

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：33108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420927

研究課題名(和文)天然ガスを主燃料とする二元燃料ディーゼル機関の燃焼特性改善

研究課題名(英文)Improvements in combustion characteristics of a dual fuel diesel engine with natural gas

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、圧縮天然ガス(CNG)を吸気管に供給しディーゼル燃料を噴射して着火、燃焼を行う方式の二元燃料ディーゼル機関の燃焼特性改善を目的とする。実験はココナッツ油メチルエステル(CME)および軽油を着火燃料に用い、クールドEGRと機械式過給を併用した。研究の結果、CNG供給比率40%、過給あり(120 kPa)の条件において、EGR率を26%(吸気酸素濃度17%)まで拡大しても正味熱効率を悪化せずにNOxとSmokeとのトレードオフを大幅に改善することができた。その際の効果はCMEの方が顕著であった。

研究成果の概要(英文)：The aim of the present study is to improve combustion characteristics of a dual fuel diesel engine. In this investigation, natural gas (CNG) is supplied to an intake-pipe and the ignition fuel is injected into the combustion chamber. The experiments used coconut oil methyl ester (CME) and JIS No. 2 diesel fuel as the ignition fuel, and a technique combining cooled EGR and supercharging was employed. The results showed that the trade-off relation between the NOx and smoke emissions improved remarkably without worsening the brake thermal efficiency at a condition of 40% CNG supply, 120 kPa boost pressure, and 26% EGR (17% oxygen concentration in the intake air). The smoke reductions with CME were better than with diesel fuel.

研究分野：工学

キーワード：ディーゼル機関 二元燃料 天然ガス バイオディーゼル 機械式過給 クールドEGR 正味熱効率 ト
レードオフ改善

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)を主燃料として吸気管に供給し、ディーゼル燃料を燃焼室内に噴射して着火、燃焼を行う方式の二元燃料ディーゼル機関に関する研究を進めてきた。この方式によれば、燃焼室内に噴射した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、既存のディーゼル機関に対して比較的簡単な改造をするだけで適用が可能であるという利点がある。

これまでの研究の結果、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%程度までは通常のディーゼル運転と同等の高い熱効率を保ちながら、排気中のSmokeエミッション(オパシティ濃度)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%を超えると着火が不安定となり失火サイクルが発生し、正味熱効率の急激な低下ならびにTHCの大幅な増大が生じた。

この原因については、CNG-空気予混合気の当量比増大ならびに着火燃料の噴射量減少にともない、可燃混合気の形成が遅れることで着火遅れが長くなり、その結果、着火が不安定となって失火が生じたことが考えられた。本方式の二元燃料ディーゼル燃焼において、圧縮着火特性を改善するためには噴霧束内に導入される空気量の増大を図ることが有効であると考えられる。以上のことから、

過給の採用による燃焼の改善、および発熱量が低い含酸素燃料を着火燃料に適用した際の噴霧の運動量増大による燃焼改善効果、を検証しておく必要がある。また、本二元燃料方式では通常運転に比べ排気中のNOx濃度は相対的に高いことから、NOxエミッションの大幅低減を目的とした排気再循環(EGR)の併用、が不可欠である。

2. 研究の目的

天然ガス(CNG)を吸気管に供給し、ディーゼル燃料を噴射して着火、燃焼を行う方式の二元燃料ディーゼル機関の燃焼特性改善を目的とする。本研究では、これまでの知見をふまえ、燃焼特性改善の要件を3つに絞り、系統的に実験を行い最適な燃焼条件を解明する。燃焼特性改善のための実験条件は、機械式過給の採用、含酸素燃料の着火燃料への適用、および排気再循環(クールドEGR)の適用、である。

3. 研究の方法

(1) 小形直接噴射式ディーゼル機関にガス燃料供給系を付加した二元燃料ディーゼル機関実験装置を用いた。本装置は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、吸気管に直接CNGを供給する方式を採用している。本研究では、新たにインバータ制御のモータで駆動するルーツブロワ式過給システム(小倉クラッチ製、TX04)を構築し、既存の二元燃料ディーゼル機関実験装置に付加した。これにより機関運転変数の影響を受けることなく、絶対圧で100 kPa(自然給気状態)から140 kPaまでの範囲内で、安定した機械式過給を実現することができた。着火燃料としてココナツ油メチルエステル(CME)、CME60%と1-ブタノール40%(質量比率)との混合燃料(CMEBと表記)、およびJIS2号軽油を用い、過給圧の影響を調査した。CMEのセタン価は軽油と同等以上であり、他の一般的なバイオディーゼルに比べ酸素含有率が約3 mass%高い。これに対して1-ブタノールのセタン価は著しく低いが、低沸点で酸素含有率が高いという特長がある。

一般に、ガスを主燃料とする二元燃料運転では機関負荷の低下にともない正味熱効率は顕著に低下する。このため、本実験における二元燃料運転では、最大トルクが得られる機関回転速度(1900 rpm)に固定し、高負荷一定条件(BMEP=0.67 MPa)のもとで実施した。二元燃料運転において、供試機関への全供給熱量Qtに対するCNG供給熱量Qgの比率Qg/Qtを、CNG供給比率として定義した。排ガス中のNOxの測定にはCLA、THC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。

(2) 上述の機械式過給システムにクールドEGRシステムを付加することにより、本研究の最終目的である過給とEGR併用の効果を検証するための実験システムを構築した。実験装置の概略を図1に示す。EGRシステムはEGR制御弁、ディーゼル・パティキュレート・フィルター(DPF)、およびEGRクーラーで構成されている。作製したEGRシステムにより、吸気酸素濃度21%(EGRなし)から17%までの範囲内でクールドEGRを適用することがで

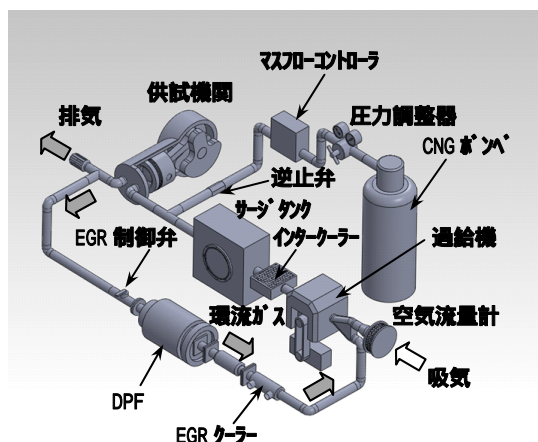


図1 実験装置の概略

きた．本研究では吸入空気中の酸素濃度を実測し，これによって EGR 率を表した．EGR 率を吸入空気量の減少率 (mass%) で定義した場合，たとえば吸気酸素濃度 17% は EGR 率 26% に相当する．なお，吸気酸素濃度は磁気力式酸素濃度計 (ベスト測器製，BCO-611) を用いて測定した．また，吸入空気量は過給機の上流に設置した層流形空気流量計 (司測研製，LFE-1000LM) を用いて測定した．

4. 研究成果

(1) 過給の有無が正味熱効率および排ガス特性に及ぼす影響

図 2 は，正味熱効率 η_e ，Smoke ならびに THC エミッションに及ぼす過給の有無の影響を CNG 供給比率に対して示したものである．着火燃料には JIS2 号軽油，CME (ココナツ油メチルエステル)，および CMEB (CME と 1-ブタノールとの混合燃料) を用いた．図 2 左欄のグラフに示すように，自然給気状態の二元燃料運転において，着火燃料として軽油および CME を用いた場合は CNG 供給比率 Q_g/Q_t を 75% 程度まで増加させても正味熱効率 η_e の低下はみられず，やや改善する傾向を示している．また，この場合の Smoke は Q_g/Q_t の増加とともに顕著な低下を示す一方，THC は Q_g/Q_t の増加にともない増加を示している．このような本実験の結果は前報と同じであり，着火燃料として CME を使用した場合についても軽油とほぼ同様の特性を示すことが明らかとなった．これに対して，CMEB では，CNG 供給比率が 50% を超えた場合に正味熱効率は顕著な低下を示している．この理由については次節で述べる．軽油を着火燃料とする二元燃料運転で Smoke が大幅に低減するのは，CNG 供給比率増加にともない着火燃料の噴射量が減少することから，噴霧内の燃料過濃部分における‘すす’の生成が抑制されることが主因である．また，CME および CMEB は含酸素燃料であり，燃料中に含まれる酸素が‘すす’の生成を抑制するとともに生成した‘すす’の酸化を促進することが考えられ，このため軽油に比べ Smoke 低減効果が高くなったと考えられる．

つぎに，過給を行った場合 (図 2 右欄のグラフ) についてみると，通常のディーゼル運転 ($Q_g/Q_t=0\%$) では着火燃料の種類によらず，過給なし (自然給気) の条件に比べると η_e は顕著に増加していることが明らかである．また，このときの Smoke エミッションは大幅な低減を示している．したがって，過給によって局所的な空気不足が解消する方向に作用してディーゼル燃焼が改善され，燃焼効率が增加して η_e が増加したことが考えられる．また，過給によりポンピング損失が改善されることも η_e 増加の要因である．しかしながら，CNG を供給する二元燃料運転では，CNG 供給比率が増加するにつれて η_e はほぼ直線的に低下する一方，THC が大幅に増大している．さらに， Q_g/Q_t が 80% 程度になると，

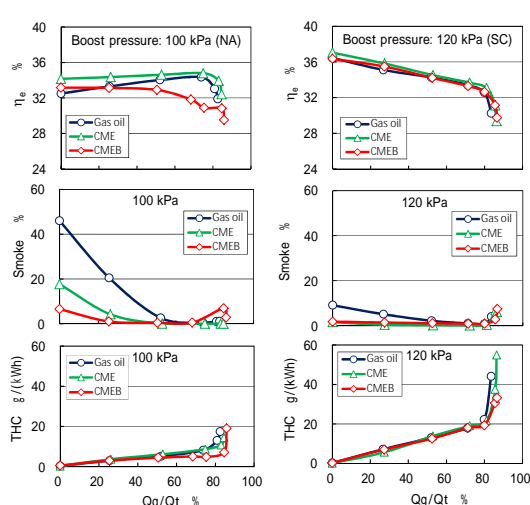


図 2 過給の有無が正味熱効率および排ガス特性に及ぼす影響 (BMEP=0.67 MPa)

THC の増大が急峻となり BTE は大幅に低下している．過給なしの二元燃料運転で THC が Q_g/Q_t とともに増大するのは，吸気に混合した CNG がシリンダ壁面などの未燃焼領域にいきわたりやすいことが主たる要因である．また，噴霧束内に巻き込まれずに燃焼室内にとどまっている CNG-空気予混合気が，ある割合で存在する．その部分では混合気濃度が希薄であるために火炎伝ば燃焼を完結することができず，このことも HC が増大した一因と考えられる．過給を適用した際には，CNG-空気予混合気の濃度がさらに希薄となるために，火炎伝ば燃焼が悪化して大量の HC エミッションが生成したことが考えられる．したがって，過給を行った際の CNG 供給比率増加にともなう η_e 低下は燃焼効率の低下に起因していると考えられる．

(2) 軽油および CMEB を使用した際の正味熱効率，Smoke，および燃焼特性に及ぼす過給圧および CNG 供給比率の影響

図 3 は正味熱効率 η_e ，Smoke エミッション，着火遅れ，ならびに発熱の等容度を，横軸に過給圧をとり軽油と CMEB (CME と 1-ブタノールとの混合燃料) とで比較したものである．CME を着火燃料とした場合については割愛したが，図 2 から明らかなように，過給の有無ならびに CNG 供給比率の多寡によらず，CME を用いた場合の正味熱効率は軽油と同様の傾向を示した．また，含酸素燃料である CME の Smoke エミッションは軽油と CMEB との中間に位置しており，着火遅れおよび等容度は軽油と同等，もしくはわずかに良好であった．

図 3 上段のグラフから明らかなように，正味熱効率 η_e は着火燃料の種類，CNG 供給比率 Q_g/Q_t ，ならびに過給圧により異なった傾向を示す．すなわち，軽油を用い過給なしで運転を行った場合は， Q_g/Q_t を 74% まで増大しても η_e は増加する傾向を示しており，従来の結果が良く再現されている．一方，CMEB を着火燃料に用いた場合は， $Q_g/Q_t=26\sim$

53%までは通常のディーゼル運転と同等の正味熱効率が得られるものの、それ以上のCNG供給比率では η_e は顕著な低下を示す。これに対して、過給を適用すると $Q_g/Q_t=70\sim 75\%$ の場合に η_e は顕著な増加を示している。このような結果が得られた理由として、着火燃料の圧縮着火特性が過給によって影響を受けたことが考えられる。すなわち、図3下から2番目のグラフに示すように、過給なしの運転では、CMEBの着火遅れは軽油に比べると非常に長く、その傾向はCNG供給比率の増加にともない強められているのがわかる。これは、CMEBの構成成分である1-ブタノールのセタン価が軽油に比べ著しく低いためである(後者が55程度であるのに対して、前者では約17)。しかしながら、過給を適用することによりCMEBの着火遅れは大幅な短縮を示す。図3下段のグラフに示すように、CMEBを用い過給なしで運転を行うと、 Q_g/Q_t の増加にともない発熱の等容度 η_{glh} は軽油に比べ大幅に低下している。CMEB燃料の着火遅れが大幅に長く、このため主要な熱発生位置が膨張行程に移行して等容度が低下したと考えられる。すなわち、CMEBを着火燃料とする無過給運転において、CNG供給比率を高く設定した際の η_e の大幅な低下は等容度の低下が主たる要因である。

CMEBは軽油に比べSmokeエミッションが大幅に低減する(図3上から2番目のグラフ)。これはCMEBが燃料中に16.9%の酸素を含有する含酸素燃料としての特性に起因すると考えられる。さらには、CMEBの成分である1-ブタノールの沸点が低いために混合気形成が促進し、予混合的燃焼が活性化する効果もSmoke低減の一因になったことが考えられる。とくに $Q_g/Q_t=26\sim 53\%$ の範囲内においては、過給の有無ならびに過給圧の違いによらず、ほぼ無煙燃焼状態が実現できている。

以上みてきたように、着火性がきわめて劣るCMEBを二元燃料運転の着火燃料に適用した際には、過給を適用することで着火特性ならびに燃焼特性を大幅に改善し得ることがわかった。過給を適用するとシリンダ内の空気密度が増加することから、着火燃料噴霧束内への空気導入率が増大する。その結果、可燃混合気の形成が促進して着火遅れが短縮すると考えられる。二元燃料運転ではCNG供給比率の増加とともに着火遅れは長くなるが、その要因としてつぎのことが考えられる。

本実験では機関出力一定(BMEP=0.67 MPa)の条件で運転していることから、CNG供給比率増加にともない着火燃料の噴射量が減少し噴霧の運動量が減少する。その結果、噴霧束内への空気導入率が低下して可燃混合気の形成が遅れるものと考えられる。また、CNG供給比率増加とともにCNG-空気予混合気の当量比が増大する。したがって、噴霧束周辺部の当量比が増大することとなり、これによっても可燃混合気の形成が遅れるものと考えられる。

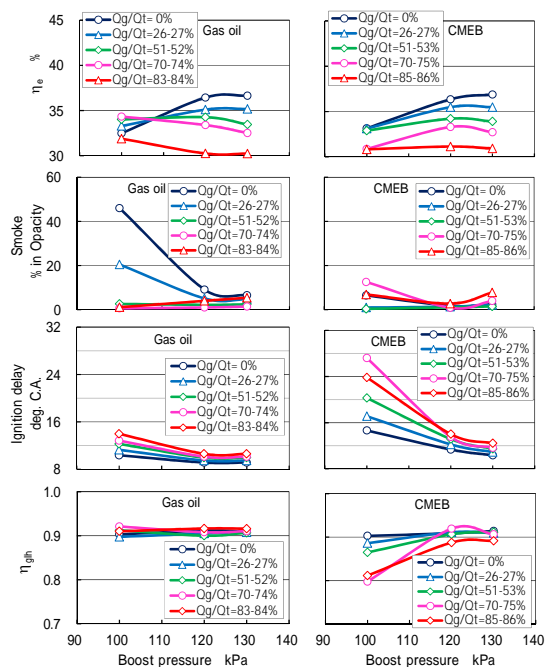


図3 正味熱効率, Smoke, および燃焼特性に及ぼす着火燃料種別, CNG供給比率, および過給圧の影響 (BMEP=0.67 MPa)

(3) 機械式過給とクールドEGRを併用した際のトレードオフ改善効果

図4は、着火燃料として軽油およびCME(ココナツ油メチルエステル)を用い、機械式過給とクールドEGRを適用した際のNOxと正味熱効率,ならびにNOxとSmokeとのトレードオフを運転形態ごとに比較したものである。図4左欄のグラフが通常のディーゼル運転の場合であり、図4右欄はCNG供給比率 $40\pm 2\%$ の二元燃料運転を行った場合を表す。

図4左欄のグラフに示すように、無過給運転のもとでEGRを適用すると、いずれの燃料もNOxは顕著に低減するが、Smokeエミッションの大幅な増大をともない、両者の間に強いトレードオフの関係が生じていることが明らかである。吸気酸素濃度19%のEGRを適用すると、含酸素燃料であるCMEを用いた場合であってもオパシティ濃度が50%を超えてしまうため、このようなEGR率は実際には設定しえない。これに対して過給を適用すると、CMEであれば吸気酸素濃度17%程度までEGR率を拡大することが可能である。この場合の正味熱効率 η_e の変化をみると、過給を適用することで η_e の低下傾向が顕著に抑制されており、実験を行ったEGRの全領域にわたり高い η_e 値を保っていることがわかる。なお、ディーゼル機関にEGRを適用した際のNOx低減に関しては、これまで多くの研究が行われてきたが、その結果、燃焼域の酸素濃度低下と火炎温度低下とがほぼ同程度の割合で寄与しているとの説が有力視されている。

前述のように、CNGを使用する二元燃料運転では、通常のディーゼル運転に比べSmokeエミッションは顕著に低減する。このため、

図4右欄のグラフに示すように、CNG供給比率40%の条件で無過給運転を行った場合であっても、CMEを着火燃料に用いることで吸気酸素濃度18%程度のEGRを適用することが可能である。これによりNOxエミッションは大幅に低減しうるが、一方、正味熱効率 η_e は顕著に低下する。これに対して過給を適用した場合には、 η_e を高い値に保ちながら吸気酸素濃度17%程度までEGR率を拡大した運転が可能である。着火燃料の種別による差異を詳細に比較してみると、CME着火の方が軽油着火に比べてトレードオフ改善効果に優れた特性を示すことがわかった。すなわち、過給圧120kPa、CNG供給比率40%の運転条件において、着火燃料としてCMEを用い、吸気酸素濃度17%のクルドEGRを適用した場合、NOx排出量0.5g/kWh以下、Smoke濃度(オパシティ)10%以下という、優れた燃焼特性を示すことが明らかとなった。

今後の課題として、酸素含有率がより高い燃料(CMEと1-ブタノールとの混合燃料など)を二元燃料ディーゼル機関の着火燃料に適用し、トレードオフ改善効果を調査する必要がある。

<引用文献>

Yoshimoto, Y., Kinoshita, E., et al., Combustion characteristics of a dual fuel diesel engine with natural gas (lower limit of cetane number for ignition of the fuel), SAE Int. J. Fuels Lubr. Vol. 5, Issue 3, 2012, 1165-1173
Shiozaki, T., Nakajima, H., Kudo, Y., Miyashita, A., Aoyagi, Y., : The Analysis of Combustion Flame under EGR Conditions in a DI Diesel Engine, SAE Paper, No.960323, 1996, 1-14

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3件)

吉本康文, 山田雅之, 木下英二, 大高武士, 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, 査読有, 82(835), 2016, 1-11. DOI: 10.1299/transjsme.15-00542

Yoshimoto, Y., Yamada, M., Kinoshita, E., Otaka, T., Influence of Supercharging on Biodiesel Combustion in a Small Single Cylinder DI Diesel Engine, SAE Technical Paper, 査読有, No.2015-32-0733, 2015, 1-11

Yoshimoto, Y., Kinoshita, E., Influence of Intake Air Dilution with N₂ or CO₂ Gases on the Combustion Characteristics of a Dual Fuel Diesel Engine with Natural Gas, SAE Technical Paper, 査

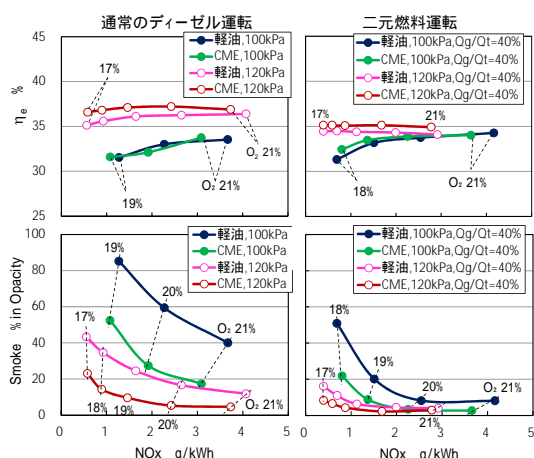


図4 通常のディーゼル運転および二元燃料運転に対して、機械式過給とクルドEGRを併用した際のトレードオフ改善効果(BMEP=0.67 MPa)

読有, No. 2013-01-2691, 2013, 1-11.
DOI: 10.4271/2013-01-2691

[学会発表](計6件)

孫小雨, 吉本康文, 木下英二, 伏見和代, バイオディーゼル燃焼に及ぼす過給圧およびEGR比率の影響, 日本機械学会北陸信越支部第53期総会演会, 2016年3月5日, 信州大学工学部

山田雅之, 吉本康文, 木下英二, 大高武士, 直接噴射式ディーゼル機関のバイオディーゼル燃焼に及ぼす過給の影響, 日本機械学会2014年度年次大会, 2014年9月9日, 東京電機大学

下麥健吾, 古川臨夢, 大高武士, 木下英二, 吉本康文, ココナツ油メチルエステル/低カロリーガス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2014年度年次大会, 2014年9月9日, 東京電機大学

山田雅之, 吉本康文, 木下英二, 二元燃料ディーゼル機関の燃焼特性に及ぼす過給の影響, 日本機械学会北陸信越支部第51期総会・講演会, 2014年3月8日, 富山県立大学

山田雅之, 大村卓穂, 吉本康文, 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(DME混合の影響), 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

吉本康文, 山田雅之, 木下英二, 天然ガス吸入二元燃料ディーゼル機関の燃焼に及ぼす吸気希釈の影響, 第83回日本マリンエンジニアリング学会学術講演会, 2013年9月4日, グランシップ静岡

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