

# 博士学位論文審査要旨

2020年1月21日

論文題目： CO<sub>2</sub>ガス溶解燃料のディーゼル噴霧燃焼特性に関する研究

学位申請者： 向山 智之

審査委員：

主 査： 理工学研究科 教授 千田 二郎

副 査： 理工学研究科 教授 松村 恵理子

副 査： 京都大学 名誉教授 塩路 昌宏

(同志社大学エネルギー変換研究センター客員教授)

要 旨：

重量車両分野では、今後、高効率ディーゼル機関のハイブリッド化が進むと考えられている。このためディーゼル機関の更なる高効率・低エミッション化が必要である。ディーゼル燃焼過程は拡散燃焼形態であり、燃料噴霧の微粒化、急速蒸発、早期の希薄混合気の形成による急速低温燃焼法の提案が望まれている。現在では燃料噴射圧力の超高压化による低エミッション燃焼法が実用化されているが、投入エネルギーに対して得られる噴霧の微粒化効果が限界を迎えている。

本研究では燃料に気体（二酸化炭素）を混入および溶解させ、燃料噴射時の圧力降下による溶解気体の析出により微粒化を促進する手法に着目している。本手法によって、燃焼主体領域となる混合気中にのみ選択的に二酸化炭素を配置することが可能で、噴霧内部 EGR 効果（EGR：Exhaust Gas Recirculation）によって燃焼温度の低減効果が大きく低 NO<sub>x</sub> 化と希薄混合気の急速燃焼による高効率化が期待される。本研究においては、燃料への気体の溶解度解析、容器内噴霧実験での噴霧性状解析、モデル燃焼容器内での噴霧蒸発過程とすす微粒子生成挙動の光学的計測実験、さらに機関実機での実稼動条件での排気エミッションと燃焼性能確認試験を行っている。

よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位を授与するにふさわしいものであると認められる。

## 総合試験結果の要旨

2020年1月21日

論文題目： CO<sub>2</sub>ガス溶解燃料のディーゼル噴霧燃焼特性に関する研究

学位申請者： 向山 智之

審査委員：

主査： 理工学研究科 教授 千田 二郎

副査： 理工学研究科 教授 松村 恵理子

副査： 京都大学 名誉教授 塩路 昌宏

(同志社大学エネルギー変換研究センター客員教授)

要 旨：

本論文提出者は、2016年3月に同志社大学大学院理工学研究科博士課程（前期課程）を修了後、2016年4月より本学大学院理工学研究科博士課程（後期課程）に在学している。提出者は、博士課程（前期課程）から博士課程（後期課程）の在学中にわたり一貫してエンジンシステムにおける燃料噴射過程および噴霧燃焼過程の解明のための基礎的研究を行ってきた、

本論文の主たる内容は、自動車技術会論文集に4編、SAE Technical Paperに3編、同志社大学ハリス理化学研究報告に2編すでに公表され、内外の学会において十分な評価を得ている。

2020年1月11日（土）午後1時より約2時間にわたり提出論文に関する学術講演会（博士論文公聴会）が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに講演終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、いずれも十分な学力を有することが確認できた。また、提出者は本学大学院での語学試験（英語）に合格しており、十分な語学能力を有すると認められる。

よって、総合試験の結果は合格であると認める。

# 博士學位論文要旨

論文題目： CO<sub>2</sub>ガス溶解燃料のディーゼル噴霧燃焼特性に関する研究  
氏名： 向山 智之

## 要旨：

自動車社会の発達により、自動車は交通や物流の分野において非常に重要な役割を果たしており、我々の生活にとって必要不可欠な存在となっている。しかしながら、自動車はエネルギー資源の枯渇化や大気汚染などの問題を進行させる要因となる。近年、電気自動車や水素燃料電池自動車の需要が高まっているものの、ハイブリッドを含む内燃機関を搭載した自動車が2050年においても半数以上を占めると予測されている。そのため、内燃機関のさらなる環境負荷低減および熱効率向上は急務であり、ガソリン機関と比較し熱効率の高いディーゼル機関が注目されている。

ディーゼル機関はガソリン機関の予混合吸気・火花点火方式とは異なり、高温・高圧の圧縮空気中へ燃料を直接噴射し自己着火させる直接噴射・圧縮着火方式をとる。そのため、燃焼室内に噴射された燃料は十分に拡散せず、燃焼室内に形成される混合気濃度は希薄領域から過濃領域まで幅広い分布を有する。これにより、化学量論比付近の高温領域において窒素酸化物 (NO<sub>x</sub> : Nitrogen Oxide)、燃料過濃領域において粒子状物質 (PM : Particulate Matter) がそれぞれ排出される。また、これらの生成条件はトレードオフの関係であるため、同時低減は困難である。近年では、ディーゼル微粒子捕集フィルタ (DPF : Diesel Particulate Filter) および尿素 SCR (Selective Catalytic Reduction) 等の後処理装置を使用することにより、排気ガスの清浄化が行なわれている。しかし、今後さらなる排気ガス規制の強化が予想されるため、外部装置の改良だけでなく燃焼面の改善による低エミッション化が必要である。

ディーゼル燃焼は拡散燃焼主体の燃焼形態であることから、燃焼の改善には混合気の形成過程が重要となる。そのため、燃料噴霧を微粒化させ、早期に希薄で均一な混合気を形成させることが必要となる。現在では燃料噴射圧力の超高压化により、燃料噴霧の微粒化および混合気の形成を促進する手法が用いられている。しかし、超高压噴射は投入エネルギーに対して得られる噴霧の微粒化効果が少なく、燃料噴射圧力 200 MPa を超えると微粒化の促進が限界となる。そのため、燃料噴射の超高压化に依らない物理的な観点から燃料噴霧の微粒化および混合気形成の促進が必要となる。そこで本研究では燃料に気体を混入および溶解させ、溶解気体の析出効果により微粒化を促進する手法に着目した。さらに本手法では燃料中に気体 (二酸化炭素) を溶解させるため、混合気中にのみ選択的に二酸化炭素を配置することが可能である。そのため、通常の排気ガス再循環システム (EGR : Exhaust Gas Recirculation) と比較して、燃焼温度の低減効果が大きいと期待される。また、エンジンシステム上で実用化するため、EGR ガスを燃料タンクにバブリングさせることにより、燃料に溶解させるシステムを提案した。

本論文は、以下の8章で構成されている。

第1章では、100年に一度の変革期と言われる内燃機関を取り巻く社会事情に加え、現在のディーゼル機関の研究動向および本研究の位置付けと目的を論じる。

第2章では、本研究に関連する従来研究として、過去に行なわれた気体溶解燃料、CO<sub>2</sub>液化混合燃料および二成分混合燃料に関する研究を紹介する。また、同様にマイクロバブルやナノバブルといった微細気泡を燃料中に混入することにより、燃焼の改善を行なった研究例などについて要約する。

第3章では、燃料に対する気体の溶解度を正則溶液理論により算出することで、各気体におけ

る溶解圧力と溶解度の関係を解析した。大気中や排ガス中に多く含まれている気体として、窒素、酸素および二酸化炭素に着目した結果、二酸化炭素の溶解度が最も大きいことから、本研究では二酸化炭素を溶解ガスに選定した。また、昇温時における気体の溶解度については、Peng-Robinson 状態方程式を用いることにより推算した。さらに、燃料中に気体を加圧溶解させた際における飽和蒸気圧曲線の変化や燃料噴射に伴う相変化について解説する。最後に、本研究における気体溶解燃料による噴霧および燃焼の制御手法についても解説し、CO<sub>2</sub>ガス溶解燃料をディーゼル機関に適用した場合における EGR 率や理論熱効率の向上について、サイクル論の視点から解析を行なった。

第 4 章では、気体溶解燃料の作成装置および作成手法について説明する。気体溶解燃料においては燃料の昇圧ポンプ前段にて高圧となるため、従来とは異なる燃料昇圧システムを含む燃料噴射装置を採用した。また、作成された気体溶解燃料における溶解度を計測することにより、第 3 章で算出した理論値との比較を行なった。なお、溶解度は気体溶解燃料の作成時およびインジェクタから噴射された時の二つの計測ポイントにて計測することにより、実際に筒内に投入される量の推定を行なった。また、燃料噴射率を計測することにより、気体溶解燃料における燃料噴射率の低下および噴射指令値と噴射遅れおよび実噴射期間における関係を把握した。

第 5 章では、気体溶解燃料が噴霧先端到達距離や噴霧角といった噴霧特性に与える影響を調査した。溶解圧力が増加することにより噴霧の分散性が向上し、混合気の希薄化が確認された。また、蒸発場におけるシャドウグラフ撮影において、噴霧先端到達距離を噴霧幅で除したアスペクト比を算出することで、気体溶解燃料により扁平な噴霧の形成が実現された。超高解像度撮影法の結果により、CO<sub>2</sub>ガス溶解燃料においては溶解圧力の増加に伴い、噴霧の微粒化が進行し、噴霧全体として比較的均一な粒径分布となった。

第 6 章では、定容燃焼容器を用いて気体溶解燃料の燃焼実験を行なうことで、燃焼特性および火炎特性に与える影響を調査した。その結果、輝炎の発生位置が噴霧下流に移行し、輝度が低下していることから、すす生成量が低減したと推測される。また、輝炎の撮影結果に対して、画像二色法解析を用いることで、火炎温度および相対すす濃度の解析を行なった。火炎温度の低下により NO<sub>x</sub> の生成量が低減し、相対すす濃度の低下よりすすの生成量が低減することが示唆された。次に、実機関に近い環境を再現した急速圧縮膨張装置により、化学種自発光計測および輝炎の同時撮影を行ない、熱発生率や着火遅れなどの燃焼解析を行なった。これより、CO<sub>2</sub>ガスが析出することにより、予混合燃焼期間において燃焼を抑制し、拡散燃焼期間において燃焼を活性化させることがわかった。また、OH ラジカルおよび輝炎の積算輝度値を時間積分した結果、OH ラジカルの発光は溶解圧力の増加に伴い増加する一方、輝炎の発光は低下する傾向が示された。よって、気体溶解燃料は輝炎の生じない不輝炎領域を拡大させ、すすの生成を低減させる効果があると推測された。

第 7 章では、気体溶解燃料を単気筒ディーゼル機関に適用することにより、実機関における燃焼特性および排気特性を調査した。第 6 章で述べた通り、実機関においても拡散燃焼が活性化され、燃料噴射終了後の後燃え期間が短縮された。また、排気特性においても、第 3 章で述べた研究コンセプトの狙い通り、Smoke の排出量を最大 70%程度低減することが示された。しかしながら、NO<sub>x</sub>の排出量についてわずかな増減は見られるものの、想定していたような低減効果は見られなかった。これは噴霧内部 EGR の効果による NO<sub>x</sub>生成量の減少と燃焼の活性化により筒内温度が上昇したことによる NO<sub>x</sub>生成量の増加が相殺しあったためであると考えられる。また、通常の外部 EGR を導入することにより、噴霧内部 EGR (気体溶解燃料)、外部 EGR および複合システムにおける実験を行なった。一般に外部 EGR を導入することにより、燃焼温度が低下するため NO<sub>x</sub>排出量は抑制されるが、Smoke などの未燃物質は悪化することが知られている。しかしながら、複合システムにおいては NO<sub>x</sub> および Smoke を同時低減可能であることが示された。また、外部 EGR のみを使用した場合と比較して、NO<sub>x</sub>の低減効果は大きくなる傾向が見ら

れた。また、溶解圧力 (CO<sub>2</sub>ガスの溶解度)、燃料噴射圧力、噴孔諸元 ( $h/d_0$ ) といったパラメータの変更が、CO<sub>2</sub>ガス溶解燃料における燃焼・排気特性に与える影響を把握した。

第8章では、本論文の研究結果をまとめ、今後の展望について所見を示した。

以上が本論文の構成である。