

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月14日現在

機関番号：33108

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560839

研究課題名（和文） バイオディーゼルを着火燃料とする二元燃料ディーゼル機関の特性

研究課題名（英文） Combustion characteristics of a dual fuel diesel engine with biodiesel as ignition fuels

研究代表者

吉本 康文（YOSHIMOTO YASUFUMI）

新潟工科大学・工学部・教授

研究者番号：90167023

研究成果の概要（和文）：

天然ガス（CNG）を主燃料として吸気管に供給し、着火燃料を燃焼室内に噴射する二元燃料ディーゼル機関の性能、燃焼特性、排ガス特性に及ぼす運転変数の影響について実験的に検討した。研究の結果、(1)着火燃料が保有すべきセタン価の下限は45程度であること、(2)反応性が高いDMEをCNGに予混合した場合にはCNG供給比率によって燃焼形態が大きく異なること、(3)二元燃料ディーゼル燃焼に窒素あるいは二酸化炭素希釈を適用することでNO<sub>x</sub>とSmokeとのトレードオフがいずれも顕著に改善すること、などを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

This study investigated the influence of operating variables on engine performance, combustion characteristics, and emissions with a dual fuel diesel engine powered by natural gas (CNG) supplied from the intake-pipe as the main fuel and an ignition fuel sprayed into the combustion chamber. The results showed that: (1) at high loads the dual operation requires ignition fuels with cetane numbers higher than 45; (2) when DME (di-methyl ether) a compound with a high reaction rate is premixed with the CNG, the pattern of the combustion is very different for different CNG supply ratios; and (3) remarkable improvements in the trade-off relation between the NO<sub>x</sub> and smoke emissions are possible when N<sub>2</sub> or CO<sub>2</sub> gas dilution of the intake air was employed with dual fuel diesel combustion.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：二元燃料ディーゼル機関，天然ガス吸入，バイオディーゼル，セタン価，DME混合，吸気希釈，機関性能，排ガス特性

## 1. 研究開始当初の背景

植物油とメタノールとのエステル交換反応によって得られる燃料はバイオディーゼル (BDF) と称され、欧米諸国を中心に自動車用燃料としての実用化が進展している。BDF はカーボンニュートラルの特性を有する燃料であり、石油燃料に代替することで地球温暖化対策に有効な再生可能エネルギーとしての位置づけがなされることから、世界規模での使用拡大が進展している。

しかしながら、わが国の BDF 生産量はわずかに 3500 トン程度 (2006 年度) にとどまっており、きわめて少ない。この原因は、未使用油を BDF の原料とする欧米諸国と同様に、廃食油を原料とする BDF を自動車用燃料として適用しようと企図してきたところに一因があると思われる。自動車用エンジンではコージェネレーションなどの定置式エンジンに比べ高い燃料品質特性が要求される。これを満足するためには廃食油 BDF の精製純度を常に高く保っておく必要があり、コスト面等を考慮すると適切な利用法であるとはいえない。さらに、さまざまな原料油脂の混入が避けられず、この場合には油脂を構成する脂肪酸の種類と組成が多様であることに起因して、BDF に改質後の脂肪酸メチルエステル (FAME) 組成がエンジン性能特性に対して及ぼす影響にも配慮しておく必要がある。

近年、既存のディーゼル機関を対象として、天然ガス (CNG) やバイオガスなどを吸気管から吸入し、軽油を燃焼室内へ少量噴射して着火、燃焼を行う方式の二元燃料ディーゼル機関が注目されている。この方式では、ディーゼル噴霧が着火源となるために、セタン価が極端に低い CNG と空気との予混合気を安定的に燃焼させることができ、比較的簡単な改造をするだけで適用できるという利点がある。CNG は在来の石油燃料に比べ、資源および環境面での優位性があり、基幹的エネルギー資源としての役割が今後ますます拡大していくものと考えられる。二元燃料ディーゼル機関では、出力一定条件のもとでガス燃料の供給割合を増していくと着火燃料の噴射量が減少するために着火が不安定となり、失火サイクルが発生して燃焼変動が生ずる。したがって、安定運転領域の拡大を図る上で、着火燃料のセタン価が重要な因子であると考えられる。この面では、廃食油 BDF の FAME 組成を調整することで軽油よりも高いセタン価に保つことは容易であり、廃食油 BDF は二元燃料ディーゼル機関の着火燃料として十分な適合性を有している。

以上の背景のもとで、研究代表者らは二元燃料ディーゼル機関の研究に着手した。これまでの研究の結果、CNG 供給比率が 75% までは高負荷において通常のディーゼル運転と同等の正味熱効率が得られること、CNG を供給した場合には Smoke の顕著な低減が得られる一方、NO<sub>x</sub> エミッションは漸増傾向を示すこと、などが明らかとなっている。

## 2. 研究の目的

CNG (圧縮天然ガス) を主燃料とする二元燃料ディーゼル機関において、高純度の FAME (脂肪酸メチルエステル) を着火燃料とした際の機関性能、燃焼特性、排ガス特性に及ぼす影響を基準燃料である軽油着火の場合と比較検討を行う。また、セタン価を 100 から 30 まで数段階に設定した標準燃料を適用し、着火燃料のセタン価の影響を調査する。

つぎに、CNG に対して水素 (H<sub>2</sub>)、あるいはジメチルエーテル (DME) を予混合した際の機関性能、燃焼特性、排ガス特性に及ぼす影響を明らかにする。さらに、排気再循環 (EGR) を模擬するために、窒素 (N<sub>2</sub>) または二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) を用いて吸気を希釈した際の影響について調べる。

## 3. 研究の方法

既存の小形直接噴射式ディーゼル機関に対して、ガス供給系を付加した二元燃料ディーゼル機関実験システムを構築した。ガス供給系は、ガスポンプ、圧力調整器、マスフローコントローラ、逆止弁で構成され、ガス燃料および不活性ガスはそれぞれ吸気管に直接供給した。着火燃料には JIS 2 号軽油 (コントロール)、FAME (オレイン酸メチルエステル: OME とパルミチン酸メチルエステル: PME との混合燃料)、およびセタン価が 100, 70, 55, 50, 45, 40, 35, 30 に調整された標準燃料を適用した。CNG は吸入空気流に対して直交する方向から供給した。

H<sub>2</sub> または DME を CNG に予混合する際には、ガスマキサーを介して吸気管に供給した。H<sub>2</sub> の流量制御にはマスフローコントローラを使用し、DME は電子秤により質量流量を計測した。不活性ガス (N<sub>2</sub> または CO<sub>2</sub>) 供給は、マスフローコントローラで流量を制御したのち、CNG 供給口と 90° 異なる方向から供給した。この際、L 字型の不活性ガス導入管 (アルミ合金製: φ5×φ6×ℓ140) を設置し、吸入空気流と並行になるよう向きを変え、吸気管中央部から不活性ガスを供給した。

排気ガス中のNO<sub>x</sub>の測定にはCLA, HCについてはFIA, 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. 実験は高負荷一定の条件(BMEP=0.66~0.68MPa)を中心に行い, 機関性能, 燃焼特性, 排ガス特性を調査した.

#### 4. 研究成果

##### (1) 着火燃料の種別およびセタン価の影響

バイオディーゼル(BDF)を構成する脂肪酸メチルエステル(FAME)の違いが二元燃料ディーゼル機関の性能, 燃焼特性, 排ガス特性に及ぼす影響について調べた. BDFを構成する主要なFAMEとして, オレイン酸メチルエステル(OME)とパルミチン酸メチルエステル(PME)を選定し, OMEに対するPMEの混合比率を変えた燃料を着火燃料に適用した. 実験の結果, FAMEを着火燃料とした場合には軽油着火に比べ着火時期が進角し, Smoke濃度が顕著に低減することが明らかとなった. OMEは軽油と同等のセタン価を有するのに対して, PMEは高セタン価燃料(約74)である. このため, PMEの混合比率が高いFAME燃料では着火遅れが短縮し, NO<sub>x</sub>濃度が低下した.

つぎに, セタン価を規定する標準燃料を調製し, 二元燃料ディーゼル機関の着火燃料として適用した. 実験の結果, セタン価が70および100の標準燃料を用いた場合では, 機関性能, 排ガス特性は軽油着火の場合と大差のないことがわかった. また, この場合においてもCNG供給比率が75%を超えると失火サイクルが発生し, その発生率はセタン価が高くなると若干低下するものの燃焼安定性に対して明瞭な変化をもたらすほどではないことがわかった.

図1に, 二元燃料ディーゼル機関の着火燃料としてセタン価が55から30まで, 5刻みに異なる標準燃料を適用した場合の着火遅れ, Smoke濃度, および正味熱効率の変化をCNG供給比率( $Q_g/Q_t$ )に対して示す. ここで, CNG供給比率は, 全供給熱量 $Q_t$ に対するCNG供給熱量 $Q_g$ の比率として定義した.  $Q_g/Q_t=0\%$ は着火燃料のみの運転, すなわち, 通常のディーゼル運転を表す. CNG供給比率が増加するにつれて着火遅れが増加し, その増加割合は着火燃料のセタン価が低下するにつれて顕著に増大することがわかる. とくに, セタン価が45未満の標準燃料を用いた場合に着火遅れの増加が顕著である. 図1下段のグラフに示されるように, これらの燃料ではCNG供給比率の増加とともに正味熱効率は顕著に低下した. 燃焼解析の結果, 等容度の低下が主因となって正味熱効率が低下したものと推察された. この結果から, 二元燃料デ

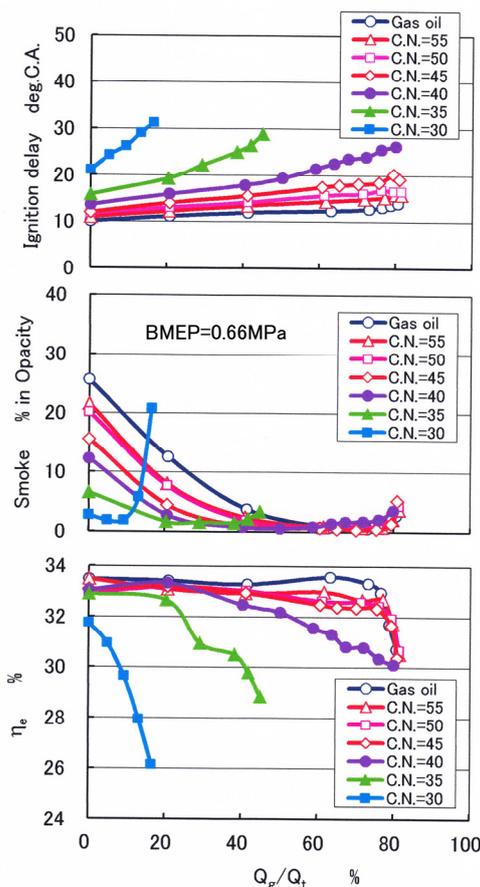


図1 着火遅れ, Smoke, および正味熱効率に及ぼす着火燃料のセタン価の影響

ィーゼル機関に適用可能な着火燃料のセタン価の下限は45程度であることが明らかとなった.

以上, 二元燃料ディーゼル機関が保有すべき着火燃料のセタン価の下限を解明できたことは, 本研究によって得られた知見といえる. 一方, 安定運転領域の拡大を図るためにFAME等の高セタン価燃料の適用を試みたが, CNG供給比率を80%以上に拡大することはできなかつた. これに関しては, さらなる検討が必要である.

##### (2) CNGへの水素またはDME予混合の影響

小形直接噴射式ディーゼル機関にCNGと水素( $H_2$ )との混合気体を吸気管に供給し, 着火燃料として軽油を使用した. この場合における機関性能, 燃焼特性, 排ガス特性について,  $H_2$ を少量予混合した際の影響を中心に検討を行った( $H_2$ -空気, 予混合気の当量比: $\phi_{H_2}=0\sim 0.075$ ). 実験の結果, 高負荷運転を行うことでCNGおよび $H_2$ の供給比率をそれぞれ変化

させても通常のディーゼル運転に匹敵する正味熱効率が得られた。CNG 供給比率を増加させると排ガス中の CO 濃度が増加するのに対して、 $H_2$  を供給することで CO 濃度の顕著な低減が得られた。この理由については、燃焼速度が高い  $H_2$  を混合することによって予混合気中の火炎伝播燃焼が良好となり、燃焼領域が拡大して CO エミッションが低減したものと考えられた。一方、 $NO_x$  濃度に関しては水素を供給すると増加する傾向となった。燃焼解析を行った結果、高負荷運転のもとで CNG に  $H_2$  を予混合すると、予混合的燃焼および拡散燃焼のピーク値が上昇することがわかった。 $H_2$  の燃焼促進作用によって予混合的燃焼が活性化し、その結果として局所的なガス温度が上昇して  $NO_x$  エミッションが増加したものと考えられる。

つぎに、CNG と DME との混合気体を吸気管に供給し、着火燃料として軽油を使用した際の機関性能、燃焼特性、排ガス特性について検討を行った。実験の結果、CNG 供給比率が低い条件で DME を供給した場合、正味熱効率は低下し、Smoke 濃度が顕著に増加した。これは、反応性の高い DME が着火燃料である軽油の噴射前に自着火したことにより、圧縮行程における負の仕事が増大して正味熱効率が低下したものと考えられた。一方、CNG 供給比率が高い条件で DME を供給した場合、正味熱効率はわずかに増加する傾向が得られた。DME を混合したことによりガス燃料予混合気 (CNG+DME) の着火性が向上し、ディーゼル燃焼を構成する主要な燃焼過程が進角した結果、等容度が増加して正味熱効率の悪化を抑制できたことが考えられる。CNG に DME を予混合した際には、運転変数によって燃焼形態が大きく異なることから、さらに詳細な検討が必要である。

### (3) 窒素または二酸化炭素供給による吸気希釈の影響

これまでの研究の結果、二元燃料運転を行った場合には通常のディーゼル運転に比べ  $NO_x$  エミッションは増大傾向を示すことが明らかとなった。そこで、排気再循環 (EGR) を模擬するとともに還流ガス種別の影響について調査するために、吸入空気に対して窒素 ( $N_2$ ) または二酸化炭素 ( $CO_2$ ) を混合することにより吸気を希釈した。ここで、希釈ガス混合比率は吸入ガス量 (空気+希釈ガス) に対する希釈ガスの質量比率で定義した。

図 2 は、希釈ガス混合比率 ( $r_{N_2}$  および  $r_{CO_2}$ ) を変化させた際の正味熱効率  $\eta_e$  および着火遅れを、CNG 供給比率をパラメータとして示

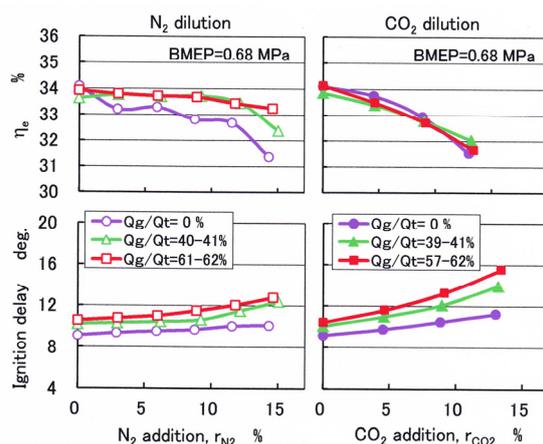


図 2 正味熱効率と着火遅れに及ぼす希釈ガス混合比率の影響

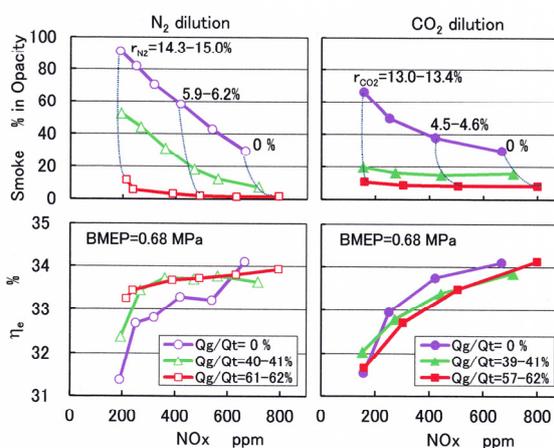


図 3  $NO_x$  と Smoke, および  $NO_x$  と正味熱効率とのトレードオフ

したものである。 $NO_x$  低減のための希釈ガスとして  $N_2$  を用いた場合、CNG を供給しない通常のディーゼル運転 ( $Q_g/Q_t=0\%$ ) では、 $N_2$  混合比率の増加とともに  $\eta_e$  は顕著な低下傾向を示す。これに対して、二元燃料運転を行った場合には、とくに CNG 供給比率が比較的高い  $Q_g/Q_t=61\sim 62\%$  において正味熱効率は比較的良好な値を保っている。一方、希釈ガスとして  $CO_2$  を用いた場合では CNG 供給比率の如何を問わず、 $CO_2$  混合比率の増加とともに  $\eta_e$  は顕著な低下を示している。このように、希釈ガスの種別によって二元燃料運転の正味熱効率に与える影響度合は異なっており、この原因を調べるために燃焼解析を行い検討した。その結果、図 2 下段のグラフに示すように、 $CO_2$  希釈では着火遅れの増加が顕著であり、このため発熱の等容度が低下した。したがって、等容度の低下が一因となって正味熱効率の低下が生じたものと考えられる。一方、

通常のディーゼル運転において、 $N_2$ 混合比率増加にともない正味熱効率が顕著に低下する要因については、Smoke エミッションの大幅な増加による燃焼効率の低下が起因しているものと考えられる。なお、燃焼安定性についても調べた結果、本実験の範囲内では図示平均有効圧の変動率は十分小さい値に抑えられていることがわかった。

図3は、BMEP=0.68 MPa 一定の運転条件における $NO_x$ 濃度とSmoke (オパシティ濃度)、ならびに $NO_x$ 濃度と正味熱効率との関係をCNG供給比率、および希釈ガス混合比率をパラメータとして比較したものである。図3に示されるように、通常のディーゼル運転において $r_{N_2}=14.3\%$ の $N_2$ 希釈を行うことによって $NO_x$ 濃度を72% (670から190 ppmまで) 低減することができた。しかしながら、この場合にはSmoke濃度の大幅な増大(30から91%まで)をとまなうとともに正味熱効率は8% (34.1から31.4%まで) 低下した。これに対して、CNG混合比率; $Q_g/Q_t=61\%$ 、 $N_2$ 混合比率; $r_{N_2}=14.6\%$ の二元燃料運転では、通常のディーゼル運転に比べ、正味熱効率の低下を3%以下に抑えながら $NO_x$ を68%、Smokeを61%、それぞれ低減することが可能である。

以上、 $N_2$ または $CO_2$ 供給による吸気希釈が二元燃料ディーゼル燃焼における $NO_x$ 低減に対して有効であることがわかった。今後の課題として、実際の排気を還流した際の効果やディーゼル燃焼の改善に有効な過給の影響について確認することが必要である。

## 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4件)

- ① Yasufumi Yoshimoto, Eiji Kinoshita, Shanbu Luge, Takatoshi Ohmura, Combustion Characteristics of a Dual Fuel Diesel Engine with Natural Gas (Lower Limit of Cetane Number for Ignition of the Fuel), SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 査読有, Vol. 5, Issue 3, (2012), pp. 1-9.
- ② 吉本康文, 大村卓稔, 木下英二, ディーゼル燃焼および単一油滴燃焼の特性に及ぼす脂肪酸メチルエステル種別の影響, 自動車技術会論文集, 査読有, Vol.43, No. 2 (2012), pp. 425-430.
- ③ Yasufumi Yoshimoto, Eiji Kinoshita, Combustion Characteristics of a Dual Fuel Diesel Engine with Natural Gas (Influence of Cetane Number of Ignition Fuel), Proc. of the ASME 2011 Power Conference, 査読有

Paper No. POWER2011-55362, (2011), pp. 1-9.

- ④ Yasufumi Yoshimoto, Combustion Characteristics of a Dual Fuel Diesel Engine with Natural Gas (Study with Fatty Acid Methyl Esters Used as Ignition Fuels), SAE Paper, 査読有, No. 2010-32-0050 (2010), pp. 1-8.

[学会発表] (計7件)

- ① 吉本隆基, 木下英二, 吉本康文, 大高武士, 1-ブタノール混合パーム油メチルエステルによる二元燃料ディーゼル機関の燃焼特性, 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
- ② 吉本隆基, 木下英二, 吉本康文, 1-ブタノール混合軽油を着火燃料とする二元燃料ディーゼル機関の燃焼特性, 日本機械学会九州支部福岡講演会, 2012年9月29日, 福岡工業大学
- ③ 山布魯格, 大村卓稔, 吉本康文, 木下英二, パーム油メチルエステル/軽油混合燃料のディーゼル燃焼に及ぼすブタノール混合の影響, 日本機械学会北陸信越支部第49期総会・講演会, 2012年3月10日, 金沢工業大学
- ④ 大村卓稔, 山布魯格, 吉本康文, 木下英二, 天然ガスを使用する二元燃料ディーゼル機関の燃焼特性 (水素混合の影響), 日本機械学会 2011年度年次大会, 2011年9月13日, 東京工業大学
- ⑤ 山布魯格, 大村卓稔, 吉本康文, 木下英二, 二元燃料ディーゼル機関の燃焼に及ぼす着火燃料のセタン価の影響, 日本機械学会 2011年度年次大会, 2011年9月13日, 東京工業大学
- ⑥ 吉本康文, 金子和樹, 木下英二, オレイン酸メチルを着火燃料とする二元燃料ディーゼル機関の燃焼特性, 日本機械学会 2010年度年次大会, 2010年9月6日, 名古屋大学
- ⑦ 吉本康文, 大村卓稔, 木下英二, 天然ガスを主燃料とする二元燃料ディーゼル機関の性能および排気特性, 第80回日本マリンエンジニアリング学会学術講演会, 2010年8月30日, 朱鷺メッセ (新潟市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉本 康文 (YOSHIMOTO YASUFUMI)  
新潟工科大学・工学部・教授  
研究者番号: 90167023