



Title	高含酸素燃料のディーゼル燃焼特性に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	河辺, 隆夫
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15677号
Issue Date	2023-12-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/91175">https://hdl.handle.net/2115/91175</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Takao_Kawabe_abstract.pdf, 論文内容の要旨



## 学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 河辺 隆夫

### 学位論文題名

高含酸素燃料のディーゼル燃焼特性に関する研究  
(Study on diesel combustion characteristics of highly oxygenated fuels)

ディーゼルエンジンは、その高い経済性、利便性、および優れた性能特性から動力原として幅広く普及している一方、化石燃料の燃焼による大気汚染物質および二酸化炭素の排出が課題となっている。大気汚染物質については対策技術が確立されつつあるが、二酸化炭素排出に関しては化石燃料を使用する限り根本的な解決策を見出すことは困難である。それに対して小型自動車に使用されているガソリン車の代替として電気自動車の普及促進が図られているものの、ディーゼルエンジンが使用されている大型自動車や建設機械などの大出力の動力源をバッテリーとモーターで代替することは極めて困難である。したがって、ディーゼルエンジンのさらなる効率改善とカーボンニュートラル化が喫緊の重要課題となっている。

含酸素燃料はディーゼルエンジンの超低エミッション・高効率化に対する高いポテンシャルを有しており、再生可能エネルギーによって得られる電力による水電解の水素を原料とする e-fuel としてカーボンニュートラルの観点からも有望視されている。これまで、含酸素燃料は理論空燃比が小さいため噴霧内当量比が低下すること、および燃焼期間短縮が熱効率改善をもたらすことなどの研究報告はあるが、これらの現象を燃料の酸素含有率の影響に着目して火炎噴霧構造面から体系的に解明した事例は少ない。そこで本研究では、燃料の酸素含有率がディーゼル噴霧火炎構造に与える影響を解析するとともに、含酸素燃料の適用によるディーゼルエンジンの性能および排気エミッションの改善を試みた。具体的には、通常の軽油と着火性が同等となるように調合した含酸素燃料 (DGM-DMC 混合燃料) をさらに軽油と混合することによって同等の着火性で酸素含有率が異なる数種類の燃料を調合し、定容燃焼容器および単気筒ディーゼルエンジン実機を用いて系統的に実験検討を行うとともに、噴霧火炎構造に対する三次元 CFD 解析を行って各現象の解明を試みた。

本論文は 5 章から構成されており、その概要は以下の通りである。

第 1 章は序論であり、内燃機関を取り巻く社会的背景を述べた上で、ディーゼル燃焼の課題とこれまでの改善の試みについて記述している。その中で含酸素燃料のディーゼル燃焼への適用に関する研究動向について詳述し、本研究の目的および本論文の構成を記述している。

第 2 章では、本研究に用いた実験装置および実験方法、供試燃料、計測・解析手法、三次元 CFD 解析手法について詳述している。

第 3 章では、定容燃焼容器を用いて燃料の酸素含有率がディーゼル噴霧燃焼の熱発生特性および噴霧火炎構造に与える影響を系統的に調査した結果について述べている。燃料の選定にあたっては、燃焼特性を左右する着火性の影響を排除しつつ酸素含有率を変更するため、軽油よりも着火性が高い DGM と軽油より着火性が低い DMC を混合することにより軽油同等の着火性を有する含酸素燃料を調合し、さらにその調合した含酸素燃料と軽油を混合することで、軽油と同等の着火性を維持したまま酸素含有率を 0 から 43 mass % の範囲で変更して実験に用いた。

定容燃焼容器における OH ラジカルの自発光が主体となる紫外光画像および熱発生率の解析結果から、容器壁面近傍に蓄積した未燃燃料が燃料噴射終了後に緩慢に燃焼する後燃えが生じるが、酸

素含有率の増加に伴って後燃えが著しく減少することがわかった。燃料の酸素含有率が増加しても、セットオフ長、火炎到達距離、およびシャドウグラフで観察される混合気噴霧および噴霧火炎の拡がりに大きな変化はないが、噴霧中心軸周辺の燃焼が活発化していることがわかった。これは、酸素含有率の増加に伴って理論空燃比が低下することに起因して噴霧中心軸付近の過濃混合気の当量比が低下して燃焼が活発となる量論比近傍になったためであり、これらの特性は三次元 CFD 解析の結果と一致した。さらに、量論比近傍の燃焼が活発な領域が噴霧中心軸方向へ移動することにより、噴霧の乱流運動エネルギーが最も強くなる領域と主要燃焼領域が接近して燃焼をさらに促進していることが示唆された。以上の結果から、高酸素含有燃料ほど燃料噴射中の噴霧中心軸付近の燃焼が活発になって定容燃焼容器壁面に到達する未燃燃料が減少することから、噴射終了後に燃焼する容器壁面近傍の緩慢な燃焼を主体とする後燃えが大幅に低減することが明らかとなった。高酸素含有燃料では、低位発熱量の低下から噴射期間が長期化して拡散燃焼期間が増大するが、後燃えが減少することによって結果的に燃焼は長期化しないことが確認された。

第 4 章では、第 3 章で用いたものと同一の燃料をディーゼルエンジン実機に適用し、燃料の酸素含有率が熱発生特性、熱効率、および排気性能に与える影響について系統的に調査した結果について述べている。エンジン実機においても定容燃焼容器と同様の特性を示し、高酸素含有燃料ほど低位発熱量の低下に伴う噴射期間の増大により拡散噴霧燃焼期間が長期化するものの後燃えが大幅に低減するために燃焼期間は短縮し、その結果として発熱の等容度が向上することがわかった。一方、図示平均有効圧力 (IMEP) が 1070 kPa の高負荷では、燃料の酸素含有率が 36 mass % で発熱の等容度がピークを示してそれ以上では減少に転ずる結果となった。これは後燃えによる発熱の等容度の向上効果を噴射期間長期化に伴う拡散噴霧燃焼期間の増加による影響が上回ったことによるが、インジェクターの噴孔径を拡大することによって発熱の等容度は改善できることが示された。

熱効率は、燃料の酸素含有率が増加すると、発熱の等容度の向上に伴って向上する傾向が示すが、酸素含有率が 27 mass % 付近でピークを呈し、それ以上では減少に転じた。これは冷却損失が増大して発熱の等容度向上による熱効率向上の効果を上回った結果であり、三次元 CFD の解析結果から、高酸素含有燃料では軽油に比較して量論比近傍の火炎噴霧領域が拡大したことによって高温の火炎噴霧が広範囲に拡がり、長期間にわたって燃焼室壁面に衝突することから熱流束が増大した結果であることが示唆された。噴孔径の拡大は発熱の等容度向上には効果的であるが、同時に熱損失の増大を招き、本研究の範囲では熱効率の改善には至らなかった。

高含酸素燃料ほど、高 EGR 下においても無煙運転が可能であり、本研究の条件では酸素含有率 27 mass % 以上で超低 NO<sub>x</sub>・無煙運転が可能であることが示された。

第 5 章では、本研究で得られた成果を総括している。

以上を要するに、本研究において燃料の酸素含有率がディーゼル噴霧火炎の構造に与えるメカニズムを解明するとともに、実際のエンジンでの燃焼特性、熱効率、および排気エミッションに与える影響を系統的に明らかにした。特に後燃え低減のメカニズムおよび熱効率に与える影響要因とその改善のメカニズムについて噴霧観察および三次元 CFD 解析によって明らかにした。含酸素燃料は、ディーゼル燃焼改善に対して、カーボンニュートラルの観点からも高いポテンシャルを有していることから、今後のさらなる高効率低エミッション燃焼の研究に資する結果を得ることができた。