

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560240

研究課題名(和文) バイオブタノール混合軽油の着火性および潤滑性の改善に関する研究

研究課題名(英文) Study on Improvement of the Ignitability and Lubricity of Diesel Fuel with Bio-butanol

研究代表者

木下 英二 (KINOSHITA, Eiji)

鹿児島大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40274857

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：生ゴミ等の種々の有機物から発酵により製造が可能なバイオブタノールを軽油に混合するディーゼル燃料として利用するため、着火性の改善としてセタン価向上剤の添加を試み、また、潤滑性の改善として高動粘度の種々のバイオディーゼルの添加を試み、さらにこれらの複合利用を実験検討した。その結果、セタン価向上剤の添加、バイオディーゼルの添加、およびそれらの複合利用が有効であることを明らかにした。そして、低温流動性、熱効率、排ガス特性等を総合的に考慮した最適な燃料の組合せと混合比を見出した。

研究成果の概要(英文)：In order to use bio-butanol made by fermentation from the organic matter of various garbage as a blending diesel fuel, the addition of cetane number improver to 1-butanol/diesel fuel blend for the improvement of ignitability, the addition of various biodiesel fuels, that had high kinematic viscosity, to the blend for the improvement of lubricity, and the composite use of these were investigated. From the experimental results, it was concluded that the addition of cetane number improver, the addition of biodiesel fuel, and the composite use of these were valid. And the optimum mixing ratio and combination of fuel were selected by considering the cold flow property, thermal efficiency, and exhaust emissions.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱工学 再生可能エネルギー バイオマス 地球温暖化ガス排出削減 ディーゼル燃料

1. 研究開始当初の背景

バイオエタノールやバイオディーゼル(動・植物油とアルコールから製造したディーゼル機関用のバイオ燃料)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、生ゴミ等の種々の有機物からアセトン・エタノール・ブタノール発酵(ABE 発酵)により製造可能で、現在のところ生産性は低いが、抽出剤にバイオディーゼルを使用すれば発酵が促進されることが報告されており、また、ABE 発酵よりも高効率な製造方法の研究も盛んに行われている。ブタノールはエタノールに比べ、酸素含有率は低いが、低発熱量およびセタン価(すなわち着火性)が幾分高く、吸水性が低く、また、軽油との相溶性があり、ディーゼル燃料として有意であると考えられる。

これまでの研究から、ブタノール混合軽油は、ブタノール混合割合が増加するほど、着火性が悪くなり、その結果、一酸化炭素 CO および未燃炭化水素 HC の排出が増加し、特に低負荷(低出力)時で顕著になる。また、ブタノール混合割合が増加するほど、動粘度が低下するため、燃料噴射系の摺動面を摩耗させ、エンジントラブルの原因になる恐れがある。さらに、アルコール混合燃料では、排ガス規制対象ではないが、PRTR 法の特定化学物質であるアルデヒド類の排出、特に低負荷においてその排出増加が懸念される。

これらの問題を解決することは、バイオブタノール混合軽油をより有効なディーゼル燃料とするために必要である。バイオブタノール混合軽油の着火性を改善する方法の一つとして、セタン価向上剤(着火促進剤)を添加することが考えられ、これによりディーゼル運転がより安定するとともに、排ガス中の CO、アルデヒド類を含む未燃炭化水素を低減できると予想される。また、潤滑性を改善する方法の一つとして、軽油より高動粘度のバイオディーゼルの添加する方法(バイオブタノール/バイオディーゼル/軽油の3種混合燃料)が考えられ、これにより燃料噴射系が保護されるとともに、バイオディーゼルの種々のメリット(排ガス中の黒煙低減等)が追加されると考えられる。

2. 研究の目的

生ゴミ等の種々の有機物から発酵によりバイオブタノールの製造が可能であり、バイオブタノール混合軽油はディーゼル代替燃料として可能性が高い。本研究では、バイオブタノール混合軽油をより有効なディーゼル燃料とするため、着火性の改善としてセタン価向上剤の適用を試み、潤滑性の改善として軽油に比べて高動粘度の種々のバイオディーゼルの添加したバイオブタノール/バイオディーゼル/軽油の3種混合燃料について実験検討し、さらにこれらの複合利用(3種混合燃料+セタン価向上剤)を検討し、

低温流動性、引火性、アルデヒド類等の排ガス特性、熱効率等も総合的に考慮した最適な燃料の組合せと混合比を見出すことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) バイオブタノール混合軽油の着火性を改善するために、市販の1-ブタノールを用いた軽油混合燃料にセタン価向上剤 2EHN(2-Ethyl-Hexyl-Nitrate)を0.5~2質量%添加し、直噴式ディーゼル機関(表1に諸言を示す)に適用して実験を行い、1-ブタノール混合軽油の着火性・排ガス特性に及ぼす2EHN 添加割合の影響を検討するとともに、軽油と同等の着火性および排ガス中の HC・CO 濃度になるための1-ブタノール混合割合と2EHN 添加割合の組合せについて検討した。1-ブタノールの混合割合は0~60質量%とした。また、セタン価向上剤をDTBP(Di-Tertiary-Butyl-Peroxide)に変え、2EHN との違いを検討した。また、1-ブタノール混合軽油の排ガス中のアルデヒド濃度について実験した。実験においては、軽油使用時の標準燃料噴射系を用い、排ガス中の HC 濃度はFID(フレイムイオン検出器)計測器、CO 濃度はNDIR(非分散型赤外線分析法)計測器、窒素酸化物 NOx 濃度はCLD(常圧式化学発光法)計測器、黒煙濃度は光透過式スモークメータ、アルデヒド類の濃度はFIDガスクロマトグラフおよびフーリエ変換型赤外分光(FTIR)計測器を使用して測定した。燃料噴射ノズルの針弁リフトはホール素子センサにより測定し、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。針弁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、エンジン回転数を2000 rpm一定として負荷(出力が無い条件から定格出力、すなわち0~11.8kW)を変化させて行った。

表1 供試機関の諸言

エンジンタイプ	単気筒、直噴式、4ストローク、水冷
シリンダ内径 × 行程	110×106 mm
行程容積	1007 cm ³
圧縮比	16.3
定格出力	11.8 kW / 2200 rpm
燃料噴射ポンプ	ジャーク式
燃料噴射弁の開弁圧	19.6 MPa
燃料噴射ノズルの噴口径	φ0.33 mm×4

(2) バイオブタノール混合軽油の潤滑性を改善するために、軽油に比べて高動粘度の種々のバイオディーゼルの添加したバイオディーゼル/1-ブタノール/軽油の3種混合燃料を製造し、動粘度・流動性に及ぼすバイオディーゼルの種類(原料の油脂およびア

ルコールの異なるバイオディーゼル)と3種混合燃料の混合比(63条件)について検討した。混合用バイオディーゼルとして、菜種油メチルエステル(RME)、パーム油メチルエステル(PME)、パーム油エチルエステル(PEE)、パーム油ブチルエステル(PBE)およびパーム油イソブチルエステル(PiBE)を用いた。動粘度はエングラータ粘度計を使用して測定し、流動点はJIS規格(JIS K2269)による方法により測定した。さらに、RME混合、PME混合に対し、1-ブタノール40質量%混合燃料のディーゼル燃焼実験を行った。この燃焼実験には7つの混合燃料(B40G60、B40G40R20、B40G20R40、B40R60、B40G40P20、B40G20P40、B40P60、ここでBは1-ブタノール、Gは軽油、RはRME、PはPMEを表し、数値は質量割合を表す)を用いた。

(3) バイオブタノール混合軽油の着火性と潤滑性の両方を改善する複合利用(3種混合燃料+セタン価向上剤)の検討を行うため、パーム油メチルエステル(PME)による3種混合燃料にセタン価向上剤2EHNを添加する実験を行った。そして、着火性、潤滑性、低温流動性、排ガス特性、熱効率を総合的に考慮した最適に近い燃料の組合せと混合比について検討した。

4. 研究成果

(1) 図1に1-ブタノール混合軽油の着火遅れに及ぼすセタン価向上剤2EHNの添加割合の影響を示す。図1の横軸は2EHNの添加割合を示し、縦軸は着火遅れ(燃料がシリンダ内に噴射されてから着火するまでの遅れ)を示し、単位はクランク角度で、数値が小さいほど時間が短いことを表す。図1中の凡例(B10、B20、・・・B60)は実験に用いた燃料を表し、その数値は1-ブタノール混合割合を表す。図1の上の図は無負荷時(出力が無い条件)のもので、下の図は高負荷時(定格出力11.8kW)のものである。図1中には軽油の着火遅れを赤色の一点鎖線で示す。図1から、2EHNの添加割合が増加するほど、着火遅れは短くなっており、着火性が改善していることが分かる。また、2EHN添加により、低負荷において燃焼改善のために熱効率が軽油程度に改善し、排ガス中のHC・CO濃度は低減した。一方、高負荷においては、熱効率、NOx濃度は同程度であるが、黒煙が若干増加した。軽油と同等の着火性を示すのは、2EHN/1-ブタノール/軽油が1/30/69質量%と0.5/20/79質量%の場合であり(図1参照、B30では2EHN添加割合は1質量%、B20では2EHN添加割合は0.5質量%の時、軽油と同じ着火遅れ)これらの燃料のCO濃度は軽油と同程度であるが、HC濃度は軽油より若干高かった。また、2EHNの1質量%添加により、エンジン回転数が安定する運転に対する1-ブタノール混合割合の上限を40質量%(エンジンの改造や燃料噴射系の設定変更を行わ

ない場合の本実験に用いたエンジンに対する上限)から60質量%へ広げることができた。2EHN添加による着火促進、それに伴う熱効率と排ガスの改善に対して、燃焼・排ガス特性や運転状態を総合的に考慮すると、2EHN添加割合は1質量%で十分効果があった。また、DTBP添加の効果は2EHN添加とほぼ同等であった。また、1-ブタノール混合軽油の排ガス中のアルデヒド濃度について実験した結果、1-ブタノール混合割合が増加するにつれて若干増加するが、特に問題となるような高濃度では無かった。これらの結果は以下の3種混合燃料においても同様と推定される。

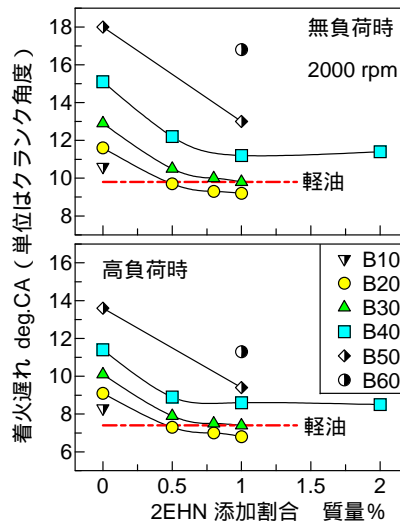


図1 着火遅れに及ぼす2EHN添加割合の影響

(2) 5種類のバイオディーゼルによる3種混合燃料(バイオディーゼル/1-ブタノール/軽油)の相溶性、相状態(液体、ゲル、固体等、相分離を含む)に及ぼす温度の影響、動粘度、流動点を検討した結果、これらの混合燃料の全ての組成比(63条件)で相溶性があり、相状態は温度に依存して5つ(A:液体、B:曇り液体、C:液-ゲルの2相、D:ゲル、E:固体)に分類された(図2参照)。図3に30におけるRME混合の場合の3種混合燃料の動粘度を、図4にPME混合の場合の動粘度を示す。図3と図4において、Bは1-ブタノールを表し、三角形の頂点は3種類の燃料単体を示し、三角形の外側の数値はそれぞれの混合割合を示す。図中の赤丸印は測定点(合計16点)を表し、小数点2桁の数値は動粘度を表す(例えば、図3では、RME/1-ブタノール/軽油=20/40/40質量%の動粘度は2.69mm²/s、RME/1-ブタノール/軽油=20/60/20質量%の動粘度は2.73mm²/s)。図3と図4より、1-ブタノール混合割合を40質量%とした場合、JIS2号軽油と同程度の動粘度(30で3.04mm²/s)を得るためには、RME混合では40質量%、PME混合、PEE混合では20質量%、PBM混合、PiBE混合では10質量%、バイオディーゼルの混合が必要がある。また、流動点は、1-ブタノール混合割合を40質量%とした場合、JIS2号

軽油の規格（ < 7.5 以下）を満たすためには、PME 混合では PME を 20 質量%、PEE 混合では PEE を 30 質量%、PBE 混合では PEE を 40 質量%、PiBE 混合では PiBE を 50 質量%以下とする必要がある。RME 混合、PME 混合に対し、1-ブタノール 40 質量%混合燃料をディーゼル機関に適用して燃焼実験を行った。図 5 に RME 混合と PME 混合の着火遅れを示す。図 5 には、7つの 1-ブタノール 40 質量%混合燃料(B40G60、B40G40R20、B40G20R40、B40R60、B40G40P20、B40G20P40、B40P60、ここで B は 1-ブタノール、G は軽油、R は RME、P は PME を表し、数値は混合比の質量%を加えて、1-ブタノール 40 質量% 混合軽油 (B40G60) の酸素含有率 8.6 質量%とほぼ同じとなる RME 80 質量% 混合軽油 (G20R80)、PME 75 質量%混合軽油 (G25P75) も示している。図 5 において、色付きの横棒の長さと同棒中の数値は着火遅れの長さを表している。図 5 から、RME や PME の混合割合が増加するほど、着火遅れは短くなること分かる。図 6 に 1-ブタノール 40 質量% 混合燃料における RME 混合の場合の排ガス中の Smoke 濃度を示す。図 6 の横軸は負荷 (出力) であり、負荷 100% は定格出力 11.8kW を表す。図 6 から、RME の混合割合が増加するほど、排ガス中の黒煙濃度は低減した。この傾向は、PME 混合の場合も同様であった。また、RME 混合の場合、HC・CO 濃度に対する RME の混合割合の影響はほとんどなかったが、PME 混合の場合、PME の混合割合が増加するにつれて HC・CO 濃度は低減した。

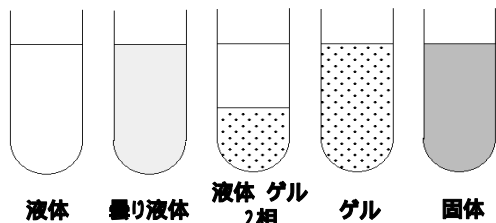


図2 3種混合燃料の相状態

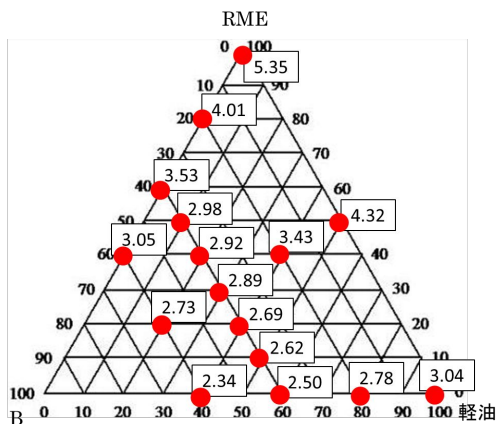


図3 RME 混合の動粘度(30)

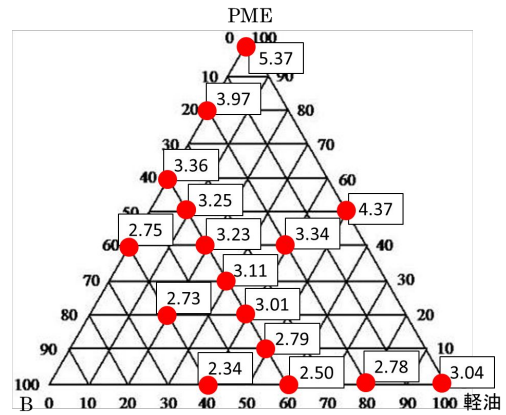


図4 PME 混合の動粘度(30)

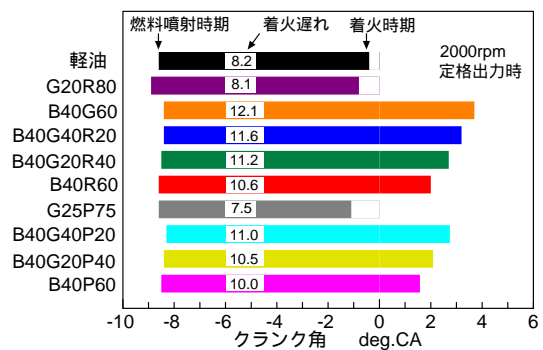


図5 RME 混合と PME 混合の着火遅れ

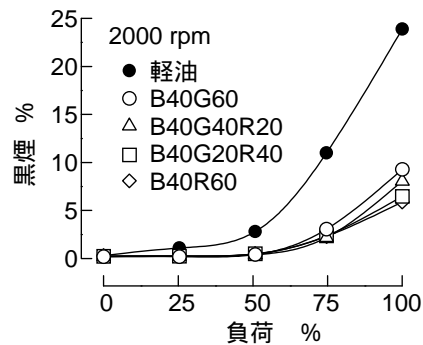


図6 RME 混合の排ガス中の黒煙濃度

(3) 1-ブタノール 40 質量%の 3 種混合燃料 B40G40P20 (B: 1-ブタノール、G: 軽油、P: PME、数値は混合比の質量%) に 2EHN を 1 質量% 添加することにより軽油に近い着火性を得ることができ、排ガス中の HC・CO 濃度を低減できた。また、1-ブタノール 20 質量% の B20G40P40 の場合、2EHN を添加しなくても、上記の 2EHN (1 質量%) 添加 B40G40P20 と同等の着火性、HC・CO 濃度を有するが、2EHN を 0.5 質量% 添加することにより軽油より優れた着火性を得ることができた。これらの結果は、パーム油エチルエステル (PEE)、パーム油ブチルエステル (PBE)、パーム油イソブチルエステル (PiBE) の 3 種混合燃料に対しても同様の傾向と予想される。

(4) これまでの結果から、混合用バイオディーゼルとして RME、PME、PEE、PBE および PiBE を対象とした場合、着火性、潤滑性、低温流動性、排ガス特性、熱効率を総合的に考慮した最適に近い燃料の組合せは PiBE による 3 種混合燃料であり、その混合比は低温流動性と黒煙低減を重視すれば B40G40P20 (ここで P:PiBE) に 2EHN を 1 質量% 添加した燃料、着火性と HC・CO 低減を重視すれば B20G40P40、または、これに 2EHN を 0.5 質量% 添加した燃料であると結論付けられる。

(5) 本研究が対象とする範疇の研究はこれまでにほとんど無かった。ブタノール混合軽油へのセタン価向上剤の添加に関する研究は少なく、軽油と同等の着火性を示す場合のセタン価向上剤とブタノールの混合比を見出すことを考慮に入れた研究はこれまでに無い。また、バイオブタノール/バイオディーゼル/軽油の 3 種混合燃料について、低温流動性を中心に燃料性状のみを検討した研究はあるが、バイオディーゼルの種類の選定とディーゼル燃焼・排ガス特性までを考慮した研究はこれまでに無い。さらに、複合利用 (3 種混合燃料 + セタン価向上剤) の研究の例も無い。本研究の成果により、バイオブタノールのディーゼル燃料としての利用 (実用化) の可能性が高まると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Kazuyo Fushimi, Eiji Kinoshita, Yasufumi Yoshimoto, Effect of Butanol Isomer on Diesel Combustion Characteristics of Butanol/Gas Oil Blend, SAE Paper, 査読有、2013-32-9097、2013、1-8

木下英二、伏見和代、笹川裕樹、尾堂裕之、2-ブタノール/軽油およびイソブタノール/軽油のディーゼル燃焼特性、自動車技術会論文集、査読有、Vo.44、No.5、2013、1181-1185

木下英二、尾堂裕之、吉本康文、1-ブタノール混合軽油のディーゼル燃焼に及ぼすなたね油メチルエステル添加の効果、自動車技術会論文集、査読有、Vo.43、No.6、2012、1275-1280

木下英二、笹川裕樹、尾堂裕之、渡邊孝司、中武靖仁、セタン価向上剤添加 1-ブタノール軽油混合燃料のディーゼル燃焼、自動車技術会論文集、査読有、Vo.43、No.3、2012、691-696

〔学会発表〕(計 9 件)

久木崎雅、伏見和代、大高武士、木下英二、吉本康文、セタン価向上剤を添加した PME / 1-ブタノール / 軽油のディーゼル燃焼、日本機械学会九州支部第 67 期総会・講演会、2014 年 3 月 13 日、九州工

業大学 (北九州市)

Kazuyo Fushimi, Eiji Kinoshita, Yasufumi Yoshimoto, Effect of Butanol Isomer on Diesel Combustion Characteristics of Butanol/Gas Oil Blend, The 19th Small Engine Technology Conference (SETC2013)、2013 年 10 月 8 日、Taipei International Convention Center (台湾、台北)

小出健太、伏見和代、木下英二、吉本康文、脂肪酸メチル添加 1-ブタノール混合軽油のディーゼル燃料・燃焼特性、日本機械学会九州支部鹿児島講演会、2013 年 9 月 28 日、鹿児島大学 (鹿児島市)

伏見和代、亀田昭雄、木下英二、吉本康文、1-ブタノール混合燃料のディーゼル燃焼に及ぼすセタン価向上剤の影響、日本機械学会九州支部第 66 期総会・講演会、2013 年 3 月 13 日、九州産業大学 (福岡市)

尾堂裕之、木下英二、吉本康文、バイオディーゼル/ブタノール/軽油のディーゼル燃焼特性 (バイオディーゼルになたね油とパーム油のメチルエステルを用いた場合)、日本機械学会 2012 年度年次大会、2012 年 9 月 12 日、金沢大学 (金沢市)

木下英二、尾堂裕之、吉本康文、1-ブタノール混合軽油のディーゼル燃焼に及ぼすなたね油メチルエステル添加の効果、自動車技術会 2012 年春季学術講演会、2012 年 5 月 25 日、パシフィコ横浜 (横浜市)

尾堂裕之、木下英二、吉本康文、バイオディーゼル/ブタノール/軽油のディーゼル燃料性状に関する研究、日本機械学会九州支部第 65 期総会・講演会、2012 年 3 月 16 日、佐賀大学 (佐賀市)

木下英二、笹川裕樹、尾堂裕之、2-ブタノール/軽油およびイソブタノール/軽油のディーゼル燃焼特性、第 22 回内燃機関シンポジウム、2011 年 11 月 29 日、東京工業大学 (東京都)

木下英二、笹川裕樹、尾堂裕之、渡邊孝司、中武靖仁、セタン価向上剤添加 1-ブタノール軽油混合燃料のディーゼル燃焼、自動車技術会 2011 年秋季学術講演会、2011 年 10 月 13 日、札幌コンベンションセンター (札幌市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木下 英二 (KINOSHITA, Eiji)
鹿児島大学・理工学研究科・教授
研究者番号：40274857