

パーム油メチルエステルによる 直噴式ディーゼル機関の燃焼特性

木下 英二* 浜崎 和則* 増永 大樹**
森永 聡** 亀田 昭雄* 小山 隆行*

COMBUSTION CHARACTERISTICS OF A DI DIESEL ENGINE OPERATED WITH PALM OIL METHYL ESTER

Eiji KINOSHITA, Kazunori HAMASAKI, Hiroki MASUNAGA,
Satoshi MORINAGA, Akio KAMEDA and Takayuki OYAMA

Palm oil is one of effective vegetable oils as alternative diesel fuel because of the high productivity and low cost. In this study, to utilize palm oil methyl ester (PME) as a diesel fuel, the engine performance and exhaust emissions for PME are investigated using a DI diesel engine compared with rapeseed oil methyl ester (RME), soybean oil methyl ester (SME) and gas oil. As the results, PME has shorter ignition delay compared with RME, SME and gas oil. Brake thermal efficiency with PME is about the same as those with RME, SME and gas oil. NO_x and Smoke emissions from PME simultaneously are lower than those from gas oil. Therefore, PME can be used as an alternative fuel of petroleum diesel fuels.

Keywords : Diesel Engine, Alternative Energy, Methyl Ester, Palm Oil, Exhaust Emission

1. はじめに

植物油をディーゼル代替燃料として用いる研究は、再生可能な循環型エネルギー資源の創出を目指す一つとして、これまでに多く行われている^{1~3)}。植物油をディーゼル燃料として用いる場合、その粘度を低くし、揮発性を改善するために、一般にメタノールによりエステル転換される。植物油をメチルエステル化した燃料は、バイオディーゼルと呼ばれ、

硫黄分をほとんど含まない再生可能な含酸素燃料であり、軽油に比べて排気煙濃度が低減する。バイオディーゼルはカーボンニュートラルな燃料と考えることができ、その燃焼によって排出されるCO₂は植物の成長過程で光合成により吸収されるCO₂とバランスするので、CO₂に対する環境負荷は軽油に比べて小さいと言える。また、バイオディーゼルは生分解性が良いため、事故による燃料流出が起きた場合でも環境に対する影響が小さい。このような理由から、バイオディーゼルの軽油代替燃料として用いることは有効である。

植物油の中でもパーム油は、生産性が高く、生産費が安く、生産量が世界第2位の油脂である。最近、パーム油は東南アジア諸国を中心にディーゼル燃

2004年8月31日受理

* 機械工学科

** 博士前期課程機械工学専攻

表-1 供試燃料の性状

Test fuels		PME	RME	SME	Gas Oil
Cetane number		53	51	50	56
Net calorific value	MJ/kg	36.85	36.55	36.48	43.12
Density @ 288K	kg/m ³	879	886	890	832
Viscosity @ 293K	mm ² /s	7.1	7.7	7.5	4.7
Pour point	°C	12.5	-7.5	-7.5	-12.5
C	wt %	75.6	77.6	77.2	87.3
H	wt %	12.9	11.9	11.9	12.5
O	wt %	11.5	10.5	10.9	0
Sulfur	wt %	0.00018	0.0006	0.0004	< 0.05
Water	wt %	0.04	0.03	0.03	—
Stoichiometric air-fuel ratio		12.60	12.53	12.47	14.2

料としても注目され、その増産が図られている。パーム油はなたね油や大豆油と異なり、パルミチン酸などの飽和脂肪酸を多く含む油脂⁴⁾であり、パーム油をメチルエステル化したパーム油メチルエステル (PME) をディーゼル機関に適用した場合、その燃焼・排出ガステ性はなたね油メチルエステル (RME)⁵⁾ や大豆油メチルエステル (SME)⁶⁾ の場合と異なることが予想される。

本研究では、PME を直噴式ディーゼル機関に適用した場合の燃焼・排出ガステ性について実験を行い、RME、SME および軽油の場合と比較検討した。

2. 供試燃料

供試燃料として、PME、RME、SME および JIS 2号軽油を用いた。本実験で作製したPME、RME および SME のエステル転換率は95%以上である。供試燃料の性状を表-1 に示す。軽油と比較して、PME、RME および SME は酸素を各々11.5%、10.5%、10.9%程度含有しており、硫黄をほとんど含有していない。メチルエステル系燃料の動粘度は軽油の1.5倍程度であり、比較的low粘度である。また、メチルエステル系燃料の低発熱量は軽油の85%程度である。表-1のPMEのセタン価は蒸留性状とC、H および O の元素分析値により算出したセタン指数により見積もった値である。メチルエステル系燃料の理論空燃比は12.5程度であり、軽油の14.2より小さく完全燃焼に必要な空気量が少なく済むことを意味する。PMEの流動点は12.5°Cと高く、PMEは寒冷地での使用には問題がある。

表-2にパーム油、なたね油および大豆油の脂肪

表-2 植物油の脂肪酸組成⁴⁾

Fatty acid	C : N	Vegetable oil, wt %		
		Palm	Rapeseed	Soybean
Lauric	12:0	0.3	—	—
Myristic	14:0	1.1	—	—
Palmitic	16:0	44.1	4.3	10.5
Palmitoleic	16:1	0.2	0.1	—
Stearic	18:0	4.5	1.9	3.8
Oleic	18:1	40.1	59.7	25.0
Linoleic	18:2	9.1	21.7	52.2
Linolenic	18:3	0.6	9.4	7.6
Gadoleic	20:1	—	1.5	0.3
Behenic	22:0	—	0.4	0.4
Erucic	22:1	—	0.6	—

C: Number of carbon, N: Number of double bonds for carbon

表-3 供試燃料の脂肪酸メチルエステル組成

Fatty acid methyl ester	C : N	Methyl esters, wt %		
		PME	RME	SME
Palmitic	17:0	44.1	4.9	10.8
Oleic	19:1	43.3	58.1	26.4
Linoleic	19:2	9.2	24.2	53.3
Linolenic	19:3	1.0	11.0	9.0
Others	—	2.4	1.8	0.5

酸組成⁴⁾を示す。表-2のC:Nは炭素数:炭素原子どうしの二重結合数を表し、二重結合がないものが飽和脂肪酸、二重結合があるものが不飽和脂肪酸である。なたね油、大豆油はオレイン酸やリノール

表-4 脂肪酸メチルエステルの沸点⁷⁾と動粘度

Fatty acid methyl ester	Boiling point ⁷⁾ , K		Viscosity @298K, mm ² /s
	0.4 kPa	0.5 kPa	
Palmitic	430.2	436.7	6.6
Oleic	449.1	453.6	6.5
Stearic	452.1	456.8	—
Linoleic	—	465.2	5.7
Linolenic	455.2	—	—

酸などの不飽和脂肪酸を多く含むのに対し、パーム油はパルミチン酸等の飽和脂肪酸を多く含んでいる。パーム油、なたね油および大豆油の飽和脂肪酸の割合は、それぞれ約 50wt%、約 6.6wt%、約 14.7wt%である。表-3 に供試燃料の脂肪酸メチルエステル組成をガスクロマトグラフで分析した結果を示す。オレイン酸メチルエステルとステアリン酸メチルエステルは分離が出来ておらず、オレイン酸メチルエステルの値にはステアリン酸メチルエステルの値が含まれている。PME 等の脂肪酸メチルエステルでは、その組成の違いがディーゼル燃焼・排出ガス特性に大きく影響を与えると考えられる。

表-4 に主な脂肪酸メチルエステルの沸点⁷⁾と動粘度を示す。表-4 より、パルミチン酸メチルエステルの沸点が最も低く、リノレン酸メチルエステルの沸点が最も高い。図-1 に PME と RME の蒸留性状を示す。PME と RME は 20%流出点以降では温度がほぼ一定の高沸点成分 (320~340°C) で構成されている。また、PME の方が RME より若干低沸点であり、これは沸点の低いパルミチン酸メチルエステルが多く含まれるためである。SME の蒸留性状は測定していないが、PME、RME と同様の傾向を示すと考えられ、また、SME は沸点の高いリノール酸メチルエステルを多く含むことから、SME の蒸留温度は RME より若干高くなると予想される。

3. 実験装置とその方法

供試機関は単気筒、水冷式、横型、直噴式四サイクルディーゼル機関で、表-5 に主要諸元を示す。噴射系は軽油使用時の標準噴射系を用いた。排出ガス中の CO 濃度は NDIR、NO_x 濃度は CLD、HC 濃度は FID、排気煙濃度はボッシュ式スモークメータを使用して測定した。ニードルリフトはホール素子センサにより測定し、シリンダー内圧力はひずみゲ

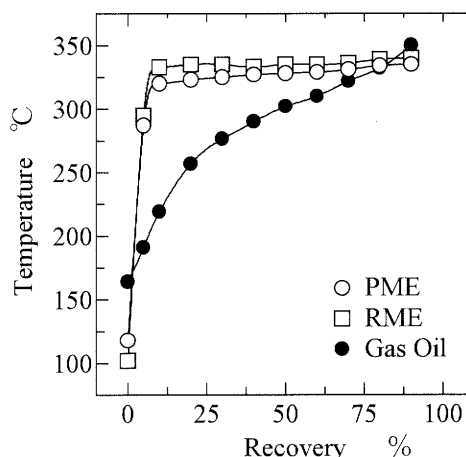


図-1 PME と RME の蒸留性状

表-5 供試機関の諸元

Engine	DI diesel engine
Engine Type	1 Cylinder, 4 Stroke, D.I., Water Cooled
Bore × Stroke	110×106 mm
Stroke Volume	1007 cm ³
Compression Ratio	16.3
Rated Power	11.77 kW / 2200 rpm
Nozzle Opening Pressure	19.6 MPa
Injection Nozzle Type	Hole (φ0.33 mm×4)
Injection Timing	18 deg. CABTDC

ージ式高圧指圧計によって測定した。ニードルリフトおよびシリンダー内圧力は 50 サイクルの平均値である。実験は、機関回転数を 2000 rpm 一定として負荷(負荷 100%で正味平均有効圧力は 0.67MPa)を変化させて行った。

4. 実験結果および考察

4.1 着火特性

図-2 に燃料噴射ノズルのニードルリフトとシリンダー内圧力の測定から得られた燃料噴射開始時期、着火遅れおよび着火時期を示している。着火遅れは全ての負荷において PME が最も短く、SME が最も長くなっていることが分かる。大井ら⁸⁾ は PME と軽油の混合燃料に対するセタン価を測定し、PME の混合割合が増加するほどセタン価が高くなることを示している(軽油のセタン価: 52、PME の混合割合 10wt%、20wt%、30wt%のセタン価: 53、55、57)。本実験および大井らの実験結果から、

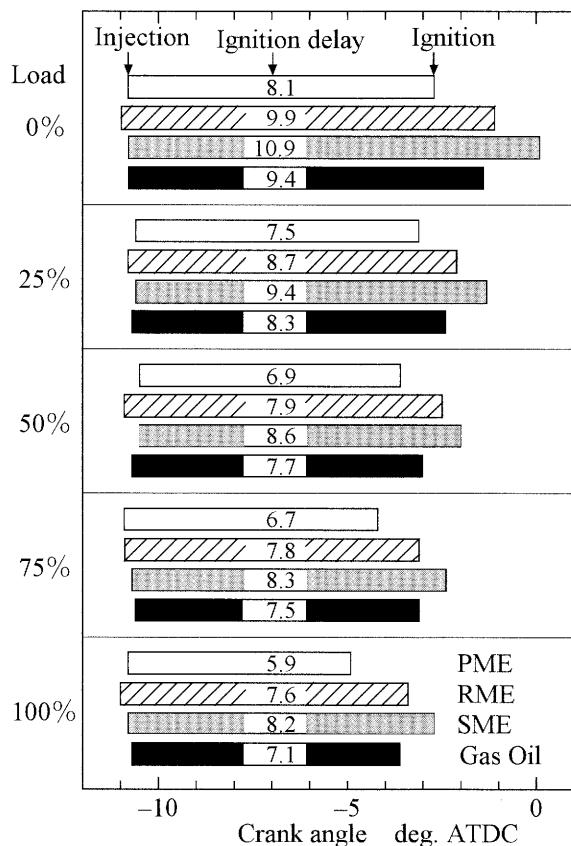


図-2 燃料噴射時期および着火遅れ

PME のセタン価は軽油より高いと考えられ、PME は軽油より高着火性のディーゼル燃料である。

PME、RME、SME は脂肪酸メチルエステルの混合物であるので、その着火性は、燃料を構成している脂肪酸メチルエステルの組成に依存していると考えられる。脂肪酸メチルエステルのディーゼル燃焼における着火性に関して、これまでの研究^{9), 10)}により、パルミチン酸メチルエステル、オレイン酸メチルエステル、リノール酸メチルエステルの順に着火性が良いことが分かっている。表-4によると、着火性の良い脂肪酸メチルエステルほど沸点が低いことが分かる。着火性は燃料液滴の微粒化にも支配されるので、燃料の蒸発の良否だけで一義的に決まるものではないが、脂肪酸メチルエステルの着火性は明らかに沸点に依存していると考えられる。したがって、表-4の沸点の値からリノレン酸メチルエステルの着火性はリノール酸メチルエステルより悪いことが予想される。

表-4に示すように、PMEはRMEに比べて着火性の良いパルミチン酸メチルエステルを多く含み、

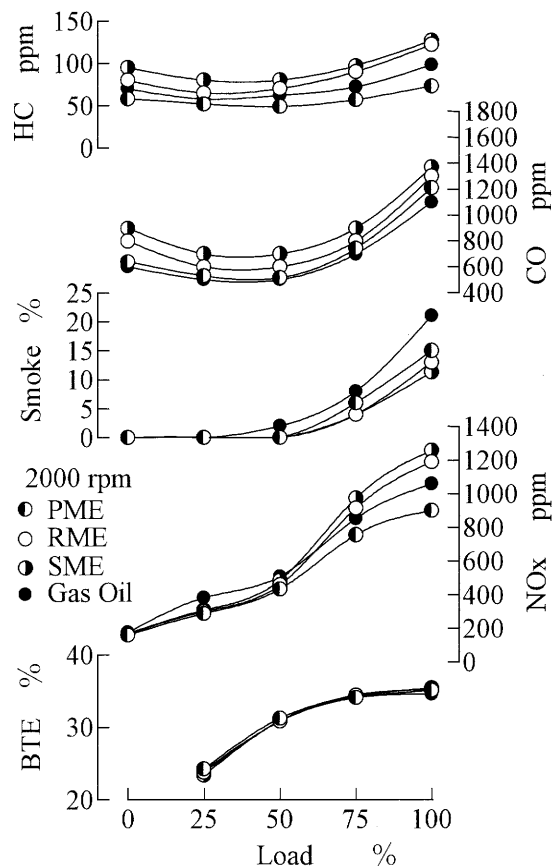


図-3 熱効率と排出ガス濃度

同時に着火性の悪いリノール酸メチルエステルおよびリノレン酸メチルエステルの割合が少ないため、PMEの着火遅れはRMEより短くなったものと思われる。一方、SMEはRMEに比べてパルミチン酸メチルエステルを若干多く含むものの、着火性の悪いリノール酸メチルエステルの含有率が高いため、SMEの着火遅れはRMEより長くなったものと思われる。

4.2 機関性能と排出ガ斯特性

図-3に各供試燃料に対する正味熱効率 BTE と排出ガス中の NOx、排気煙、CO および HC 濃度を示す。メチルエステル系燃料の正味熱効率は軽油と同じかそれ以上の値を示している。

図-3の HC 濃度は各供試燃料とも低負荷側および高負荷側で増加している。各供試燃料の HC 濃度を比較すると、PME が最も低く、SME が最も高い値を示している。RME と SME の場合、動粘度および沸点が軽油より高いためにシリンダー内に噴射

される燃料噴霧の微粒化と蒸発が軽油の場合より悪くなることに加え、図-2 に示すように RME と SME の着火遅れが軽油より若干長くなるために、RME と SME は低温の雰囲気空気に凍結される燃料の量が増え、HC 濃度が軽油より高い値を示したと考えられる。また、SME の HC 濃度が RME より高くなったのは、図-2 に示すように SME の着火遅れが RME より若干長くなることから、SME は着火遅れが長い分だけ低温の雰囲気空気に凍結される燃料の量が多くなり、HC 濃度が RME より高い値を示したと考えられる。一方、PME は、動粘度および沸点が軽油より高いので、PME の HC 濃度は軽油より高くなると予測されるが、実験結果は最も低い値を示している。図-2 に示すように PME の着火遅れが軽油より非常に短いため、PME は着火遅れが短い分だけ低温の雰囲気空気に凍結される燃料の量が少なくなり、最も低い HC 濃度を示したと考えられる。

図-3 の CO 濃度は各供試燃料とも低負荷側および高負荷側で増加している。また、メチルエステル系燃料の CO 濃度は軽油に比べ高い値を示している。これは、HC 増加の理由と同様に、メチルエステル系燃料の燃料噴霧の微粒化と蒸発が軽油の場合より悪いことが原因であると思われる。また、CO の主たる生成経路は炭化水素のフラグメントである CHO、HCHO の関与によるものであるため¹¹⁾、分子構造中に酸素の存在するメチルエステル系燃料の燃焼では CHO、HCHO を作り出す化学反応が軽油の場合より活発であるためにメチルエステル系燃料の CO 濃度は軽油よりも高くなったと考えられる。また、PME の CO 濃度は RME より低く、軽油に近い値を示している。これは、図-2 に示すように PME の着火遅れが RME より短いため、PME は RME の場合より着火遅れが短い分だけ CHO、HCHO の生成割合が少なくなったためと考えられる。また、SME の CO 濃度は RME より高い値を示している。これは、図-2 に示すように SME の着火遅れが RME より長い分だけ CHO、HCHO の生成割合が多くなったためと考えられる。

図-3 の排気煙濃度はいずれの供試燃料においても負荷 25% までは全く排出されておらず、負荷 50% 以降において急激に増加している。メチルエステル系燃料の排気煙濃度は軽油より低く、負荷 100% では軽油に比べ RME は約 38%、SME は約 46%、PME は約 29% の低減が見られる。メチルエ

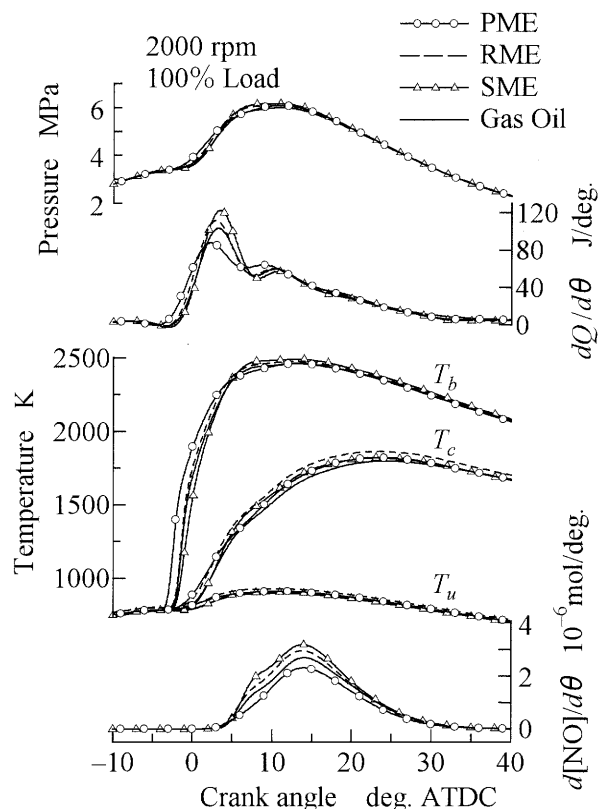


図-4 熱発生率、燃焼温度および NO 生成率

ステル系燃料は含酸素燃料であるため、噴霧の燃料過濃部分やシリンダー壁面等のインピンジメント冷却部分において局所的な酸素不足になる部分が少なくなり、すすの発生が軽油に比べて少なくなったと思われる。また、SME、RME、PME の順で排気煙濃度が高くなるのは、表-1 に示すように SME、RME、PME の理論空燃比がそれぞれ 12.47、12.57、12.61 であり、完全燃焼に必要な空気は SME、RME、PME の順で若干多く必要となるために、噴霧の燃料過濃部分やインピンジメント冷却部分において酸素不足になり易いためであると思われる。

図-3 の NOx 濃度は各供試燃料とも負荷が増えるにつれて増加している。各供試燃料を比較すると、負荷 25% までは PME、RME および SME の NOx 濃度が軽油より低い値を示しており、負荷 50% では PME の NOx 濃度が最も低く、軽油が最も高い値を示しており、それ以降の高負荷では PME は軽油より低い値を示し、RME や SME は軽油より高い値を示し、SME が最も高い値を示している。

4.3 燃焼特性と NO 生成

図-4に各供試燃料に対して、負荷 100%におけるシリンダー内圧力、熱発生率 $dQ/d\theta$ 、石田らの2領域モデル¹²⁾により計算した燃焼域温度 T_b 、筒内平均温度 T_c 、未燃域温度 T_u および NO 生成率 $d[\text{NO}]/d\theta$ を示している。NO 生成率の計算には拡大ゼルドビッチ機構の反応速度式を用いており、NO 生成率の積算値が実測の NOx 濃度と一致するように計算を行っている。

図-4から、燃焼域温度が最も高くなるクランク角 $\theta = 5 \sim 20 \text{ deg. ATDC}$ において、NO が生成していることが分かる。着火後の最大熱発生率は PME、軽油、RME、SME の順に高くなり、排出ガス中の NOx 濃度もこの順に高くなっている。PME は図-2に示すように着火遅れが最も短いので、着火後の急激な燃焼に加わる燃料の量が最も少なくなり、最大熱発生率が低く抑えられている。PME の燃焼温度は着火時期が早い分早い時期から上昇し始めているが、 $\theta = 5 \sim 12 \text{ deg.}$ において最も低くなっており、そのため PME の NO 生成率も $\theta = 5 \sim 12 \text{ deg.}$ において最も低い値を示している。一方、RME の燃焼温度は軽油とほぼ同じ履歴を経るが、 $\theta = 5 \sim 12 \text{ deg.}$ において軽油より若干温度が高く、そのため RME の NO 生成率は軽油より高くなっている。 $\theta = 5 \sim 12 \text{ deg.}$ において RME の燃焼温度と NO 生成率が軽油より高くなるのは、熱発生率に示されるように、RME の着火遅れが軽油より長いので、着火前に形成される可燃予混合気量が増加し、着火後の燃焼が軽油より激しくなったためであると思われる。また、SME の燃焼温度は着火時期が遅い分遅い時期から上昇しており、 $\theta = 5 \sim 12 \text{ deg.}$ において最も高い値を示し、そのため NO 生成率も最も高い値を示している。SME は RME より更に着火遅れが長くなり、このため着火後の燃焼が RME よりさらに急激に行なわれたためであると思われる。図-4に示される $\theta = 5 \sim 20 \text{ deg.}$ における各供試燃料の NO 生成率の違いは、着火遅れの違いに起因する着火後の急激な燃焼の違い、すなわち熱発生率のパターンの違いによるものである。したがって、各供試燃料における排出ガス中の NOx 濃度の違いは、着火遅れに起因する熱発生率パターンの違いによるものである。

5. まとめ

PME を直噴式ディーゼル機関に適用し、燃焼・排出ガス特性について実験を行った結果、以下の結

論を得た。

- (1) PME は軽油に比べて熱効率が同じか若干向上し、NOx と排気煙濃度が同時低減している。また、PME の HC も軽油に比べ低減している。
- (2) PME は RME および SME に比べて、負荷 75% および 100% において NOx が低減している。また、PME の CO および HC は、全負荷において RME および SME より低濃度である。
- (3) PME の着火性は RME、SME および軽油に比べて良好である。PME は、RME、SME および軽油の場合に比べて着火遅れが短いことにより、NOx、CO および HC の生成が抑制されている。
- (4) 燃焼温度と NO 生成率の履歴を計算した結果、各供試燃料における排出ガス中の NOx 濃度の違いは、着火遅れに起因する熱発生率パターンの違いによる。

参考文献

- 1) L. A. Perkins, C. L. Peterson and D. L. Auld, SAE Paper, No.911764, (1991).
- 2) H. Fiedler, In 21st CIMAC, D72, (1995).
- 3) 浜崎和則, 田中義弘, 黒木史宏, 日本機械学会論文集 B 編, 59 巻 548 号, (1992), pp.1551-1556.
- 4) 日本油化学会, 基準油脂分析試験法, (1996), 日本油化学会.
- 5) 浜崎和則, 大迫貴庸, 木下英二, 高崎講二, 日本機械学会論文集 B 編, 65 巻 631 号, (1999), pp.1146-1151.
- 6) D. Y. Chang and J. H. Van Gerpen, SAE Paper, No. 982527(1998).
- 7) NIST Chemistry WebBook, <http://webbook.nist.gov/chemistry/>.
- 8) 大井昭彦, 青山兵五郎, 大内日出夫, 加藤秋男, 山岡正和, 燃料協会誌, 62 巻 669 号, pp.24-31, (1983).
- 9) K. Yamane, A. Ueta and Y. Shimamoto, Int. J. Engine Research, Vol.2, No.4, (2001), pp.1-13.
- 10) 木下英二, 浜崎和則, 中禮佳樹, Choensel JAQIN, 日本機械学会論文集 B 編, 68 巻 667 号, (2002), pp.958-963.
- 11) 大竹一友, 藤原俊隆, “燃焼工学”, (1994), pp.185-186, コロナ社.
- 12) 石田正弘, 松村昇, 植木弘信, 山口征則, 貴峰, 日本機械学会論文集 B 編, 60 巻 573 号, (1994), pp.1845-1851.