

博士学位論文審査要旨

2017年 2月 13日

論文題目： 直接噴射式ガソリンエンジンの粒子状物質低減に関する研究

学位申請者： 植木 毅

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 千田 二郎

副査：同志社大学大学院理工学研究科 准教授 松村 恵理子

副査：同志社大学 名誉教授 藤本 元

要 旨：

地球環境負荷の低減要求により自動車の電動化シフトが始まっているが、今後数十年間は内燃機関付き自動車が大半を占めると予測されており、内燃機関には今まで以上に排気エミッションの低減が要求されている。特に、ガソリンエンジンに対し欧州や日本で新しく規制に追加された粒子状物質（PM）の低減は急務である。

本論文はこの粒子状物質の低減に取り組んだ研究であり、燃焼室内の噴霧燃焼過程を解明し、低減策を立案し、それらによる粒子状物質の低減効果を確認している。本論文は11章より構成されている。第1章の緒論において研究背景と位置づけを明確にし、2章で従来研究例を展望している。その後、3章において直接噴射式ガソリンエンジンからのPM排出特性を明らかにし、4章で燃焼室内部の噴霧燃焼過程を光学的に測定し、5章においてピストン壁面での燃料液膜形成過程を調べ、6章と7章でPM生成挙動を詳細に測定している。そして8章、9章、10章で高圧燃料噴射系の適用によるPM低減策を提示し、11章で総合的な結論を導いている。その内容として、エンジン燃焼室内の可視化解析により、燃料噴射から燃焼、そして粒子状物質の生成までを体系的・定量的に解明している。その結果、粒子状物質は機関冷間始動時の触媒急速暖機運転時で多く発生し、その生成要因は燃焼室壁面上の燃料液膜と空間の過濃混合気であることを明らかにした。ここで粒子状物質の数密度の解析は、従来研究にはない新規の手法であり、得られた粒子状物質の粒径分布に関する知見は重要な知見である。また、粒子状物質の低減策として燃料の高噴射圧化を提案している。そして燃料の高噴射圧化が粒子状物質の低減に有益な手法であることを、燃料噴霧の基礎特性から粒子状物質の生成要因への影響にわたり系統立ててまとめている。これより本研究は、今後のガソリンエンジンの粒子状物質の低減に貢献する極めて重要な研究と考えられる。

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

2017年 2月 13日

論文題目： 直接噴射式ガソリンエンジンの粒子状物質低減に関する研究

学位申請者： 植木 毅

審査委員：

主 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 千田 二郎

副 査：同志社大学大学院理工学研究科 准教授 松村 恵理子

副 査：同志社大学 名誉教授 藤本 元

要 旨：

本論文提出者は、北海道大学物理工学系機械工学科を2002年3月に卒業後、同年4月に(株)デンソーに入社し、その後(株)日本自動車部品総合研究所(現SOKEN)にて勤務し、一貫して内燃機関の燃料噴射系および燃焼解析の研究および開発業務に携わっている。2015年4月より同志社大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程(後期課程)に在学している。

本論文の主たる内容は、自動車技術会論文集に4件の論文として掲載されている。さらに2件の投稿中の論文があり、その内容は学会等において十分な評価を得ている。

2018年1月27日午後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。

以上のことから、本学位申請者の専門分野に関する学力ならびに語学力は十分なものであると認める。

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： 直接噴射式ガソリンエンジンの粒子状物質低減に関する研究
氏名： 植木 毅

要 旨：

昨今、強まる地球環境負荷の低減要求により自動車の電動化シフトが始まっているものの、向こう数十年間は内燃機関付き自動車が大半を占めると予測されており、内燃機関にはこれまで以上に熱効率の向上と排気エミッションの低減が要求されている。その中でも、燃焼室内に直接燃料噴射するインジェクタを備える直接噴射式ガソリンエンジンは、混合気形成の自由度が高いことから、理論空燃比よりも希薄な燃焼形態を実現できるため、熱効率向上のポテンシャルが大きく、今後数十年の一翼を担う内燃機関として考えられている。この実現には直接噴射式ガソリンエンジンの排気エミッションのより一層の低減が要求されており、特に昨今欧州で排気規制に新たに項目に加わった粒子状物質(Particulate Matter: PM)の低減が重要課題であり、対応が急務である。

そこで、本研究では、エンジン燃焼室内の実現象解明から PM 低減に貢献することを目標に取り組んだ。PM 低減に向けて、まず PM が多く排出される運転条件を明らかにし、その運転条件におけるエンジン燃焼室内の燃料噴射～燃焼～PM 生成の実現象を明らかにし、この実現象から PM 生成要因を明確にすることが重要だと考えた。そして、明らかにしたエンジン燃焼室内の実現象をもとに PM 低減策を導き出し、PM 低減策による PM 生成要因への影響を体系的にまとめ、PM 低減効果を実証する考えのもと研究を遂行した。

最初に、直接噴射式ガソリンエンジンの PM 排出が多い運転条件を把握するため、欧州の法規認証試験で用いられるテストサイクル走行時におけるエンジンより排出される PM 粒子数を計測した結果、冷間始動時と加速時で排出がみられ、特に冷間始動時の触媒急速暖機運転で多く、始動～200 秒の間では触媒急速暖機運転からの PM 排出が約 75%を占めることが判った。これより本研究では触媒急速暖機運転を研究対象の運転条件に選定した。

ここで、触媒急速暖機運転の燃焼形態は、点火プラグ周りに混合気を形成する成層燃焼である。この燃焼は、燃料噴霧をピストン壁面に衝突させ、ピストン頂面をガイドとして利用し、点火プラグに混合気を輸送することで、燃料濃度の濃い混合気を点火プラグ周りに形成し、点火プラグによる着火および燃焼の安定を狙っている。これより PM 生成要因を明らかにするには、噴霧と燃焼、そして PM 生成を紐付ける体系的な可視化解析が重要と考えた。そこで、燃焼室内の実現象把握のために、燃焼室内を視認できる可視化エンジンと、さらに可視化自由度の高いシリンダライナを透明ガラスに置き換えたガラスシリンダエンジンを製作し、光学的手法により燃焼室内の現象を可視化解析した。

噴霧と燃焼の可視化解析は、エンジン燃焼室内の直接撮影で実施した。燃料噴射はピストンが上昇する圧縮行程後半に行われ、噴霧の一部がピストン頂面に衝突し、ピストン頂面上に燃料液膜を形成する。残る噴霧は飛散や巻き上がりにより、ピストン頂面上を移動し、ピストン中央に設けられたリップを介して、点火プラグ方向に向きを変える。そして、点火プラグでの点火により燃焼が開始される。燃焼過程において、火炎中に PM が生成しその固体放射による輝きのある赤橙色の輝炎に着目すると、輝炎は点火直後に空間に筋状に存在する。その後、火炎伝ばとともに燃焼が進行し、燃焼行程後半では、輝炎はピストンリップ上部の空間と燃料液膜が形成するピストン頂面上に発生し、特にピストンリップ上部に輝炎が多い。

次に、PMの可視化により、燃焼とPMの関係を調査した。PMの可視化にはPMの主構成成分であるSoot粒子へのレーザー照射による放射光強度を利用したレーザー誘起赤熱法(Laser Induced Incandescence: LII)、およびSoot粒子径の計測にはLII法を発展させた時間分解レーザー誘起赤熱法(Time Resolved Laser Induced Incandescence: TR-LII)を用いた。Sootと燃焼の関係を評価した結果、燃焼により生成するSootの位置は、燃焼の輝炎が存在する位置と概ね一致する。特に、輝炎と同じく、燃焼行程の後半でピストンリップ上部のSoot生成が多い。そして、Sootは燃焼終了後も存在し、大きく拡散することなく、排気行程で排気ポートへと排出される。また、圧縮行程後半の燃料噴射量を減量し、ピストン頂面への燃料液膜厚さを薄くすると、燃料液膜上加えピストンリップ上部の空間からのSootが減少する。これは、噴射燃料のピストン衝突による飛散や巻き上がりが減少し、ピストンリップ上部の空間の過濃混合気が減少したことを示唆していると考えられる。

LII法やTR-LII法は、他の研究者らにより提唱された計測手法であるが、本研究では新たに燃焼室内のSoot粒子の数密度計測にも取り組んだ。単位領域あたりのSoot粒子の放射強度は領域内に存在する粒子径分布に依存する考えのもと、TR-LII法を応用し、燃焼室内のSoot数密度分布について解析を試みた。触媒急速暖機運転のSoot粒子径に対する数分布の時系列変化を計測した結果、点火からSootが多量発生する前まではおよそ30nmに最頻値を持つ粒子径分布であり、ピストンリップ上部の燃焼室空間でSootが多量発生する燃焼行程後半では60nm付近に最頻値を持つ分布に変化することを明らかにした。

以上より、エンジン燃焼室内の現象解析から、触媒急速暖機運転におけるPM生成要因は、燃料噴射のピストン衝突によって生じる燃料液膜と、衝突後の噴霧の飛散や巻き上がりなどにより形成される過濃混合気であることを示した。

次に、明らかにしたエンジン燃焼室内の現象とPM生成要因をもとに、PM低減策について検討した。本研究ではPMの低減策として燃料の高噴射圧化が有効であると考え、その可能性について評価した。燃料の高噴射圧化を選定した理由は、PM生成要因であるピストン頂面の燃料液膜および空間の過濃混合気は、いずれも噴射燃料のピストン頂面への衝突に起因することから、噴霧がピストン頂面に衝突するまでの短い時間で噴霧の質を改善することが有効と考えたためである。高噴射圧化による噴霧特性およびPM生成要因への影響として、以下の仮説を立てた。“燃料の高噴射圧化により、ノズルからの噴出速度が増加するため、空気とのせん断力が増加し燃料が微粒化し、気化性が向上する。噴霧の微粒化により燃料液滴の運動量が小さくなり、周囲空気との追従性が向上するため、壁面に衝突しにくく、燃料液膜の形成が少なくなる。また、高噴射圧化によるせん断力増加により、噴霧への空気導入速度が増加するため、噴霧内に取り込まれる空気量が増加し、噴霧内での空気と燃料の混合促進により過濃混合気が低減する。”

この仮説を立証するため、燃料の高噴射圧化による影響解析として、噴霧特性として噴霧粒径と噴霧への空気導入、PM生成要因、そして排気PMエミッションへの燃料噴射圧力による影響を評価した。燃料の噴射圧は、現在市販車で一般的に採用されている20MPaをベースに、50MPaと80MPaを選定した。評価は、燃料噴射圧20、50、80MPaで最大噴射率が同等となるようにインジェクタ先端のノズルを研究用に試作し、評価した。

噴霧特性として、噴霧粒径と噴霧に取り込まれる空気流速を評価した。噴霧粒径は、影写真法により噴霧粒径分布を計測し、燃料の高噴射圧化により、粗大液滴が低減し、微粒化することを確認した。噴霧粒径の指標の一つであるザウター平均粒径は、噴射圧20MPaから80MPaにより、 $10.4\mu\text{m}$ から $6.1\mu\text{m}$ と約41%小さくなる。次に、噴霧内に取り込まれる空気の指標として、噴霧への空気導入速度を粒子追跡法により計測した。燃料の高噴射圧化により、噴霧への空気導入速度が高まり、空気導入量が多くなることを確認した。

PM生成要因の一つであるピストン頂面の燃料液膜厚さは、蛍光染料入り燃料を用い紫外線照

射による蛍光発光強度を計測する方法で計測した。燃料の高噴射圧化により、ピストン頂面の燃料液膜は薄くなり、面積が低減する。これは確認した高噴射圧化による微粒化により、各燃料液滴の運動量が小さくなり、周囲空気との追従性が向上したためと考えられる。そして高噴射圧ほど、燃料液膜が薄いため、燃料液膜の面積の減少速度は早くなる。燃料噴射圧 50MPa 以上では噴射開始～点火までに形成した燃料液膜が気化する。これより、触媒急速暖機運転では、噴射圧 50MPa 以上で燃料付着が起因する PM 生成を抑制できる可能性があることを示唆した。

もう一つの PM 生成要因である過濃混合気の時空間特性を把握するため、混合気分布をレーザー誘起エキサイプレックス蛍光法(Laser Induced Exciplex Fluorescence : LIEF 法)により計測した。LIEF 法とは、蛍光剤を混入した燃料にレーザーを照射することにより、分子を励起させ蛍光を誘起させる手法である。点火時における混合気分布は、燃料の高噴射圧化により液相が減少し、気相の濃淡バラツキが低減し、均質化することを確認した。これは、高噴射圧ほど噴霧への空気導入量が多いことから、空気との混合促進によるものと考えられる。

最後に、燃料噴射圧変更による排出 PM 粒子数を評価した。高噴射圧ほど PM 粒子数が少なく、燃料噴射圧 20MPa から 80MPa による低減割合は 94%と、高噴射圧化による PM 低減効果は大きい。本研究の最初に評価したテストサイクル走行における PM 排出を試算すると従来比 71% 減となり、燃料の高噴射圧化は大幅に PM を低減するポテンシャルを持つことを確認した。

以上、直接噴射式ガソリンエンジンにおける PM 低減には、燃料の高噴射圧化は有益な手法であることを、エンジン燃焼室内の現象解析と PM 生成要因解析により示した。