta)_{max}]$, $\theta[(dP/d\theta)_{max}]$ はいずれも早い。その結果、 P_{max} も高くなっており、さらに燃焼期間 θ_c は短い(燃焼速度が速い)。このことは「菜種油の方が着火性が悪いので θ_{ign} が大きく、予混合燃焼割合が大きいので空気利用度も悪い。その反面、燃焼を開始すると含酸燃料のため燃焼速度が速い」という特徴を持っていることを裏付けるものといえる。しかし、この特徴は BMEP が低いと(図5~図8) 機関温度が低いために現われず、菜種油運

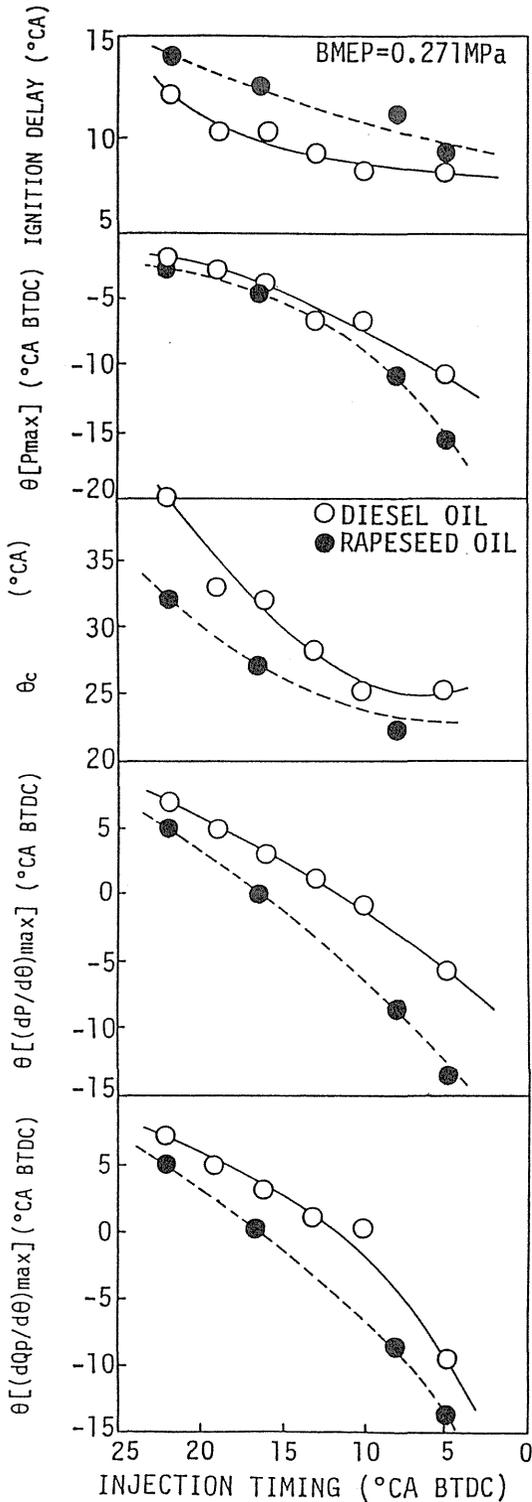


Fig. 6 Combustion characteristics and injection timing (BMEP=0.271 MPa)

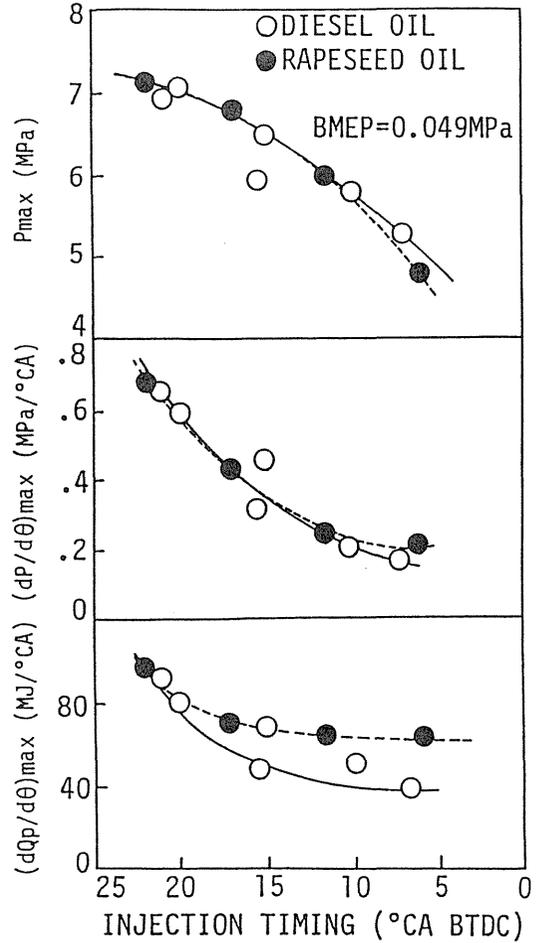


Fig. 7 Combustion characteristics and injection timing (BMEP=0.049 MPa)

転時と軽油運転時との差は小さくなっている。いずれの燃料においても、燃料噴射開始時期 θ_{inj} が上死点に近づくほど着火遅れ期間 θ_{lag} は短くなるので、予混合燃焼割合 F_{pre} , $(dQ_p/d\theta)_{max}$, $(dP/d\theta)_{max}$ および P_{max} の値は小さくなることは勿論である。上述のように菜種油運転時の $(dP/d\theta)_{max}$ や P_{max} が軽油運転時より高いことは、これと関連が深いといわれている燃焼騒音 SPL は図9に示すように必然的に高くなる。一般に SPL は θ_{lag} が大きいと増加する。

次に、 $(dP/d\theta)_{max}$, P_{max} および SPL の値を着火遅れ期間 θ_{lag} を用いて整理すると、図10に示すように $(dP/d\theta)_{max}$ および P_{max} 値は菜種油運転および軽油運転ともに同一曲線上に揃い、しかも θ_{lag} にほぼ直線的に増加する。これに対し SPL の値は θ_{lag} に比例して急

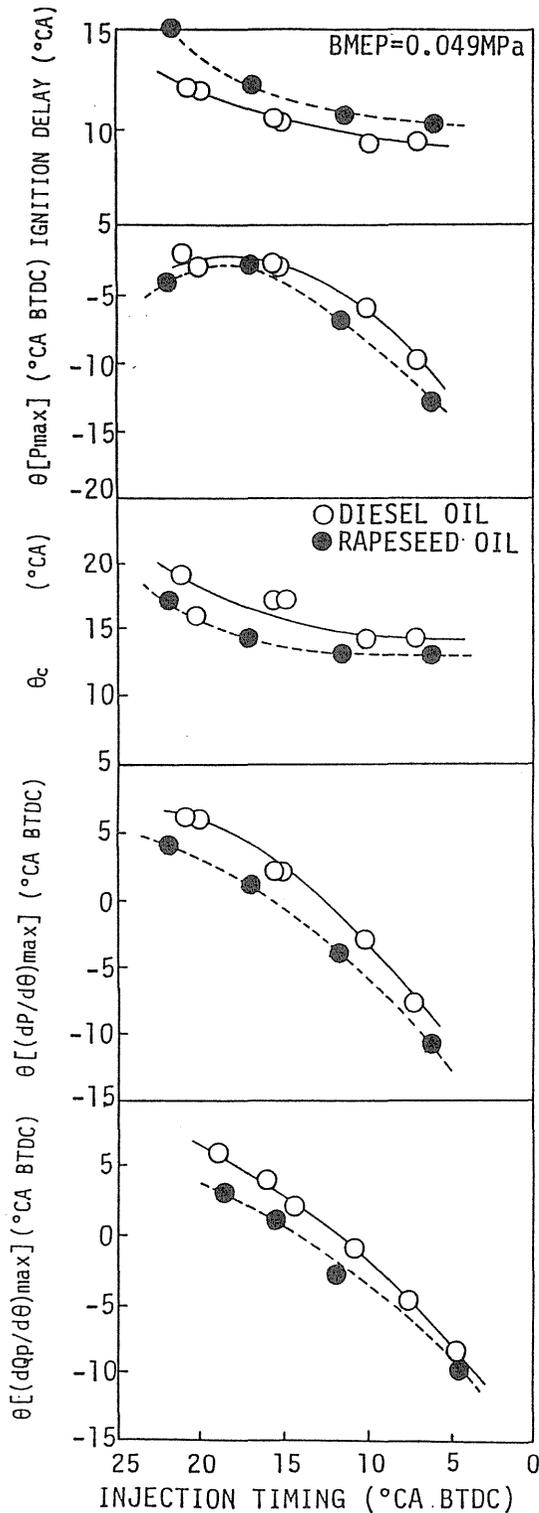


Fig. 8 Combustion characteristics and injection timing (BMEP=0.049 MPa)

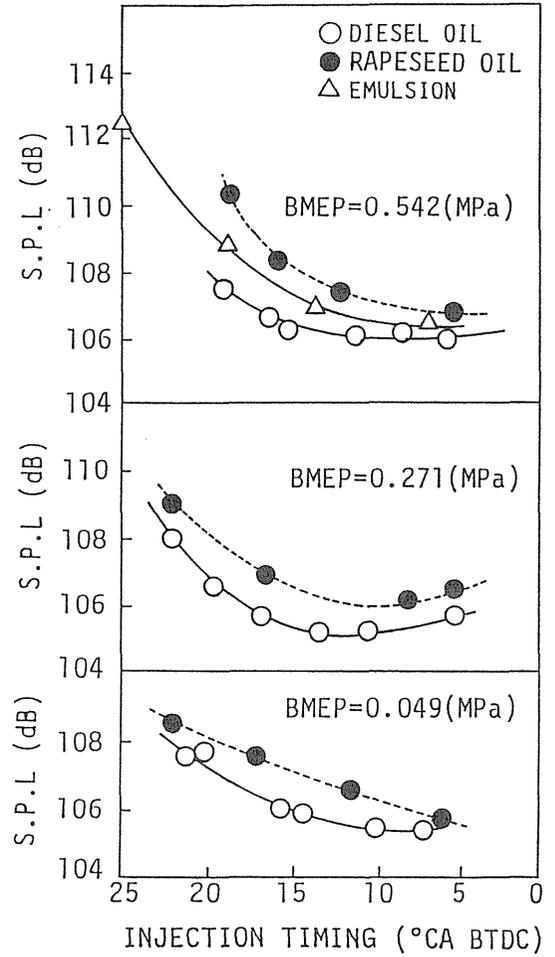


Fig. 9 Sound pressure level and injection timing

速に増加するが、同一の θ_{18} と比較すると菜種油運転時の SPL は軽油の場合よりも高い値を示している。このことは着火後の燃焼速度の速さも SPL に関与することを示唆しているものといえる。しかし、 θ_{18} の影響は大きく、とくに $\theta_{18} > 10^\circ\text{CA}$ となると SPL は急増している。燃焼騒音低減対策として燃焼速度を遅く（いわゆる緩やかな燃焼）することは有効な手段ではあるが、その反面等容度の低下による熱効率の低下を招くので燃焼騒音の低減対策としては θ_{18} の短縮が直接的な手法といえる。これに対し着火促進剤の利用が試みられているがまだ効果的な結果が得られていない。この解決には複雑ではあるが二分割噴射（パイロット噴射）¹⁴⁾や加熱燃料の噴射などが有効と考えられる。

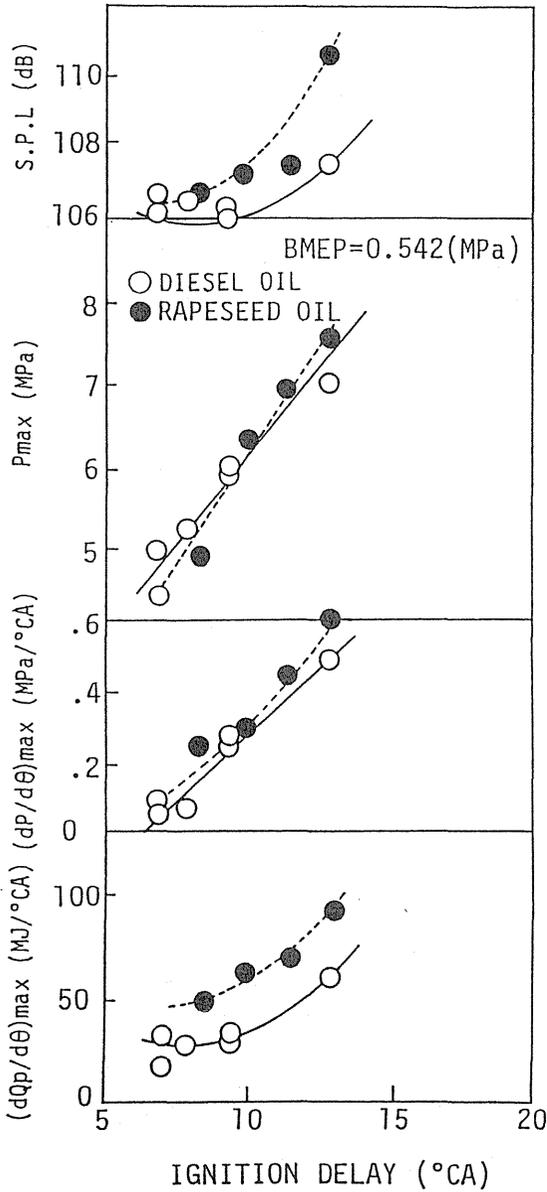


Fig. 10 Sound pressure level, combustion characteristics and ignition delay

3.2 機関性能および排気特性

菜種油運転時と軽油運転時の正味燃効率 BTE および燃料消費率 b_e を, 図11と12に, 空気過剰率 λ , 供給燃料中の炭素量 C を図13に示している。なお, 全負荷 (BMEP=0.542 MPa) の場合には, 菜種油・含水メタノールの乳化燃料運転 ($R_m=20\%, Y=60\%$) の実験結果

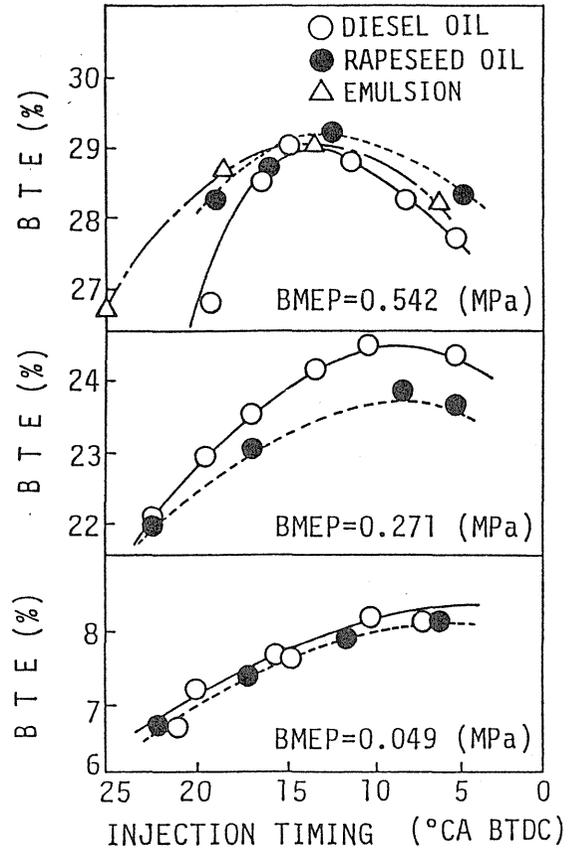


Fig. 11 Brake thermal efficiency and injection timing

を併記している。

図において, BTE の最大値を与える燃料噴射時期 θ_{inj} は燃料の種類に関係なくほぼ一定であるが, その値は全負荷で $\theta_{inj}=12^\circ\text{CA BTDC}$, 2/4 負荷では $\theta_{inj}=7^\circ\text{CA BTDC}$, 無負荷では $\theta_{inj}=7^\circ\text{CA BTDC}$ と負荷によって順次変化しており, 負荷の変化に応じて最適の θ_{inj} を選択することがきわめて重要なことがわかる。なお, BTE 曲線を実際に着火開始した時期 θ_{ig} でプロットすると BTE の最大値を与える θ_{ig} はいずれの負荷においても着火遅れ θ_{ig} の大きい菜種油の方が軽油運転時よりも 2~3°C 小さい (上死点に近い) という結果が得られる。また, $\theta_{ig}=4^\circ\text{CA BTDC}$ で等容度は最大値 (たとえば 4/4 負荷で 0.883) が得られた。

次に, BTE の値に注目すると, 全負荷では軽油運転時よりもわずかに高いが, 部分負荷では逆に菜種油運

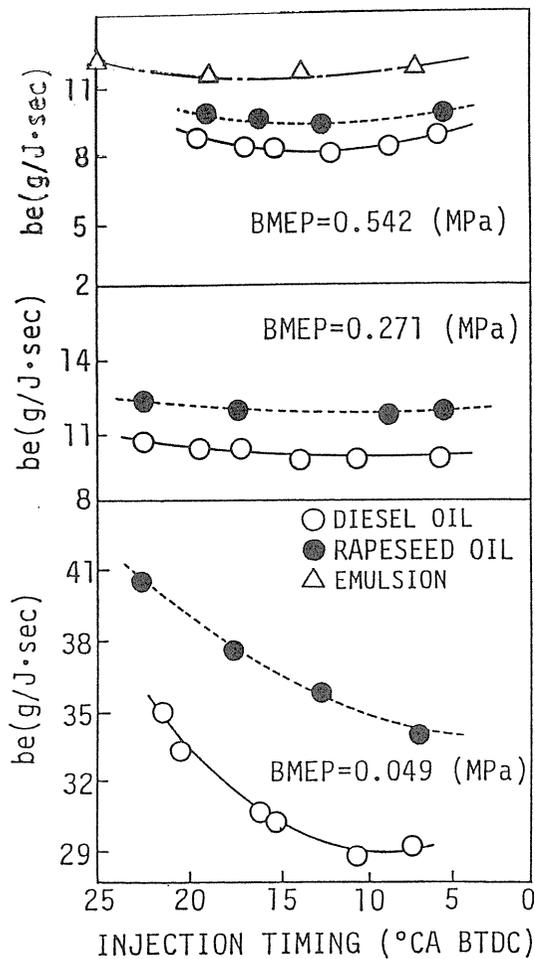


Fig. 12 Brake fuel consumption and injection timing

転時の方が低い。本来、菜種油は含酸素燃料で、しかも飽和脂肪酸と不飽和脂肪酸とからなるので、高温・高圧下では速く分解燃焼するので、燃焼速度も速く、可燃範囲も広い筈であるが、その反面、低温・低圧下では着火性が悪く(着火遅れが大き)予混合燃焼割合を高め、空気利用度を低める。したがって、機関温度(燃料噴射開始時の予燃焼室壁温度および空気温度)が高く、しかも燃焼期間も長い(特に拡散燃焼期間が長い)全負荷運転時においては含酸素燃料の利点が発揮され BTE も高く、しかも、最適の θ_{inj} からずれた時の BTE の低下は軽油運転時よりも小さく、いわゆる θ_{inj} に対する柔軟性が高いことがわかる。これに対して燃焼期間が短い(特に拡散燃焼期間が短い)

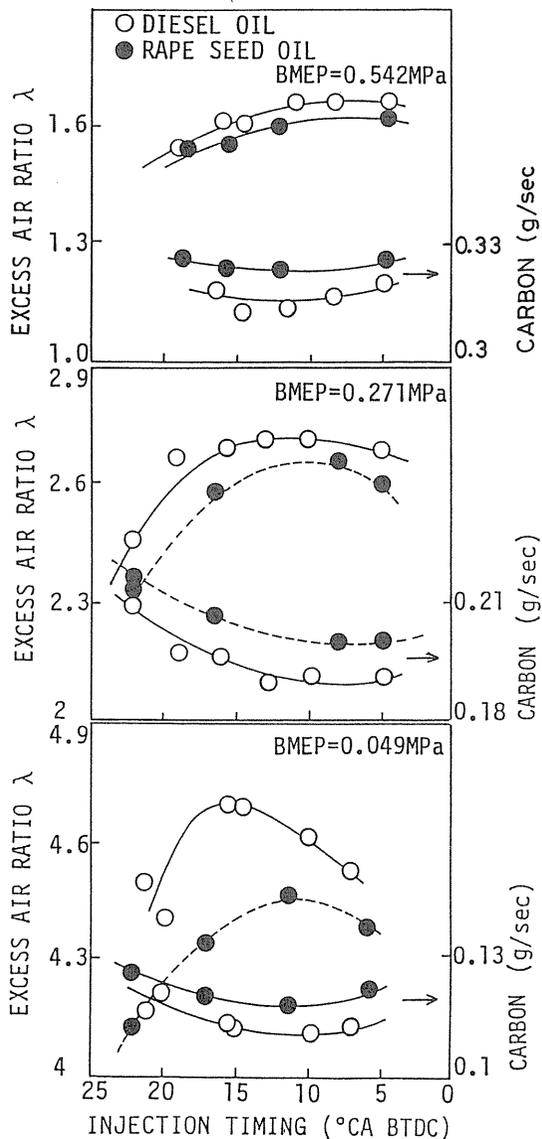


Fig. 13 Excess air ratio and injection timing

低負荷運転時においては着火遅れの影響が助長され、予混合燃焼割合も増加(これは等容度を増加させるが)、燃焼期間が後半にずれこむための冷却損失や排气損失などの影響の度合いが大きくなる。その結果、BTE が軽油運転時よりも低くなるものと思われる。なお、菜種油・含水メタノール乳化燃料運転時の THC は菜種油運転時とほとんど同じである。

この場合、燃料消費率 b_e は発熱量の高い燃料の順に低くなっている。しかも、消費燃料中に含まれる炭

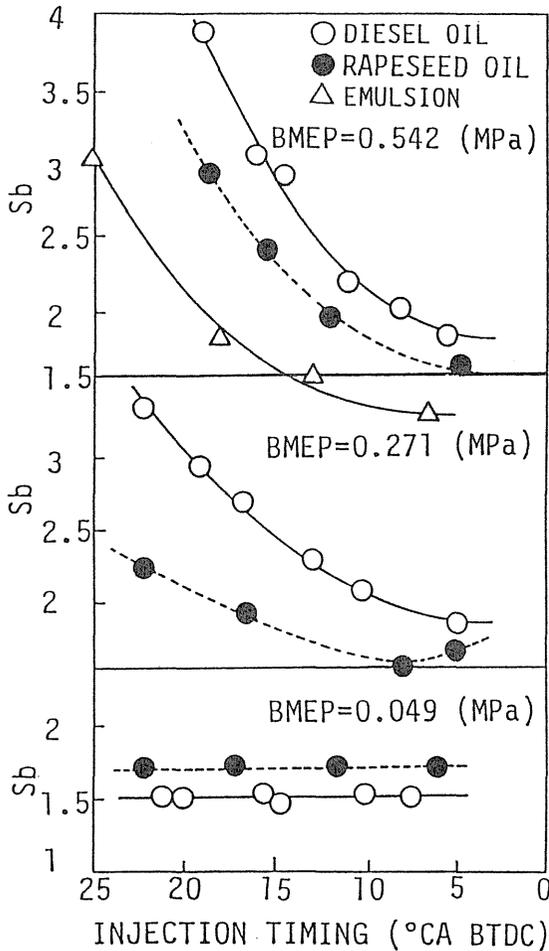


Fig.14 Smoke density and injection timing

素量は逆に軽油運転時の方が菜種油運転時よりも低い。これは排煙濃度に影響するものと思われる。

図14に排煙濃度 S_b 、図15に全炭化水素濃度 THC を示している。図において、 θ_{inj} が小さいほど（上死点に近いほど）燃料噴射開始時期の機関温度は高くなるので、着火遅れは短く（図4, 6, 8参照）、急激燃焼である予混合燃料の割合は減少し（ $\theta_{inj} > 10^{\circ}\text{CA BTDC}$ の範囲）、したがって空気利用率がよくなる。さらに、運転時の空気過剰率 λ は大きく（供給炭素量は小さく）なる。このため S_b 濃度や THC 濃度は低減する。しかし、負荷が小さくなるほどその濃度の値および θ_{inj} による濃度の低下割合も小さくなり、無負荷付近（ $\text{BMEP} = 0.049 \text{ MPa}$ ）になるとその値は非常に小さく、 θ_{inj} の影響はほとんど認められない。

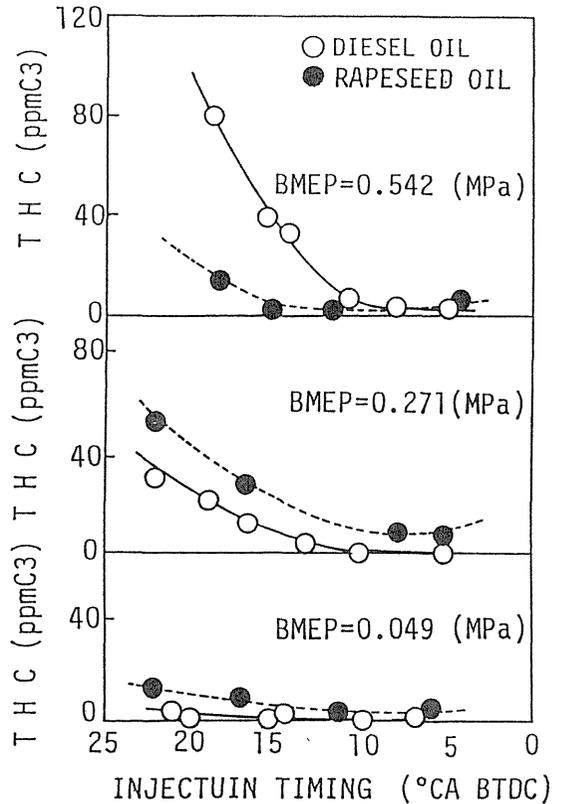


Fig.15 Total hydrocarbon emission and injection timing

次に、菜種油運転時と軽油運転時との S_b 濃度および THC 濃度を比較すると、低負荷では供給炭素量が大きい菜種油運転時の方が軽油運転時よりも排出濃度はいずれも高い値を示している。しかし、負荷が大きくなると、この関係は逆転し正味熱効率 BTE が高い菜種油運転の方が排出濃度はいずれも低くなっている。

いま、 $\text{BMEP} = 0.542 \text{ MPa}$ における排煙濃度 S_b に注目し、BTE の最大値を与える θ_{inj} で各燃料の排煙濃度 S_b を比較すると、軽油運転では $S_b = 2.51$ 、菜種油では $S_b = 2.2$ に対し乳化燃料運転では $S_b = 1.4$ と大幅な排煙濃度の低減がみられる。この低減効果は燃料中に含まれる炭素量や着火性も関与するが、気化潜熱の増加および混合気の熱容量の増加による燃焼温度の低下、マイクロエクスプロージョンによる空気利用率の増加、さらに着火性が悪くても、着火後の燃焼速度が早いための拡散燃焼期間の短縮などに起因するものと思われる。排煙濃度（排出微粒子）の規制強化が必要

な現状では各種乳化燃料の利用が今後の注目すべき研究課題といえる。

NO_x 濃度および R-CHO 濃度の測定値はばらつきが大きく、その測定精度上定量的には疑問が残ったので図面は割愛したが、傾向的には θ_{inj} が小さくなると NO_x 濃度および R-CHO 濃度は減少し、負荷が増加すると NO_x 濃度は増加し、R-CHO 濃度は減少する。高負荷においては菜種油運転時の NO_x 濃度および R-CHO 濃度は軽油運転時よりも高いなどの結果が得られた。

4. まとめ

菜種油を予燃焼室式ディーゼル機関に使用した場合の燃焼特性値 [P_{max} , $(dP/d\theta)_{max}$, $(dQ_p/d\theta)_{max}$ など], 機関性能 (BTE, b_e) および排気特性 (S_b , THC 濃度, NO_x 濃度) を実験的に調べ、軽油や菜種油と含水メタノールの乳化燃料を使用した場合とを比較検討したが要約すると次の通りである。

- (1) 菜種油および乳化燃料運転は軽油運転と比較して着火遅れが大きいので、予混合燃料割合が高く、したがって予混合燃焼最高有効熱発生率 $(dQ_p/d\theta)_{max}$, 燃焼最高圧力上昇率 $(dP/d\theta)_{max}$ および燃焼最高圧力 P_{max} は高く、燃焼騒音 SPL は大きい。この SPL は着火遅れ θ_{lag} が $\theta_{lag} > 10^\circ \text{CA}$ になると急速に増加するので、とくに低負荷運転時には θ_{lag} の低減対策が必要である。
- (2) 正味熱効率 BTE の最大値を与える燃料噴射開始時期は燃料の種類に関係なく、本機関では全負荷で $\theta_{inj} = 13^\circ \text{CA}$, 2/4 負荷では 8°CA , 無負荷では 6°CA と負荷に応じて変化する。一方排煙濃度 S_b および全炭化水素濃度 THC はいずれも $\theta_{inj} = 5 \sim 7^\circ \text{CA}$ で最小となる。したがって、正味熱効率と排気エミッションに対する最適噴射時期は必ずしも一致しない。
- (3) 高負荷時においては、軽油運転よりも菜種油運転の方が正味熱効率は高く、排煙濃度および全炭化水素濃度は低いが高負荷になるにつれてこの関係は逆転する。これらは、菜種油の燃焼特性値からよく説明できる。
- (4) 菜種油・含水メタノール乳化燃料を使用した場

合、正味熱効率は菜種油運転時とほぼ同じであるが排煙濃度の大幅な低減が可能である。

最後に実験を担当した当時学部学生の清水伯紀君 (現鈴木自動車工業KK), 森田勝利君 (現マツダKK) に深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 田村 豊：農機誌，大豆油を燃料としたディーゼル運転，1-1,(1937),3
- (2) 飯本光雄ほか2名：農機誌，ディーゼル燃料としてのヤシメチルエステル，48-1,(1988),95
- (3) Tahir,A.R. et al.:*Proc. of the Inter. Conf. on Plant and Vegetable Oils as Fuels* Sunflower Oil as a Fuel for Compression Ignition Engines, (1982),82
- (4) Jette,S.J. et al.:*Ind. Eng. chem. res.*, Polymerization of Sunflower Oil Diesel Fuel Coppercatalysis in Contaminated Lubrication Oil, 27-1,(1988),47
- (5) Schlick,M.L. et al.:*Trans. of ASME*, Soybean and Sunflower Oil Performance in a Diesel Engine, 31-5,(1988),1345
- (6) 浜崎和則ほか4名：鹿児島大学工学部研究報告，菜種油燃料の小形ディーゼル機関への適用，28,(1986),13
- (7) 飯本光雄：農機誌，菜種油を燃料とした小形ディーゼル機関の運転 (I)，38-4,(1977),483
- (8) 飯本光雄：農機誌，菜種油を燃料とした小形ディーゼル機関の運転 (II)，40-1,(1979),5
- (9) 飯本光雄：農機誌，菜種油を燃料とした小形ディーゼル機関の運転 (III)，41-2,(1980),201
- (10) Alkidas,A.C.:*Trans. of ASME*, Combustion Characteristics of a Single-Cylinder Open-Chamber Diesel Engine, 109-10(1988),419
- (11) 澤 則弘ほか3名：圧縮点火複合燃料機関に関する研究 (二噴射予燃焼室機関)，日本機械学会日立地方講演会講演論文集，(1988-9),121