

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：57103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26340066

研究課題名(和文) 反応促進物質添加によるディーゼルエンジンの排気ガス浄化技術の確立

研究課題名(英文) Purification of diesel engines' emissions by dimethyl ether and ozone addition

研究代表者

山本 洋司 (Yohji, Yamamoto)

北九州工業高等専門学校・生産デザイン工学科・准教授

研究者番号：50707453

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：ディーゼルエンジンの燃料や吸気に反応促進物質であるジメチルエーテルやオゾン添加することにより燃焼を促進させ、排気ガス中の窒素酸化物とすすを同時に低減することを試みる。軽油にジメチルエーテルを混合する方法では、窒素酸化物とすすが同時に低減できた。吸気にジメチルエーテルを添加する方法では、窒素酸化物の排出量を増やさずすすの排出量を低減できた。オゾン添加による燃焼促進の方法では、エンジン内の燃焼が促進されることを確認した。

研究成果の概要(英文)：We proposed to reduce simultaneously nitrogen oxide (NOx) and soot emission from diesel engines' exhaust gas by using a fuel of light oil blended with liquid dimethyl ether (DME) or by adding DME or ozone (O3) to intake air. In the method of using light oil blended with DME, 15wt% of DME blending was most effective for simultaneous reduction of NOx and soot formation. In the method of adding DME to the intake air, up to 1.5 NL/min DME addition, soot was reduced with no NOx increase. In the method of adding O3 to the intake air, promotion of combustion of engine was confirmed by experiment and numerical simulation.

研究分野：燃焼工学

キーワード：排気ガス浄化 反応促進 ジメチルエーテル オゾン

1. 研究開始当初の背景

ディーゼル機関は耐久性と信頼性に優れ、ガソリン機関と比べ熱効率がよく燃費がよく、二酸化炭素 (CO₂) の排出量が少ない等の利点があり、再度自動車用エンジンとして注目されている。しかし、窒素酸化物 (NO_x) やすす等の粒子状物質 (PM) の排出量が多いという欠点がある。NO_x の低減には燃焼温度の低下が有効であるが、不完全燃焼となりやすく、すすの排出量が増加してしまう。すすの低減には燃焼温度の高温化が有効であるため、排出汚染物質の低減対策はトレードオフの関係となっており、NO_x と PM の同時低減は困難である。

2. 研究の目的

本研究の目標は、ディーゼルエンジンを大幅に改造せずに出力性能や燃費性能を維持または向上させつつ、排気ガスの浄化を達成することである。

そこで、ディーゼルエンジンの燃料である軽油または吸気に反応促進物質を添加し、エンジン内の燃焼を促進する手法を用いる。反応促進物質にはジメチルエーテル (DME) およびオゾン (O₃) を用い、エンジンの性能試験や数値解析により燃焼促進と排気ガス内汚染物質生成の要因の解明を実施する。添加する方法には、(a) 燃料に混合、(b) 吸気に添加の二つがあり、(a) の場合は DME、(b) の場合は DME または O₃ を反応促進物質として添加する。また、既設のエンジンにも適用できるようにするため、最小限の改造で反応促進物質を添加できる供給装置を実現する。

3. 研究の方法

本研究では、反応促進物質を添加する方法として、燃料に混合 (図 1 (a))、吸気に混合 (図 1 (b))、の二つを行った。

DME は着火性がよく、燃焼させてもすすの発生がほとんどなく、入手性に優れているため代替燃料として注目されている。また、その性質が液化石油ガス (LPG) に類似しているため、既設の設備をそのまま利用できる利点がある。これらの利点を考慮すると、DME は反応促進物質としての性質を有している。そこで、燃料または吸気に添加し、エンジン性能試験および排気ガス分析により評価を行う。また、効果の要因を把握するため、燃料噴射形態の観察や、エンジンシリンダ内を模した円筒形の密閉燃焼容器を用いた基礎燃焼実験を行った。

O₃ は燃焼開始時に重要な役割を果たすことが知られており、寿命は短い、酸素原子 (O) と酸素分子 (O₂) に分解するため、これらが燃料の反応を促進してくれる。よって、O₃ は反応促進物質としての性質を有している。そこで、吸気に添加し評価を行う。

本実験で用いた、ディーゼルエンジンの仕様を表 1 に示す。

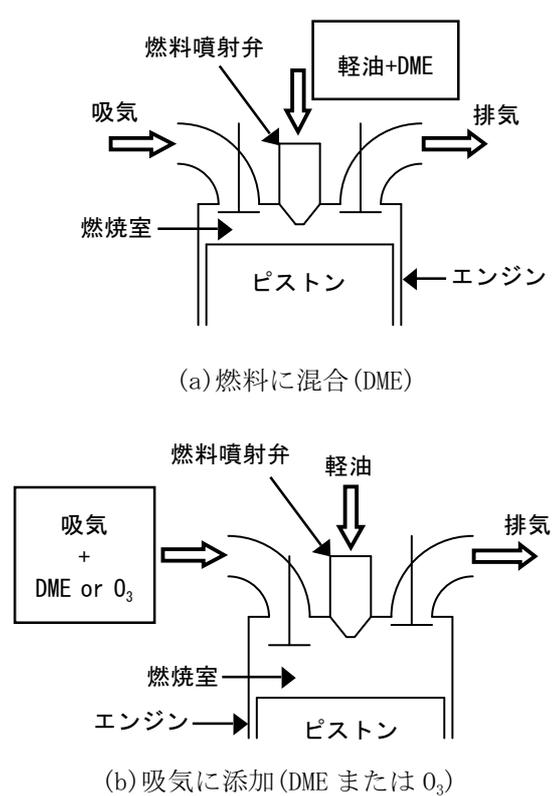


図 1 反応物質添加方法

表 1 ディーゼルエンジン仕様

エンジン名称	TF70V-E
エンジン形式	水冷 4 サイクル ディーゼル
燃焼方式	球状過流室式
ボア×ストローク	78×80 mm
排気量	382 cc
定格出力	4.8 kW/2600 rpm

4. 研究成果

(1) 燃料に DME を混合

ディーゼルエンジンの燃料である軽油に液化 DME を混合させ、実験を行った。蒸気圧が 0.6 MPa の DME は圧力が低下すると気化するので、燃料の圧力を保つため、専用の密閉容器を燃料タンクとして用いた。この燃料タンクを元々のエンジンの仕様である機械式燃料ポンプに接続し運転したが、燃料が逆流し、すぐに停止した。燃料ポンプ手前の配管で圧力が低下し、燃料内の DME が気化して逆流してしまい、燃料が噴射ノズルに供給されないことが原因であった。そこで燃料噴射システムをコモンレール式に変更し、燃料を高圧に維持できるようにした。この方式では継続的な運転は可能となったが、回転数が不安定となり、回転数を維持させるためには常に噴射量のコントロールを行わなければならない。また、排気ガス成分も安定しなかった。配管系は高圧に保たれているが、運転時間が長くなると噴射ノズルの電磁弁や圧力制御部により燃料の温度が上昇し、DME が一部気化したことが原因であった。したがって元の状態

である機械式燃料ポンプに戻し、燃料タンクを 0.8MPa で加圧したまま接続し運転を行ったところ、安定した運転が可能となった。この燃料加圧方式によりエンジン性能試験と排気ガス成分測定を行った。

エンジン回転数 2600 rpm、全負荷にて、軽油のみと DME の混合量を 20wt%まで変化させて性能を比較した。NOx の排出量に関しては、DME 混合量が増えるほど少なくなり、すすに関しては 15wt%が最も少なくなった (図 2)。添加量 20wt%では燃料タンクを 1 MPa 程度まで加圧しないと運転が安定しなかった。以上より、NOx とすすの同時低減には DME 混合量 15wt%が最も効果がある。

DME を混合すると、DME の発熱量は 28.8 MJ/kg で軽油の発熱量 44.0 MJ/kg より低いため、燃料消費量は軽油のみの場合に比べ燃料消費率は上昇し、熱効率は低下するが、DME15wt%混合燃料での低下割合は 3%と僅かである。筒内圧および熱発生率を見ると、予想に反し DME の混合量を増やすと最高筒内圧が低下し、着火遅れ時間が長くなっている (図 3、4)。直噴ディーゼルエンジンで同様の実験を行った場合は、DME 混合量を増やすと筒内圧が上昇し、着火遅れ時間が短くなる結果が得られており (学会発表①)、エンジンの燃焼方式の違いが原因だと考えられる。

軽油に DME を混合した燃料と軽油のみの噴霧特性の違いを把握するため、単孔の機械式ノズルにより燃料を噴霧させ、高速度カメラにより撮影を行った。DME 混合燃料の添加量は 20wt%である。図 5 を見ても分かるように DME 混合燃料は噴霧の広がりが大きくなっている。これは軽油に混合している液化 DME がノズルから噴射されると燃料粒子内で減圧沸騰し気化することにより、燃料液滴が微細化されると考えられる。

円筒形密閉燃焼容器に単孔機械式ノズルを取り付け、高温・高圧 (600 K, 2 MPa) の空気雰囲気中に燃料を噴射し、燃焼の観察および圧力履歴の測定を行った。軽油のみ、DME 添加量 10wt%、20wt%の 3 種類の燃料を比較した。最終圧力は DME の混合量が多いほど高く、燃焼が早期に終了することが分かった。この結果は直噴ディーゼルエンジンの結果と一致している。

軽油に DME を混合させる方法は、加圧燃料タンクを取り付けるのみ改造で実施でき、DME 混合量 15wt%で熱効率を維持しつつ、NOx とすすの同時低減が達成できた。過流室式、直噴式のどちらのエンジン形式でも効果があるが、それぞれの低減効果の要因は異なっている。

(2) 吸気に DME を添加

エンジンの吸気バルブ手前より気化した DME を吸気である空気と混合し、供給した。エンジン回転数 2600 rpm、全負荷にて、DME 添加量を 2.5 NL/min まで変化させて実験を行った。

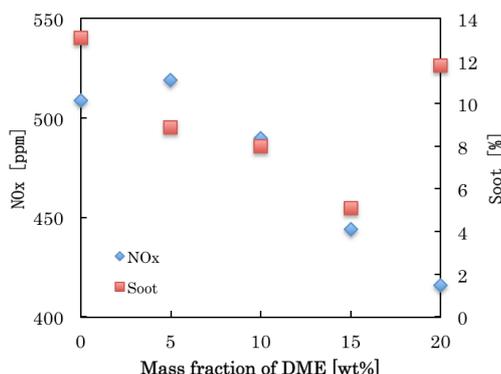


図 2 DME 混合量による排気ガス成分

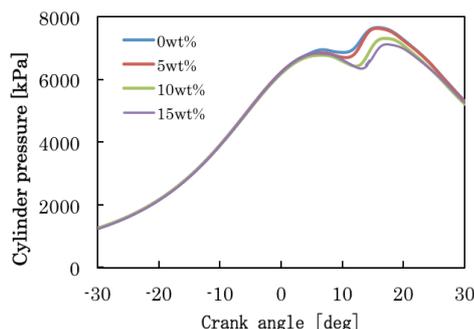


図 3 筒内圧-クランク角度線図 (軽油に DME 混合)

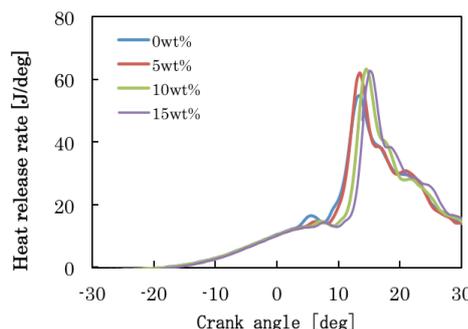


図 4 熱発生率-クランク角度線図 (軽油に DME 混合)



(a) 軽油



(b) 軽油 DME 混合燃料 (DME 20wt%)

図 5 噴霧特性比較

NOx の排出量は DME の添加量に関わらず一定で、すすは 1.5 NL/min のとき最も少なく、それ以上添加すると吸気の場合より排出量が増えた (図 6)。筒内圧と熱発生率を見ると、DME の添加量が多いほど最高筒内圧が高くなり、着火遅れも短くなっている。2.0 NL/min 以上の添加では、上死点前で熱発生率が一度上昇しており、これがすすの発生量増加の原因と思われる。熱効率は軽油に DME を添加した場合と同様、低下率は 3%ほどであった。

吸気に DME を添加する方法では、吸気バルブ手前の吸気口に DME 供給経路および流量調整機構を取り付けるのみの改造で実施でき、熱効率を維持しつつ、NOx の排出量を増やせずに、すすの低減を行うことができた。

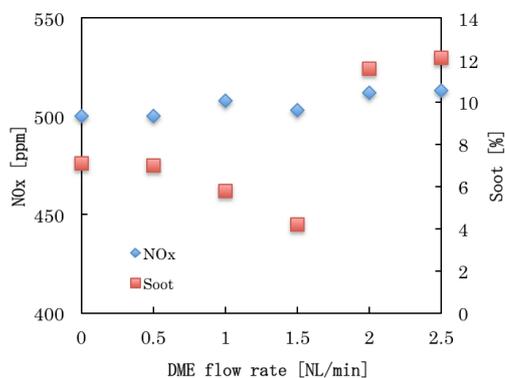


図 6 DME 添加量による排気ガス成分

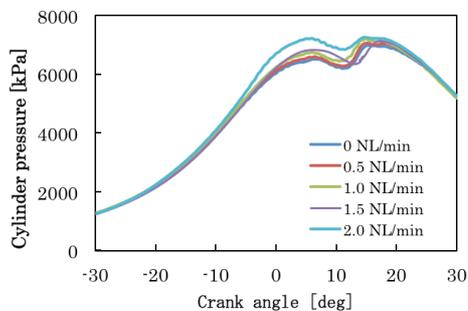


図 7 筒内圧-クランク角度線図 (吸気に DME 添加)

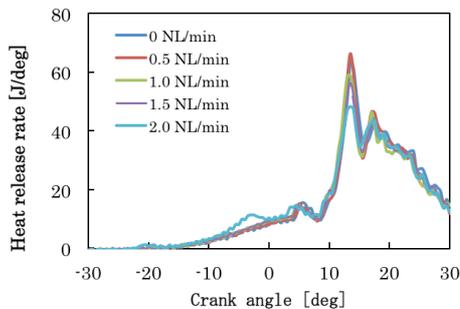


図 8 熱発生率-クランク角度線図 (吸気に DME 添加)

(3) 吸気に O₃ を添加

乾燥空気をオゾナイザーに供給し、O₃ を含んだ空気をエンジンの吸気バルブ手前より吸気と混合し、供給した。エンジン回転数 600 rpm、軽負荷 (負荷率 6.25%) にて実験を行った。このときの O₃ 濃度は、全吸入空気量の 270 ppm である。O₃ を添加した場合、O₃ 添加なしに比べ最高内圧が 0.37 MPa 高くなった。また、熱発生率の急上昇する時期がわずかながら早まっており、着火が促進されていることが分かった。軽負荷の実験であることと、O₃ の添加量がわずかであるので、排気ガスの成分に変化は見られなかった。

n-ヘプタンの反応メカニズムを用いた定容燃焼での 0 次元反応計算により、O₃ 添加濃度に対する燃焼促進効果について検討した。初期温度 900K、初期圧力 3 MPa として着火遅れ時間の計算を行った。O₃ 濃度が高いほど最終圧力が上昇し、着火遅れ時間も短くなるので、エンジンにおいても O₃ 添加濃度を高くすることができれば、さらに燃焼が促進され、排気ガスの浄化が期待できる。

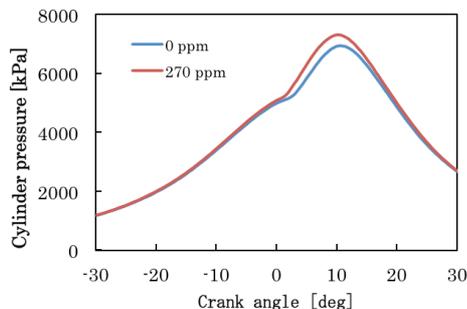


図 9 筒内圧-クランク角度線図 (吸気に O₃ 添加)

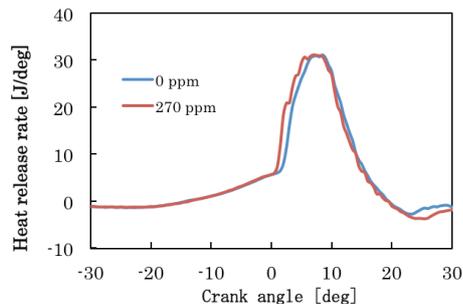


図 10 筒内圧-クランク角度線図 (吸気に O₃ 添加)

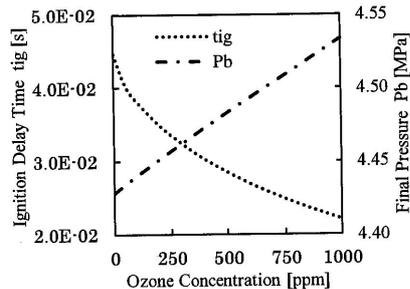


図 11 O₃ 添加量による n-ヘプタン-空気混合気の着火遅れ時間と最終圧力

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Yohji Yamamoto, Takeshi Tachibana, Feasibility study of water plasma jets for combustion promotion, Fuel, 査読有、Vol. 186、2016、pp. 846-852、DOI:10.1016/j.fuel.2016.09.020

[学会発表] (計2件)

- ① Sota Shioya, Yoji Yamamoto, Shigeki Hirashima, Takeshi Tachibana, Reducing diesel engines' emission using DME in two different approaches, The 5th International Energetic Materials and their Applications, 2014年11月12日、Fukuoka
- ② 五嶋雄大, 山本洋司, 橘武史, オゾン添加によるディーゼルエンジン着火の改善、平成28年度火薬学会秋季研究発表会、2016年11月10日、長崎県長崎市

[その他]

- ① 五嶋雄大, 山本洋司, 北九州学術研究都市第15回産学連携フェアポスター発表、2015年10月23日、福岡県北九州市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 洋司 (YAMAMOTO, Yohji)
北九州工業高等専門学校・生産デザイン工学科・准教授
研究者番号：50707453

(2) 研究分担者

橘 武史 (TACHIBANA, Takeshi)
九州工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授
研究者番号：50179719