1-ブタノール混合 A 重油による直噴式ディーゼル機関の 燃焼特性*

大 高 武 士** 久 木 崎 雅** 伏 見 和 代**
木 下 英 二*** 吉 本 康 文****

Combustion Characteristics of DI Diesel Engine Fueled with Marine Diesel Oil and 1-Butanol Blends

By Takeshi Otaka, Masashi Kukisaki, Kazuyo Fushimi,
Eiji Kinoshita and Yasufumi Yoshimoto

In this study, bio-butanol soluble in bunker A is examined to use as a marine diesel fuel. The effects of 1-butanol blending ratio to bunker A on the fuel properties, ignitability, combustion characteristics and exhaust emissions are investigated using a single cylinder DI diesel engine. The blending ratio of 1-butanol is varied from 10 mass% to 40 mass%. The experimental results show the ignition delay of the blended fuel becomes longer and the HC and CO emissions increase especially at low load conditions with the 1-butanol content. With 30 mass% 1-butanol blends, the thermal efficiency of 1-butanol blend is almost the same as that of bunker A and the smoke emission reduces by about 50 % at full load condition.

1. はじめに

バイオエタノールやバイオディーゼル等のバイオ燃料は、ライフサイクル CO₂ 削減に寄与できる再生可能な含酸素燃料である。アルコールの中でブタノールは、エタノール同様、セルロース系を含む種々の有機物(生ごみ等)から発酵により製造可能であるが、従来のアセトン・ブタノール・エタノール発酵 (ABE 発酵) によるバイオブタノールの製造効率はいわゆる低い⁽¹⁾。しかし、最近、高効率のバイオブタノール製造法に関する研究開発が盛んに行われるようになった^{(1),(2)}。そして、ブタノールはエタノールより酸素含有率が低い、セタン価が幾分高く、吸水性が低く、軽油との相溶性があるため、エタノールよりディーゼル機関への適用が容易と考えられ、最近、ブタノールをディーゼル燃料として利用する研究が盛んになってきた^{(3)~(6)}。

著者の 1 人はバイオブタノールをディーゼル燃料として利用するために、市販の 1-ブタノール CH₃(CH₂)₃OH と JIS2 号軽油との混合燃料 (1-ブタノール混合割合 0~50 mass%) を作製しディーゼル燃焼実験を行った。その結果、1-ブタノール混合割合が増加するほど着火遅れが長くなり、排ガス中の HC・

CO が増加するものの、Smoke が顕著に低減し、1-ブタノール軽油混合燃料はディーゼル燃料として使用可能であることを報告した⁽⁶⁾。ブタノールは A 重油との相溶性があるため、1-ブタノール A 重油混合燃料は 1-ブタノール軽油混合燃料の場合と同様に、ディーゼル代替燃料としての可能性は十分あると考えられる。また、A 重油は軽油に比べて芳香族炭化水素を多く含有し、セタン価が幾分低いいため、A 重油混合に対するブタノール混合割合の上限値や排ガステ性が軽油混合に比べて異なると予想される。

本研究では、バイオブタノールを船用ディーゼル燃料として利用するために、市販の 1-ブタノールと A 重油の混合燃料 (1-ブタノール混合割合 0~40 mass%) に対して、燃料性状を測定するとともに、直噴式ディーゼル機関に適用して実験を行い、A 重油の場合と比較検討した。そして、混合可能な 1-ブタノール混合割合を見出すとともに、1-ブタノール A 重油混合燃料の燃料性状とディーゼル燃焼特性に及ぼす 1-ブタノール混合割合の影響を検討した。さらに、JIS2 号軽油に 1-ブタノールを 30 mass% 混合した軽油混合燃料と比較し、軽油混合燃料との違いを検討した。

2. 供試燃料

供試燃料として、A 重油 (JIS1 種 2 号重油、以下の表中および図中では Bunker A と表記)、JIS2 号軽油

*原稿受付 平成 26 年 12 月 15 日。

** 鹿児島大学理工学研究科 (鹿児島市郡元 1-21-40)。

***正会員 鹿児島大学理工学研究科

****正会員 新潟工科大学 (柏崎市藤橋 1719)。

表 1 供試燃料の性状

Test fuels	Gas Oil	1-Butanol	Bunker A	BBA10	BBA20	BBA30	BBA40	BGO30
Cetane number	56	17 ⁽⁸⁾	-	-	-	-	-	-
Net calorific value MJ/kg	43.1	33.0	42.7	41.7	40.8	39.8	38.8	39.9
Density @288K, kg/m ³	830	795	855	854	848	842	836	819
Kinematic viscosity @303K, mm ² /s	3.04	2.85	3.87	3.31	3.21	3.03	2.94	2.98
Pour point °C	-17.5	(-89.5)	-15.0	-20.0	-20.0	-20.0	-22.5	<-20.0
C mass%	87.3	64.9	87.4	85.2	82.9	80.7	78.4	80.6
H mass%	12.5	13.5	12.0	12.2	12.3	12.5	12.6	12.8
O mass%	-	21.6	-	2.2	4.3	6.5	8.6	6.5
S mass ppm	<10	-	5000	4500	4000	3500	3000	<10
Monocyclic aromatic hydrocarbon, mass%	21.9	-	23.0	20.7	18.4	16.1	13.8	15.3
Bicyclic aromatic hydrocarbon, mass%	1.9	-	15.5	14.0	12.4	10.9	9.3	1.3
PAH (3 or more rings), mass%	0.2	-	2.7	2.4	2.2	1.9	1.6	0.1
50% distil. temp. °C	271	(-117.7)	277	277	272	256	230	264
(A/F)st	14.3	11.1	14.2	14.0	13.8	13.6	13.4	13.4

図 1 供試燃料の蒸留性状

(Gas Oil), A 重油に 1-ブタノールを 10, 20, 30, 40 mass%混合した 1-ブタノール混合 A 重油 (BBA10 ~40), 軽油に 1-ブタノールを 30 mass%混合した 1-ブタノール混合軽油 (BGO30) を用いた。これらの 1-ブタノール混合燃料は相分離を起こさなかった。

表 1 に供試燃料および 1-ブタノールの性状を示す。低発熱量, 密度, 動粘度, 流動点は測定値であり, BBA の C, H, O の値は 1-ブタノールと A 重油の混合割合から計算した値である。A 重油と軽油の 1 環, 2 環お

表 2 供試機関の諸元

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
Fuel Injection Pump	Jerk type
Nozzle Holes	φ0.33 mm×4

よび 3 環以上 (表 1 では PAH (3 or more rings) と表記) の芳香族炭化水素の含有率は IP391 試験法により分析した値である。全芳香族炭化水素は A 重油で 41.2 mass%, 軽油で 24.0 mass% であり, A 重油の方が軽油より 17.2 ポイント多く, 特に 2 環芳香族炭化水素の含有率が高い。また, BBA10~40 と BGO30 の芳香族炭化水素は A 重油と軽油の値から計算した値である。1-ブタノールは酸素を約 22 mass% 含有しており, そのため低発熱量が低く, A 重油の約 77% である。1-ブタノールの流動点および 50% 蒸留温度には括弧を付けているが, それぞれ凝固点および沸点を表す。BBA は 1-ブタノール混合割合が増加するほど酸素含有率が増加し, そのために低発熱量が低下している。

また、BBA は 1-ブタノール混合割合が増加するほど動粘度が低下している。

図 1 に供試燃料の蒸留性状を示す。BBA と BGO30 の初留点は 1-ブタノールの沸点である 118℃程度であり、初留点から 60%留出点までは 1-ブタノール混合割合が増加するほど、蒸留温度は低い。60%留出点以降でも同じ傾向が見られるが、BBA と BGO30 は A 重油や軽油に近い蒸留温度を示した。

3. 実験装置および方法

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 2 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。排ガス中の HC 濃度は FID, CO 濃度は NDIR, NO_x 濃度は CLD および Smoke 濃度は光透過式スモークメータ (Opacimeter), 噴射ノズルのニードルリフトはホール素子センサ, シリンダ内圧力はひずみゲ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 BMEP は 0.67MPa) を変化させて行った。実験時の雰囲気温度は 20±5℃であった。

4. 実験結果および考察

本実験に用いた BBA10~40 (1-ブタノール混合割合 10~40 mass%) は、機関を確実に始動することができ、無負荷を含む全ての負荷において 2000 rpm 一定で安定して運転することができた。

図 2 に BMEP=0MPa (負荷 0%), 図 3 に 0.17MPa (負荷 25%), 図 4 に 0.67MPa (負荷 100%) の場合の熱発生率と噴射ノズルのニードルリフトを示す。ニードルリフト線図から、A 重油と軽油の噴射時期はほぼ同じで、また、BBA の噴射時期は、BBA40 の低負荷を除いて (この条件では大幅な遅延が生じている)、1-ブタノール混合割合が増加するほど若干遅延している。燃料の体積弾性率が小さくなると噴射時期が遅延すると考えられるので、低密度の 1-ブタノールの混合は BBA の体積弾性率を小さくすると推測される。また、噴射期間は 1-ブタノール混合割合が増加するほど長くなっている。これは、1-ブタノール混合割合が増加するほど BBA の低発熱量が低くなるため、同じ出力を得るには燃料が余計に必要なため、噴射期間が長くなったと思われる。図 2 と図 3 から、負荷 0% と負荷 25% の BBA40 は他の供試燃料に比べて噴射時期が遅延しており、ニードルリフトの高さも大きく、噴射期間も長くなっていることが分かる。特に、負荷 25%

図 2 熱発生率, ニードルリフト (BMEP=0 MPa)

図 3 熱発生率, ニードルリフト (BMEP=0.17 MPa)

図 4 熱発生率, ニードルリフト (BMEP=0.67MPa)

図5 A 重油のニードルリフト

図6 BMEP に対する燃料消費量

図7 1-ブタノール混合割合に対する正味熱効率

の BBA40 の噴射時期はクランク角で -8 度 ATDC の時であり、他の供試燃料より約 2 度遅延している。BBA40 の噴射時期が負荷 25% において特異的な遅延を生じた原因を調べるために、燃料噴射量の実測を行い、ベース燃料である A 重油との比較を行った。

図 5 に各 BMEP における A 重油の噴射ノズルのニードルリフトを示し、図 6 に BMEP に対する A 重油と BBA40 の燃料消費量を示す。図 5 から、BMEP が 0 , 0.17 , 0.67 MPa の場合、噴射時期はクランク角で約 -10 度 ATDC であるが、BMEP $= 0.34$ MPa (負荷 50%) では -8 度、BMEP $= 0.50$ MPa (負荷 75%) では -9 度であり、負荷が 50% まで増加するにつれて噴

射時期が遅延し、負荷 50% 以上では早期化に転じ、負荷 100% でほぼ元に戻る。負荷が変化する際には燃料消費量に変化している (図 6) ので、図 5 は燃料噴射量により噴射時期が変化していることを示している。この噴射時期が変化する現象をニードルリフトの経時変化 (図 2～図 5) から推察してみると、BMEP $= 0.17$ MPa の BBA40 (図 3) と BMEP $= 0.34$ MPa の A 重油 (図 5) では 2 次噴射の発生が顕在化しているように見える。2 次噴射により噴射管内残留圧が低下し、このことが次の噴射管内昇圧の遅延となり、噴射時期遅延を招いていると考えられる。2 次噴射は、噴射管内の圧力反射波の同調によりニードルのサック内圧力が開弁圧以上に達することにより発生し、噴射管長、噴射管径、燃料温度等に影響されるが、A 重油において、BMEP $= 0.34$ MPa の場合が最も 2 次噴射が顕著になる理由については、本研究の検討対象ではないので解析していない。図 6 によると、低発熱量の低い BBA40 は、同じ負荷では A 重油より燃料消費量が増加しており、特に、低負荷で増加割合が大きい。図 6 より、BMEP $= 0.17$ MPa の BBA40 の燃料消費量は BMEP $= 0.34$ MPa の A 重油とほぼ同じであることが分かる。このことは、図 3 の BBA40 のニードルリフトプロファイルが図 5 の A 重油の BMEP $= 0.34$ MPa のものと類似していることと一致している。図 3 の BBA40 の噴射時期が他の供試燃料に比べてクランク角で 2 度遅れた理由は、燃料消費量が増加し、図 5 に示す噴射時期の遅延が起こったためである。軽油や A 重油のような高セタン価燃料の場合、負荷に対する熱効率や排ガス特性が一般的な傾向を示しているため、この噴射時期の変化する現象を特別に考慮する必要は無いと思われるが、BBA40 のような低着火性の燃料では考慮する必要がある。

図 2 から図 4 に示すように、A 重油の着火は軽油に比べ遅延している。これは、A 重油は軽油より芳香族炭化水素が多く含まれる (表 1) ので、着火が遅延したと考えられる。また、セタン価が低い 1-ブタノールの混合割合が増加するほど、BBA の着火は遅延し、着火遅れが長くなっていることが分かる。その他の負荷の場合も着火遅れに対する 1-ブタノール混合割合の影響は同様の傾向を示した。1-ブタノール混合割合の増加による着火遅れの増大は、セタン価の低下に加えて、低級アルコールのパラフィン系炭化水素に対する着火抑制効果⁹⁾ (低級アルコールの添加によりパラフィン系炭化水素の低温酸化反応発現以前の OH ラジカルが著しく消費される)、1-ブタノールの蒸発潜熱が大きいこと (1-ブタノール: 619.2 kJ/kg ¹⁰⁾、軽油: 187.2 kJ/kg ¹⁰⁾) による雰囲気温度低下の影響、噴射時期の遅延も寄与しており、BBA40 の低負荷の場合は

大きく影響している。一般的に、負荷が増加するほど、燃焼室内ガス温度が高くなるので着火遅れが短くなり、本実験の場合も、充てん効率が $BMEP=0MPa$ で約 85%、 $BMEP=0.67MPa$ で約 80%と、負荷が増えるほど充てん効率の低下、すなわち燃焼室内ガス温度の上昇による給気の膨張が発生しており、この燃焼室内ガス温度上昇のために負荷増加の際の着火遅れの短縮が発生しているものと考えられる。図 2 と図 3 から BBA40 の負荷 25%の着火遅れは負荷 0%より長くなっていること（負荷 0%：クランク角で約 20 度、負荷 25%：約 22 度）が分かり、この逆転は BBA40 の負荷 25%の噴射時期がクランク角で約 2 度遅延したことが原因と考えられる。しかし、それ以外の 1-ブタノール混合割合と負荷の条件では着火遅れに及ぼす噴射時期遅延の影響はあまり大きくないと思われる。

図 2 の負荷 0%の場合、1-ブタノール混合割合が増加するほど着火遅れが長くなり、それに伴って熱発生が遅延し、最大熱発生率も低下し、1-ブタノール混合割合が 30 mass%以上では燃焼終了時期も遅延している。また、図 3 の負荷 25%の場合、負荷 0%の場合とほぼ同様の傾向を示すが、最大熱発生率は 1-ブタノール混合割合が 20 mass%までは A 重油と同等であった。一方、図 4 の負

荷 100%の場合、着火遅れが長いほど最大熱発生率が高くなり、予混合燃焼割合が多くなっていることが分かる。急激に燃焼したためと考えられる。また、燃焼終了時期はクランク角で約 40 度のときであり、全ての供試燃料でほぼ同じである。負荷 0~25%でブタノール混合割合が高い場合を除いて、着火が遅延する BBA の燃焼終了時期が A 重油の場合とほぼ同じになった理由は、低沸点・低動粘度である 1-ブタノールの混合により噴霧の微粒化・蒸発が良好になり、混合気形成が促進され、その結果、燃焼期間が短縮したためと考えられる。BGO30 の着火遅れと熱発生プロファイルは低負荷で BBA10 と BBA20 の間を示し（図 2 と図 3）、負荷 100%で BBA20 とほぼ同等であった（図 4）。

図 7 に 1-ブタノール混合割合に対する正味熱効率 BTE を示す。BGO 系（軽油と BGO30）は負荷 100%のみ示している。1-ブタノール混合割合が 0%は A 重油、または軽油を表す。BBA40 を除き、BBA の BTE は 1-ブタノール混合割合が増加してもほぼ同じである。BBA40 は低負荷で BTE が低下しているが、これは図 2 の熱発生率線図に示すように発熱の等容量が低下したためと考えられる。BBA30 の BTE は BGO30 とほぼ同じであった。

図 8 に 1-ブタノール混合割合に対する排ガス中の HC 濃度を示す。BGO 系燃料は負荷 0%と 100%のみ示している。HC は 1-ブタノール混合割合の増加とともに高くなっている。また、負荷が低下するほど、1-ブタノール混合割合が増加するほど HC の増加割合が大きい。1-ブタノール混合割合が増加するほど HC が高くなる理由として、蒸発特性が良好な 1-ブタノールの混合割合が増加するほど着火遅れが長くなり、そのため BBA は空気と過剰に混合して燃料希薄部分を多く形成し、この部分が不完全燃焼を起こすためと考えられる。特に、負荷が低下するほど燃焼室内ガス温度が低くなるために、1-ブタノール混合割合の増加に伴う着火遅れの増大が大きく、HC の増加割合が高負荷に比べて大きくなったと考えられる。また、これに加えて、低負荷の BBA40 の場合、着火遅れが非常に長くなったことによる膨張行程における燃焼室ガス温度低下の影響も HC 増加に寄与していると考えられる。また、図 8 から BBA40 の HC は負荷 25%の方が負荷 0%より高く、逆転しているが、これは上述したように（図 2 と図 3）、BBA40 の負荷 25%は負荷 0%に比べて噴射時期がクランク角で約 2 度遅延し、着火遅れがより長くなったためであると考えられる。このような負荷に対する HC 排出の逆転は、既報⁶⁾の 1-ブタノール混合軽油（1-ブタノールは 0~50mass%）では起こっておらず、ベース燃料である JIS2 号軽油の着火性が A 重油より良好なために、負荷 25%において噴

図 8 1-ブタノール混合割合に対する HC 濃度

図 9 1-ブタノール混合割合に対する CO 濃度

図 10 1-ブタノール混合割合に対する NOx 濃度

図 11 1-ブタノール混合割合に対する Smoke 濃度

射時期の遅延とそれに伴う着火の遅延が起きなかったためである。BBA30 の HC は、負荷 100% では BGO30 と同程度、負荷 0% では着火遅れが長いために BGO30 より高い値を示した。

図 9 に 1-ブタノール混合割合に対する排ガス中の CO 濃度を示す。図 8 と図 9 を比較すると、CO 濃度は HC 濃度と同様の傾向を示すことが分かり、1-ブタノール混合による CO 増加の理由も同様と考えられる。

図 10 に 1-ブタノール混合割合に対する排ガス中の NOx 濃度を示す。低負荷では 1-ブタノール混合割合が増加するほど NOx が低減している。BMEP=0~0.17MPa の低負荷の場合、図 2~3 に示すように 1-ブタノール混合割合が増加した時、着火遅れの増大に伴って熱発生率が全体的に遅延しているため、燃焼温度が低下し、NOx が低下したと考えられる。一方、BMEP=0.67 MPa の場合、図 4 の最大熱発生率が増加しているにもかかわらず、NOx は増加しなかった。一般に、着火後の最大熱発生率が高くなれば燃焼温度が高くなり、NOx は増加する傾向にあるが、本実験の場合は同時に着火が遅延し、高温滞留時間が短くなっており、燃焼温度の高温化と高温滞留時間の短縮の効果が相殺して NOx がほぼ同じになったと考えられる。ま

た、BBA30 の NOx は BGO30 とほぼ同じであった。

図 11 に 1-ブタノール混合割合に対する排ガス中の Smoke 濃度を示す。高負荷において、1-ブタノールの混合割合が増加するほど Smoke は低減している。これは、表 1 に示されるように燃料中の酸素含有率の増加により、拡散燃焼期間において噴霧の燃料過濃部分での酸素不足を補い、“すす”の生成が抑制されたためと考えられる。また、図 4 の熱発生率に示されるように、1-ブタノール混合割合が増加するほど予混合燃焼割合が増加しており、着火遅れの増大に起因する予混合化も Smoke 低減の原因の一つと考えられる。BMEP=0.67 MPa の場合、BBA10, BBA20, BBA30, BBA40 の Smoke は A 重油よりそれぞれ 24%, 32%, 49%, 56% 低減した。BMEP=0.17MPa 以下の低負荷において、BBA10~30 の Smoke はほぼ 0% であるが、BBA40 の Smoke は BMEP=0MPa で 19%, BMEP=0.17MPa で 14% であった。これは BBA40 の着火が遅延し過ぎて、燃焼が悪化したためと考えられる。

以上の実験結果から、ジャーク式燃料噴射ポンプを有するディーゼル機関に何の変更も加えず BBA を適用する場合、燃料性状、着火性、熱効率、排ガス特性を総合的に考慮すると、1-ブタノール混合割合が 30 mass% まではディーゼル燃料として使用可能であると考えられる。既報⁶⁾の同じ実験装置と実験条件で行った 1-ブタノール混合軽油の場合では混合可能な 1-ブタノールの割合は 40 mass% であった。混合可能な 1-ブタノールの割合は A 重油混合燃料の方が 10 mass% 低いが、これは A 重油の着火性が軽油より低いためである。

4. 結 論

バイオブタノールを船用ディーゼル燃料として利用するために、市販の 1-ブタノールと A 重油の混合燃料 (BBA : 1-ブタノール混合割合 0~40 mass%) に対して、燃料性状を測定し、直噴式ディーゼル機関に適用し、A 重油の場合と比較した。さらに、JIS2 号軽油および 1-ブタノールを 30 mass% 混合した軽油混合燃料 (BGO30) と比較した結果、以下の結論を得た。

(1) BBA は無負荷を含む全ての負荷において安定して運転することができた。

(2) BBA の着火遅れは 1-ブタノール混合割合が増加するほど長くなり、BBA30 の着火遅れは BGO30 に比べて長くなった。BBA の正味熱効率は 1-ブタノール混合割合 30 mass% までは A 重油とほぼ同じであり、BBA30 の正味熱効率は BGO30 とほぼ同じであった。

(3) BBA は 1-ブタノール混合割合が増加するほど、低負荷で HC と CO が増加するが、高負荷で Smoke

が低減する。

(4) BBA は 1-ブタノール混合軽油に比べ着火性が低いので、混合可能な 1-ブタノールの割合は低下するが、ジャーク式燃料噴射ポンプを有するディーゼル機関に何の変更も加えず BBA を適用する場合、燃料性状、着火性、熱効率、排ガス特性を総合的に考慮すると、1-ブタノール混合割合は 30 mass% までが適当である。

以上の結果から、BBA は船用 A 重油の代替燃料として使用することが十分可能であると考えられる。なお、本研究は燃焼特性に主眼をおいたものであり、燃料の違いによる機器の耐久性に関する潜在的な問題については、今後検討が必要である。

properties, engine performance, combustion and emissions of blends containing croton oil, butanol, and diesel on a CI engine, *Fuel*, Vol.90 (2011), 505-510.

- (9) 小川英之, 松本淳, 予混合圧縮着火燃焼におけるエタノールの着火抑制効果に対する化学反応解析, 日本機械学会論文集 B 編, 76 巻 771 号, (2010), 1982-1988.
- (10) 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自着火・噴霧燃焼特性, 日本機械学会論文集 B 編, 70 巻 694 号, (2004), 1590-1597.

参考文献

- (1) Crabbe, E., Nolasco-Hipolito, C., Kobayashi, G., Sonomoto, K., Ishizaki, A., Biodiesel production from crude palm oil and evaluation of butanol extraction and fuel properties, *Process Biochemistry*, Vol.37 (2001), 65-71.
- (2) Atsumi, S., Hanai, T., Liao, L.C., Non-fermentative pathways for synthesis of branched-chain higher alcohols as biofuels, *Nature*, 451 (2008), 86-89.
- (3) Karabektas, M., Hosoz, M., Performance and emission characteristics of a diesel engine using isobutanol- diesel fuel blends, *Renewable Energy*, Vol.34 (2009), 1554-1559.
- (4) 木下英二, 浜崎和則, 今林良太, 中野裕己, 1-ブタノール混合廃食油メチルエステルのディーゼル燃焼特性, 日本機械学会論文集 B 編, 76 巻 761 号, (2010), 149-154.
- (5) 木下英二, 中野裕己, 1-ブタノール軽油混合燃料のディーゼル燃焼特性, 自動車技術会論文集, Vol.41, No.5 (2010), 1101-1106.
- (6) 道川内亮, 丹野史朗, 伊藤泰志, 川竹勝則, アルコール活用によるディーゼルの燃焼改善ー吸気系噴射方式および混合燃料方式の検討ー, 自動車技術会論文集, Vol.42, No.2 (2011), 507-513.
- (7) ハリ・セティアプラジャ, 原孝祐, 小澤琢磨, 山崎賢治, 小川英之, ブタノール-エタノール混合軽油のディーゼル燃焼特性, 自動車技術会論文集, Vol.42, No.5 (2011), 1087-1092.
- (8) Lujaji, F., Kristóf, L., Bereczky, A., Mbarawa, M., Experimental investigation of fuel