

# 透過型電子顕微鏡を用いたディーゼル噴霧火炎内すす粒子生成・酸化過程の研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2018-11-16 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 近藤, 克文 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10291/19698">http://hdl.handle.net/10291/19698</a>

2017年2月2日

## 「博士学位請求論文」審査報告書

審査委員 (主査) 理工学部 専任准教授

氏名 相澤 哲哉 (印)

(副査) 理工学部 専任教授

氏名 中別府 修 (印)

(副査) 理工学部 専任准教授

氏名 榊原 潤 (印)

(副査) 東京工業大学 名誉教授

氏名 神本 武征 (印)

1 論文提出者 近藤 克文

2 論文題名 透過型電子顕微鏡を用いたディーゼル噴霧火炎内すす粒子生成・酸化過程の研究

(英文題) A Study on Soot Formation and Oxidation Processes

in a Diesel Spray Flame via Transmission Electron Microscopy

3 論文の構成

本論文は、以下の5章から構成される。

第1章 序論

第2章 火炎内すす粒子の直接サンプリング

第3章 電子顕微鏡によるすす粒子性状観察及び解析

第4章 火炎内すす粒子性状の調査

第5章 結論

4 論文の概要

自動車の電動化が脚光を浴びているが、インフラ整備や発電用エネルギー源の問題等により、

電気自動車の本格普及には時間を要し、30年後も自動車用動力源は内燃機関が主力(70%程度)と予測されている。一方、途上国等における急激な自動車保有台数の増加とそれに伴う国境を越えた大気汚染(PM<sub>2.5</sub>等)、地球温暖化の問題は深刻化している。これらの問題の解決には、内燃機関の環境性能を極限まで向上させ、グローバルに普及させる必要がある。ディーゼル機関は内燃機関の中で最も燃費(低CO<sub>2</sub>排出)に優れ、大型車のみならず欧州では乗用車の主力であり、上述の様々な問題を解決できる現実的で有望な技術の一つである。

第1章「序論」で詳述しているように、ディーゼル機関が直面する重要な技術的課題の一つとして、排気微粒子(PM)および窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)の更なる排出抑制と燃費向上の両立が挙げられる。排気微粒子の主成分であるすす粒子のディーゼル噴霧火炎内およびディーゼル機関筒内における生成および酸化消滅過程の詳細な理解は、ディーゼル機関の環境性能向上に際して極めて重要であるにも関わらず、非常に複雑な現象であるために未だ完全な現象解明に至っていない。現状での理解に基づくディーゼル機関筒内におけるすす粒子生成・酸化消滅過程の3次元数値解析は複数報告されている。しかしながら、解析結果の検証に不可欠なディーゼル火炎内の化学反応(すす前駆体生成反応やすす酸化反応等)や、すす粒子性状(すす粒子の数密度や粒径、形状等)に関する実験データは決定的に不足している。このような状況を克服するための取り組みとして、Engine Combustion Network (ECN)と呼ばれる世界的共同研究の枠組みのもと、高精度の共通実験条件下でディーゼル噴霧火炎の実験データベース構築および3次元数値解析の検証が進められている。しかし依然として、定量的なすす粒子性状実験データの取得は容易ではなく、現象理解およびモデル検証の課題となっている。以上の背景を踏まえて本論文では、ディーゼル機関筒内並の温度圧力条件下での非定常単発ディーゼル噴霧火炎内からすす粒子を採取する方法、粒子性状を定量評価する方法を確立し、これらの手法を様々な火炎内位置および条件に適用することで、ディーゼル機関筒内でのすす粒子生成・酸化消滅過程の現象解明および3次元数値解析結果検証への筋道を示すことを目的としている。

第2章「火炎内すす粒子の直接サンプリング」では、世界的に見ても例の少ないディーゼル火炎中から直接すす粒子を採取する方法およびその過程について検討している。プローブ先端部に保持した電子顕微鏡用グリッドを火炎に直接暴露し、火炎〜グリッド間の温度差に起因する熱泳動効果によりグリッド表面にすす粒子を採取する方法について説明すると共に、プローブの侵襲による火炎構造への影響、単発ディーゼル噴霧火炎のショット毎のばらつきの影響等について検討している。また、火炎内すす採取プロセス中の火炎温度およびグリッド温度を計測し、グリッド近傍の温度境界層厚さおよび熱泳動速度を試算することで、火炎中からグリッド表面へのすす粒子輸送プロセスの時空間スケールを調査している。さらに、上述の検討から、粒子性状にできる限り影響を与えずに火炎内すす粒子を直接採取する方法を提案している。

第3章「電子顕微鏡によるすす粒子性状観察及び解析」では、第2章で詳述した手法により採取したディーゼル噴霧火炎内すす粒子を、透過型電子顕微鏡で観察および定量解析する方法について検討している。粒子性状の定量解析結果に影響を与え得る重要な項目として、透過型電子顕微鏡によるすす粒子の観察および撮影方法、粒子性状の解析理論、撮影された画像の解析方法、グリッド上の位置によるすす粒子性状のばらつき、定量解析結果の収束に必要な粒子数、要素すす粒径等の手動解析結果に与える解析者個人差の影響、凝集体内要素すす粒子の判別基準などについて詳述し、信頼性のある粒子性状データの定量化方法を提案している。

第4章「火炎内すす粒子性状の調査」では、第2章および第3章でそれぞれ検討した火炎内すす粒子の採取および解析手法を、定容燃焼容器中の単発ディーゼル噴霧火炎に適用し、これまで困難であったディーゼル噴霧火炎内すす粒子性状の定量データの取得を実現すると共に、様々な条件がすす粒子性状に与える影響を検討している。第一に、ディーゼル火炎中の異なる噴霧軸上の位置によるすす粒子性状の変化から、火炎内におけるすす粒子の生成、成長、酸化消滅過程に関する新たな知見を示している。第二に、筒内現象の中でも特にすす粒子生成・酸化消滅過程に与える影響が大きいと考えられる噴霧火炎の壁面衝突現象を定容燃焼器内で模擬し、ここで採取したすす粒子の性状を定量評価することで、壁面衝突の影響を検討している。第三に、ディーゼル噴霧火炎内すす生成・酸化消滅過程の現象理解をさらに深める取り組みとして、高速度シャッター付きサンプラーを用いた時空間分解すすサンプリング、要素すす粒子内部の微細結晶構造の解析を試みている。最後に、すす粒子性状の定量データからディーゼル噴霧火炎内すす生成・酸化消滅過程の数値解析結果を検証する方法を提案している。

第5章「結論」では、本研究で得られた主な成果および結論をまとめると共に、ディーゼル噴霧火炎内すす生成・酸化消滅過程に関する更なる現象理解と現行の数値解析モデルの改良及び予測精度向上、様々な実験条件における噴霧火炎内局所温度、化学種濃度、粒子性状のデータベース構築、火炎内すす粒子の時空間分解サンプリングの応用、他研究機関との協力・分担によるエンジン筒内への本手法の適用など、今後の展望について述べている。

## 5 論文の特質

高温高圧雰囲気中の乱流拡散燃焼場であるディーゼル噴霧火炎内におけるすす粒子性状の計測は、それ自体が技術的に極めて難しい研究課題である。本研究課題に対する従来までの取り組みとしては、弾性散乱法およびレーザー誘起赤熱法の組み合わせ(Tree et al., SAE 940270 (1994), Kosaka et al., SAE 952451 (1995)), あるいは時間分解レーザー誘起赤熱法(Kock et al., Combust.& Flame (2006))などによる in-situ レーザー計測の例が数例報告されているが、いずれも限られた実験条件での定性計測に留まっている。定量計測の手法としては、熱泳動効果等によりグリッド表面へ採取および反応凍結されたすす粒子の透過型電子顕微鏡による解析が挙げられるが、従来研究のほとんどは排気中のすす粒子を対象としており(例えば Lee et al., Proc. Combust. Inst. (2002)), ディーゼル噴霧火炎内すす粒子の性状計測の例は極めて少ない。Kookらは、電子顕微鏡用グリッドの火炎への直接暴露によるディーゼル噴霧火炎内すす粒子の採取と電子顕微鏡観察に初めて成功(Kook and Pickett, Proc. Combust. Inst. (2011))しているが、熱泳動効果による火炎内すす粒子のサンプル過程が未解明であったことおよび粒子性状の解析結果を収束させる方法が確立されていなかったことにより、粒子性状については定性的な議論に留まっていた。本論文では、これらの困難な技術的課題に果敢に取り組み、定量計測の手法を確立しており、当該分野では世界的に見ても最先端の内容であると言える。

## 6 論文の評価

本研究では、世界的に見ても例の少ないディーゼル火炎中から直接すす粒子を採取する技術を

開発し、この方法により採取したディーゼル火炎中のすす粒子を電子顕微鏡解析し、複雑な構造を持つすす凝集体の性状を定量化する方法を世界に先駆けて確立している。また、得られた解析結果から、ディーゼル火炎中におけるすす粒子生成・消滅過程に関する新たな知見を示し、これまで困難であった数値解析結果の検証の方法を提案している。これらの研究成果は国内外の学会、特に当該分野で最も権威のある国際会議である SAE(Society of Automotive Engineers)他で発表され、高く評価されている。また上述した世界的共同研究の枠組みである Engine Combustion Network (ECN)においても、高精度の共通実験条件下でディーゼル噴霧火炎内から直接採取したすす粒子を本研究で確立した方法により解析した粒子性状データが共有され(Skeen et al., SAE Intl. J. Engines (2016)), 火炎内すす粒子の光学計測結果の考察や数値解析結果の検証等に広く活用されている。以上の内容は、本研究の学術的な価値の高さを示している。

一方、本研究で確立した方法に基づく火炎内、エンジン筒内、排気中から採取したすす粒子の性状解析は、国内外の複数の自動車メーカー及び石油会社からの個別委託研究、国内自動車メーカー9社及び2研究機関で構成される自動車用内燃機関技術研究組合(AICE)からの委託研究、内閣府主導の府省横断型国家プロジェクトである戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的燃焼技術」での研究においても実施され、これらの解析結果は実際のエンジンシステム開発に役立つ数多くの有用な知見を提供してきている。以上の内容は、内燃機関の関連産業分野における本研究の工学的・実用的な価値の高さを示している。

以上に述べた学術的及び工学的な双方の観点から、本論文はディーゼル機関の環境性能向上、ひいては環境およびエネルギー問題の解決に資する優れた論文であると評価できる。

## 7 論文の判定

本学位請求論文は、理工学研究科において必要な研究指導を受けたうえ提出されたものであり、本学学位規程の手続きに従い、審査委員全員による所定の審査及び最終試験に合格したので、博士(工学)の学位を授与するに値するものと判定する。

以 上