

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：33108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K07031

研究課題名(和文) 過給と排気再循環を併用する二元燃料ディーゼル燃焼に最適なバイオ燃料着火の条件

研究課題名(英文) Conditions with bio-fuels ignition optimum for diesel dual fuel combustion combining supercharging and EGR

研究代表者

吉本 康文 (YASUFUMI, YOSHIMOTO)

新潟工科大学・工学部・教授

研究者番号：90167023

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：石油代替燃料として有望視されている天然ガスをエンジンの吸気管に導入し、バイオ燃料を燃焼室内に噴射して着火する方式のディーゼル二元燃料機関に機械式過給と排気再循環を併用した。非可食部バイオマスを原料として生産することのできる次世代バイオアルコール(イソブタノールおよびイソペンタノール)と着火性が良好な脂肪酸メチルエステルとの混合燃料を着火燃料に用いた。研究の結果、正味熱効率の悪化を3%程度に抑えながらNOx(窒素酸化物)とSmoke(微粒子の成分)とのトレードオフをおよそ90%改善しうる燃焼条件を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

着火性が極端に悪い次世代バイオアルコールを良好な着火性を有する脂肪酸メチルエステルに混合し、これを着火燃料に用いることによって高効率・低汚染燃焼を実現しうるディーゼル二元燃料(DDF)機関が成立することを示した。本研究は持続可能な社会を構築する上で不可欠な石油資源の保全と環境性能の改善に資するシステムの一つのあり方を提案するものであり、現有機関の少ない改造で有望な代替燃料である天然ガスの適用を可能にする。国内外の関連する研究を調査した結果、DDF方式に次世代バイオアルコールを適用した研究報告は見当たらなかった。

研究成果の概要(英文)：To improve the trade-off relation between NOx and smoke emissions, diesel dual fuel (DDF) operation which introduces natural gas from the intake pipe and injects biofuel into the combustion chamber was conducted combining supercharging and cooled EGR (exhaust gas recirculation). Blended fuels with next generation bio-alcohols which can be produced from non-food based sources like cellulosic biomass, and fatty acid methyl esters that have good ignitability were used as the ignition fuel for the DDF. Methyl laurate (LME) and termed PLME with an equal proportion of methyl palmitate (PME) and LME were used as the base fuels for the alcohol blending. It was found that there are conditions that may improve the NOx and smoke emissions trade-off about 90% while suppressing the deterioration of the brake thermal efficiency by about 3%. This research contributes to resolve energy security and environmental problem that is necessary to build for a sustainable society.

研究分野：工学

キーワード：ディーゼル二元燃料機関 天然ガス導入 バイオアルコール混合燃料 脂肪酸メチルエステル 過給/EGR併用 トレードオフ改善

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

持続可能な社会を構築するために、資源エネルギー問題ならびに地球温暖化をはじめとする環境問題に対処することがエンジンシステムを運用する上での喫緊の課題となっている。この課題に対して研究代表者は、圧縮天然ガス (CNG) を吸気管に供給し、シリンダ内に形成された CNG と空気との予混合気中にバイオ燃料を噴射して着火、燃焼を行う方式のディーゼル二元燃料 (DDF) モードによる運転を適用し、燃焼改善の可能性を検討してきた。これまでの研究では、DDF 運転の着火燃料として軽油や脂肪酸メチルエステル: FAME (植物油の改質燃料であるバイオディーゼルの構成成分) を採用し、自然給気・高出力一定条件のもとで実験を行ってきた。その結果、いずれの着火燃料においても CNG 供給比率 (機関への全投入熱量に対する CNG 供給熱量の割合) が 77% 程度までは通常モードのディーゼル燃焼と同等の高い正味熱効率を保ちながら、排気中の Smoke を大幅に低減しうることが明らかとなった。しかしながら、CNG 供給比率が 80% を超えると失火サイクルが発生し、THC の大幅な増大と正味熱効率の急峻な低下が生じた。この原因として、CNG-空気予混合気の当量比増加ならびに着火燃料の噴射量減少にともない着火遅れが長くなり、着火が不安定となって失火が生じたことが考えられた。そこで、噴射燃料噴霧の着火性の改善と Smoke 低減に有効な過給 (機械式) を適用し、さらに NO_x 低減のためのクールド EGR を併用する研究を行った。

近年、セルロース等の非可食部バイオマス为原料としてアルコールを生産する高効率微生物発酵法の研究開発が模索されている。そこで作られるアルコールは次世代バイオアルコールと称され、エタノールよりも高級なアルコールであるブタノール (C4) やペンタノール (C5) の収率改善に着目した研究開発が展開されている。多様な転換技術の過程で生じる異性体に関しては、とくにイソブタノールとイソペンタノールの研究開発が注目されている。C4/C5 バイオアルコールはバイオエタノールに比べてセタン価が高く、ディーゼル燃料との相溶性が良好であり、吸水性が低いなど、ディーゼル代替燃料としての適性に優れている。以上のような背景のもと、再生可能なエネルギーである次世代バイオアルコールを通常モードでの運転に適用する研究が 2016 年頃を契機に数多く公表されるようになった。これに対して、分散型熱電併給システム (コージェネレーション, CHP) への適合性が高く、地産地消型エネルギーであるバイオガスをも利用しうると、持続可能社会構築に資する DDF モードへの適用例は、研究代表者が調査した範囲では見当たらなかった。したがって、DDF 機関に次世代バイオアルコール混合燃料を適用した際の機関性能、燃焼特性、排ガス特性への影響やトレードオフ改善効果を明らかにしておくことは有用であり、学術的にも意義がある。

2. 研究の目的

機械式過給とクールド EGR を併用した際の機関性能、燃焼特性、排ガス特性、ならびに NO_x と Smoke とのトレードオフに及ぼす着火燃料種別、CNG 供給、過給適用の有無、および EGR 率の影響を系統的な実験を行い調査する。バイオ燃料の特性を有する FAME (脂肪酸メチルエステル; 試薬) をベース燃料に用い、次世代バイオアルコール混合 FAME を着火燃料として適用する。この場合における高効率・低汚染 DDF 燃焼を実現するための着火燃料が具備すべき性状と最適燃焼条件を明らかにする。

3. 研究の方法

図 1 に実験装置の概略を示す。実験装置は供試機関、ガス燃料供給装置、機械式過給システム、およびクールド EGR 装置で構成されている。供試機関には水冷・単シリンダ・四ストロークのジャック式噴射装置を有する単気筒・直接噴射式ディーゼル機関 (5.1 kW/2400 rpm) を用いた。ガス燃料供給系は図 1 に示すように、CNG ボンベ、圧力調整器、マスフローコントローラ、および逆止弁で構成されている。本研究では、機関運転変数の影響を受けずにブースト圧を設定できるように、外部動力 (インバータ制御モータ) で駆動するルーツブロウ型の機械式過給機を使用した。実験条件は、これまでの知見^① をもとに、ブースト圧を 100 kPa (自然給気, N/A) および 120 kPa (過給, S/C) の二段階に、熱量ベースで定義した CNG 供給比率 (Q_g/Q_t) は 0% : 通常のディーゼル運転、および約 40% : DDF 運転、の二段階に設定した。還流する排ガスの流量は DPF 上流の EGR 弁で調整し、EGR 率を 0~28.5% の範囲内に設定した。EGR 率は吸・排気中の CO₂ 濃度の測定値から算出した。実験は、EGR 適用時に NO_x と Smoke とのトレードオフが問題となる高負荷条件一定 (BMEP=0.67 MPa) のもとで行い、過給運転では、排気圧を 110 kPa 一定に保って実施した。

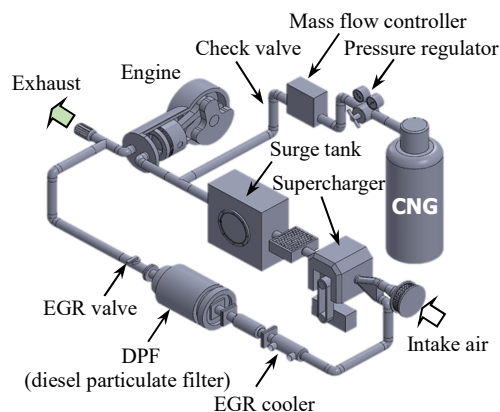


図 1 実験装置の概要

空気と予混合するガス燃料には都市ガス 13A 相当の圧縮天然ガス (CNG) を用いた。本研究では、異性体を含む 4 種の次世代バイオアルコール：n-ブタノールとイソブタノール (C4)、n-ペンタノールとイソペンタノール (C5) を選定し実験に供した。アルコールを混合するためのベース燃料には LME (ラウリン酸メチル)、および PME (パルミチン酸メチル) と LME との等質量の混合燃料 (PLME と表記) を用いた。LME はココナッツ油バイオディーゼルの主成分であり、PME はパーム油バイオディーゼルに半分程度含まれている。LME および PME は炭素数が 12 および 16 の飽和脂肪酸のメチルエステルであり、軽油よりもセタン価が高く着火性は良好である。ベース燃料とアルコールとの混合比率は供試バイオアルコールの着火性を考慮し、質量比 7 : 3 一定とした。供試機関のベースライン性能を測定するために基準燃料である JIS2 号軽油を使用した。また、次世代バイオアルコール混合 FAME 燃料の自着火特性を定量的に把握するために、セタン価を規定する標準燃料 (n-HD : n-ヘキサデカン, HMN : ヘプタメチルノナン) を用い、セタン価が 70, 55, 40 の標準燃料を調製して着火遅れを計測した。

次世代バイオアルコール混合 FAME 燃料の自着火特性を正確に把握するためには、シリンダ内圧力を高い精度で測定する必要がある。その目的のために、従前の歪ゲージ式指圧計を圧電式指圧計 (申請設備備品) に換装して実験を行った。クランク角度信号および噴射ノズルのニードルリフト信号は、それぞれロータリエンコーダおよびホール素子を用いたセンサで検出した。熱発生率および発熱の等容度 η_{glb} は、パソコンで収録した連続 160 サイクルの信号のうち、任意の 50 サイクルによるシリンダ内圧力履歴の平均値から求めた。着火遅れは、ニードルリフト信号の立ち上がりと燃焼による圧力上昇開始時期との間のクランク角度から求め、連続する 50 サイクルの値の平均値で与えた。排ガス中の NO_x の測定には CLA, HC については FIA, CO は NDIR, Smoke 濃度は光透過式スモークメータを用いてそれぞれ測定した。

4. 研究成果

(1) DDF モード運転の条件設定を行うための予備的研究

選定した 4 種の C4/C5 次世代バイオアルコール異性体の中から、DDF 運転に適用すべき候補を絞り込むための実験を行った。基準燃料 (JIS 2 号軽油) に対して質量比 7 : 3 の割合で混合したバイオアルコール混合軽油を調製し、通常のディーゼルモード運転における燃焼特性を調べた。その結果、混合燃料の着火遅れは、イソブタノール混合軽油 > n-ブタノール混合軽油 > イソペンタノール混合軽油 > n-ペンタノール混合軽油の順に長くなった。一方、Smoke はこれとはおおむね逆の排出傾向が得られたが、この結果はブタノール異性体全 4 種を用いた先行研究²⁾における着火遅れと Smoke エミッションとの相互関係と良い一致を示した。以上の結果から、DDF 運転に適用すべき最適な次世代バイオアルコールはイソブタノールであると判断した。イソブタノールは着火遅れが長くなる反面、Smoke 低減効果が高く、高効率・低汚染燃焼を満足するための DDF 機関が具備すべき着火燃料性状に関する知見をもたらすことが期待できる。また、近年における高効率微生物発酵法においては、前述のようにイソブタノールおよびイソペンタノールの収率改善が注目されている。以上のことから、本研究ではこれら二つの次世代バイオアルコールを用いて実験を行うこととした。

DDF モードでの運転において、次世代バイオアルコール混合 FAME 燃料を適用する際に問題となるのが着火遅れ増大による機関性能の悪化である。したがって、アルコール混合のベース燃料には高いセタン価が要求され、この観点からラウリン酸メチル (LME, セタン価 61.2²⁾)、およびパルミチン酸メチル (PME, セタン価 74.3²⁾) に着目した。PME は融点が高く (約 35°C)、燃料の加熱なしにハンドリングすることができないため、PME と LME との等質量の混合燃料 (PLME) を適用することとした。次節で詳述するが、次世代バイオアルコール混合 FAME 燃料の自着火特性 (セタン価) を明らかにしておくことが肝要である。そこで、ベース燃料とアルコールとの混合比率が 7 : 3 一定のバイオアルコール混合 FAME 燃料、ならびにニート LME およびニート PLME を用いて機関性能、燃焼特性、排ガス特性を詳細に調査した。図 2 は、供試バイオ燃料中の酸素含有率と Smoke 濃度との関係を示したものである。ここで、LiP30 はイソペンタノール混合 LME, LiB30 はイソブタノール混合 LME, PLiP30 はイソペンタノール混合 PLME, PLiB30 はイソブタノール混合 PLME を表す。EGR 率が同程度の場合、Smoke 濃度は燃料種別によらず、燃料中の酸素含有率の増加とともに直線的な低下を示している。すなわち、ディーゼル機関から排出される Smoke は同一 EGR 率運転のもとでは燃料中の酸素含

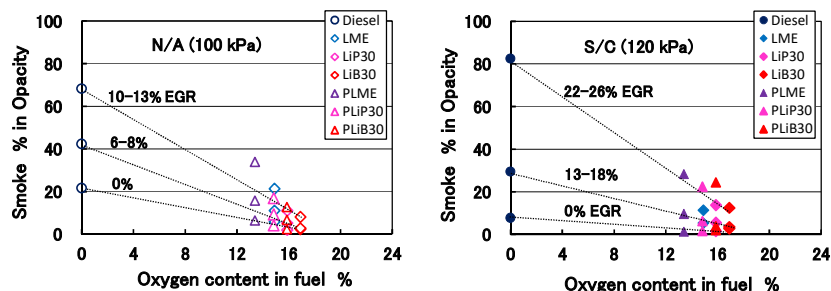


図 2 供試バイオ燃料の酸素含有率と Smoke 濃度との関係 (通常のディーゼル運転, BMEP=0.67 MPa)

有率によって一義的に支配されていることが明らかとなった。

(2) 供試バイオ燃料の推定セタン価

予備的研究で用いた 6 種類のバイオ燃料の着火特性を定量的に把握することを目的として、セタン価を調査した。図 3 は、セタン価 (CN) が 70, 55, 40 の標準燃料を調製し、自然給気条件のもとで供試機関に適用した場合の EGR 率と着火遅れとの関係を示したものである。図中の実線は各標準燃料の着火遅れを EGR 率の関数で表した近似曲線であり、その曲線の式 (近似式) も図中に示した。セタン価の違いによらず、いずれの標準燃料も着火遅れが EGR 率の関数として正確に近似できている。つぎに、EGR 率 0, 5, 10% を基準データとして定め、図 3 中に示した近似式を用いて各標準燃料の基準 EGR 率における着火遅れを計算した。その結果を図 4 に示す。ここで、図 4 中の実線は 3 段階の基準 EGR 率における標準燃料のセタン価を着火遅れの関数で表した近似曲線を示しており、図中にそれらの近似式 (3 次式) を示した。なお、セタン価 30 における着火遅れは、図 4 中の近似式を用いて外挿して求めたものである。以上より、供試燃料のセタン価は、図 4 中の近似式を用いて、対象燃料の基準 EGR 率 (0, 5, 10%) における着火遅れの値を与えることにより推定することができる。

図 5 は、以上の手順を用いて、本実験で使用したバイオ燃料のセタン価を推定した結果を示したものである。ここで、供試燃料の基準 EGR 率 (0, 5, 10%) における着火遅れは、各供試燃料の EGR 率と着火遅れとの近似関数式より算出した。図 5 中に示したセタン価は、各供試燃料において 3 段階の基準 EGR 率から推定されたセタン価の平均値を表している。Graboski ら[®]によれば、LME のセタン価は 61.2 であるとして報告がなされている。これに対して、本研究では 62 の値を得たことから、ここでのセタン価の推定手順は妥当であったと考えられる。図 5 に示すように、バイオアルコールのベース燃料である LME と PLME との間で、セタン価の推定値に大きな差異は認められない。しかしながら、イソペンタノール混合 FAME およびイソブタノール混合 FAME の推定されたセタン価を比較すると、アルコール混合燃料のセタン価はベース燃料のセタン価に強く依存することが明らかである。すなわちベース燃料のセタン価の小さな差異がアルコール混合燃料では増幅され、セタン価の顕著な差異をもたらすことが明らかとなった。

(3) バイオアルコール混合 PLME を着火燃料とする DDF 運転のトレードオフ改善効果

図 6 は、機械式過給とクールド EGR を併用した際の NO_x と正味熱効率 η_e 、ならびに NO_x と Smoke とのトレードオフを、着火燃料種別をパラメータとして運転モード別に比較したものである。図 6(a) に示すように、通常のディーゼル運転モードにおいて自然給気状態 (ブースト圧 100 kPa) で EGR を適用すると NO_x は顕著に低減するが、含酸素燃料であるニート PLME を用いた場合であっても Smoke の増大をともなうため EGR 率を高く設定することができない。この場合、いずれの燃料も過給 (120 kPa) を適用することで Smoke エミッションと正味熱効率を同時に改善しうが、酸素含有率が最も高い PLiB30 を用いた場合であっても EGR 率 20% において Smoke 濃度は 15% に達した (図 6(a) 中の赤色矢印のデータ点)。DDF モードの運転では、図 6(b) に示すように過給適用の有無ならびに着火燃料の違いによらず、実験を行った全 EGR 領域においてほぼ無煙燃焼が実現できており、正味熱効率 η_e も比較的高い値が維持できている。本実験におけるベースライン性能 (通常運転モード、軽油、無過給、EGR なし) は、正味熱効率: 34.9%, Smoke: 14.7%, NO_x: 4.8 g/kWh であった (図 6(a) 中の紺色矢印のデータ点)。これに対して、DDF モードで供試バイオアルコール混合 PLME 燃料を使用した場合では、過給あり、EGR 率 22~23% の条件において正味熱効率が約 3% 低下するものの、低 NO_x (0.5~0.6 g/kWh) かつ、ほぼ無煙状態での燃焼が実現できている (図 6(b) 中のオレンジ色矢

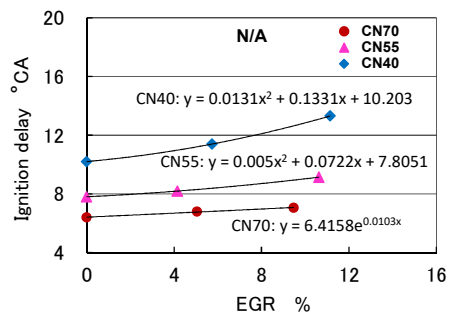


図 3 セタン価を規定する標準燃料を用いた場合の EGR 率と着火遅れとの関係 (通常運転, BMEP=0.67 MPa)

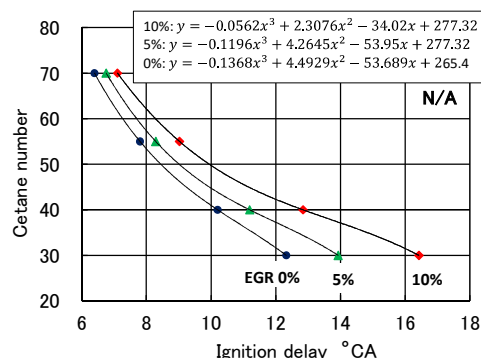


図 4 セタン価を規定する標準燃料を用いた場合の着火遅れとセタン価との関係 (通常運転 BMEP=0.67 MPa)

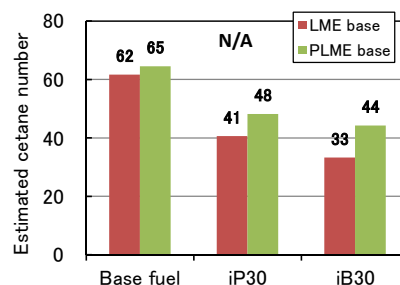


図 5 供試バイオ燃料の推定セタン価

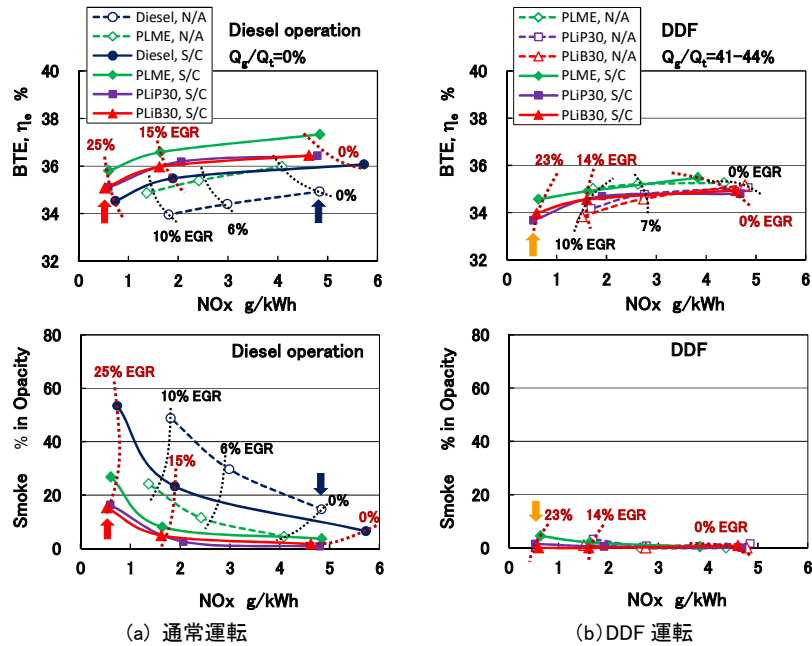


図6 通常のディーゼル運転およびDDF運転にバイオアルコール混合PLME燃料を用いた場合のNOxと正味熱効率、およびNOxとSmokeとのトレードオフの比較(BMEP=0.67 MPa)

印のデータ点). この場合、ベースライン性能に対するエミッション低減率はNOxが88~89%、Smokeは90~92%であった。

図7は、DDF運転における正味熱効率および等容度を、過給適用の有無および着火燃料種別をパラメータとして着火遅れに対して示したものである。図7の上段にベース燃料がPLMEの場合を、下段にLMEの場合をそれぞれ示している。いずれの実験においても、CNG流量は8 L/min. (0°C, 1 atm)一定であり、EGR率も同程度の範囲内に設定した。ベース燃料とバイオアルコールとの混合比率は7:3一定である。図7に示すように、ベース燃料の違いによらず、着火遅れが増加すると等容度 η_{gh} は低下する傾向を示し、その結果、正味熱効率 η_e の低下をもたらすことが明らかである。イソペンタノール混合LME (LiP30)はイソペンタノール混合PLME (PLiP30)、あるいはイソブタノール混合PLME (PLiB30)に比べ、過給を適用した際のEGR率増加にともなう着火遅れの増大が顕著である。図7の結果より、着火遅れが15°Cを超えると等容度 η_{gh} ならびに正味熱効率 η_e の低下が顕著になることがわかる。

以上のように、LMEに比べ自着火特性が良好なPLMEをベース燃料に採用することによって、アルコール混合にともなう着火遅れの大幅な増加を抑制することができる。その結果、DDF運転モードでの燃焼改善が得られ、高い正味熱効率を維持しながらNOxとSmokeとのトレードオフを顕著に改善しえたものと考えられる。

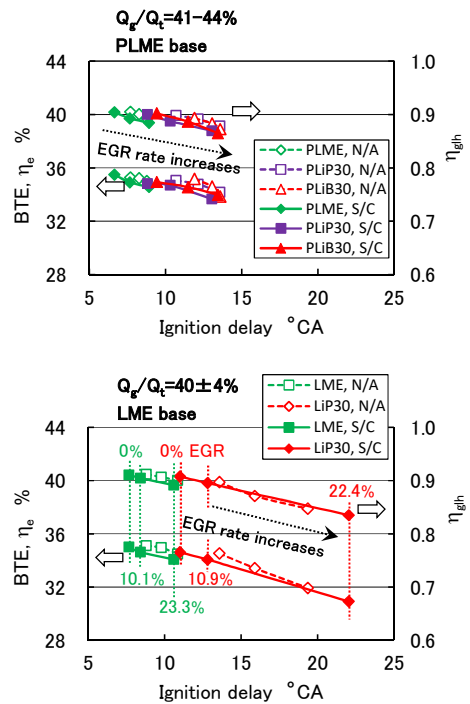


図7 DDF運転の着火燃料にアルコール混合燃料を適用した際の着火遅れと正味熱効率、着火遅れと等容度との関係に及ぼすベース燃料の着火性の影響(BMEP=0.67 MPa)

引用文献

- ① 吉本康文, 山田雅之, 木下英二, 伏見和代, 天然ガス吸入二元燃料ディーゼル機関の燃焼特性に及ぼす機械式過給の影響, 日本機械学会論文集, 82(835), 2016, pp. 1-11.
- ② Zheng, Z., Li, C., Liu, H., Zhang, Y., Zhong, X., and Yao, M., Experimental study on diesel conventional and low temperature combustion by fueling four isomers of butanol, Fuel, vol. 141, 2015, pp. 109-119.
- ③ Graboski, M.S., McCormick, R.L., Alleman, T.L., and Herring, A.M., The Effect of Biodiesel Composition on Engine Emissions from a DDC Series 60 Diesel Engine, NREL/SR-510-31461, 2003, p. 45.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 吉本康文, 木下英二, 大高武士	4. 巻 84
2. 論文標題 天然ガス吸入ディーゼル二元燃料機関の燃焼特性に及ぼすEGRと機械式過給併用の効果	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.18-00219	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 孫小雨, 吉本康文, 木下英二, 大高武士	4. 巻 48
2. 論文標題 バイオディーゼル燃焼に及ぼす機械式過給とEGR併用の効果 1-ブタノール混合CMEの燃焼特性改善	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 629-634
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 吉本康文, 木下英二, 大高武士
2. 発表標題 Influence of the Kind of Fuel Kind in the Ignition of Diesel Dual Fuel Operation with Introduced Natural Gas Combining EGR and Supercharging
3. 学会等名 JSAE/SAE 2019 Small Engine Technology Conference (Hiroshima, Japan), Paper No. 2019-32-0581 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ツェレンオチル エンフジャルガル, 吉本康文, 木下英二, 大高武士
2. 発表標題 バイオアルコール混合FAMEのディーゼル燃焼に及ぼす過給とEGR併用の効果
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第56期総会・講演会講演論文集, No.0197-1, E023 (USBメモリ)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ツェレンオチル エンフジャルガル, 吉本康文, 木下英二, 大高武士
2. 発表標題 次世代バイオアルコールと軽油との混合燃料を使用するディーゼル機関の過給とEGR併用による燃焼改善
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会講演論文集, No.18-1, J0710401 (DVD-ROM)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉本康文, ツェレンオチル エンフジャルガル, 木下英二, 大高武士
2. 発表標題 Combustion Improvements by C4/C5 Bio-alcohol Isomer Blended Fuels Combined with Supercharging and EGR in a Diesel Engine
3. 学会等名 2018 International Conference on Internal Combustion Engines Engineering (ICICEE 2018), Istanbul, Turkey (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉本康文, 木下英二, 大高武士
2. 発表標題 Influence of Boost Pressure on the Combustion Characteristics of a Dual Fuel Diesel Engine Ignited by Biofuels with Natural Gas
3. 学会等名 The Ninth International Conference on Modeling and Diagnostics for Advances Engine Systems; COMODIA 2017, C104 (USB Memory) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 孫小雨, ツェレンオチル エンフジャルガル, 吉本康文, 木下英二, 大高武士
2. 発表標題 C4/C5 バイオアルコール混合燃料のディーゼル燃焼に及ぼす過給とEGRの効果
3. 学会等名 日本機械学会2017年度年次大会講演論文集, No.17-1, (DVD-ROM)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 ツェレンオチル エンフジャルガル, 吉本康文, 木下英二, 大高武士
2. 発表標題 ブタノール異性体混合軽油を燃料とするディーゼル機関の過給と E G R による燃焼改善
3. 学会等名 自動車技術会関東支部学術研究講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考