

# 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>

# 2016年度 理工学研究科

## 博士学位請求論文（要旨）

### 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

A Study on Soot Formation and Oxidation Processes  
in a Diesel Spray Flame via Transmission Electron Microscopy

学位請求者 機械工学専攻  
近藤 克文

#### 内容の要旨

##### 1. 本研究の問題意識と目的

人類はこれまでに輝かしい科学技術の発展や経済成長を成し遂げてきたが、一方で、地球温暖化や大気汚染、化石燃料の枯渇等の様々な問題に直面している。こうした背景から低 CO<sub>2</sub> 社会の構築、再生可能エネルギーへの転換に関する取り組みが世界各国で推進されてきている。自動車産業においても例外ではなく、ハイブリッド車や電気自動車、燃料電池車等の次世代自動車が注目を集めている。しかしながら、これらの普及には、技術革新や低価格化のみならず、インフラ整備も必要となるため容易ではなく、今から 30 年後の将来においても自動車用動力源は内燃機関がその 8 割を占め、主力であり続けると予測されている。こうした中で上述の問題の解決には、既存の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も特に熱効率（低 CO<sub>2</sub> 排出）に優れ、バス、トラック等の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有望技術の一つである。しかしながらディーゼル機関は、そのエネルギー変換過程において、燃料となる軽油を高圧噴射し噴霧拡散燃焼させるため、燃焼室内の局所当量比の分布が広範囲であり、これにより生成される、人体に有害な窒素酸化物（以下 NO<sub>x</sub>）や粒子状物質（Particulate Matter, 以下 PM）の排出が問題視されてきた。NO<sub>x</sub> 生成メカニズムについてはある程度の理解が進み、EGR（排気再循環）等を採用し、筒内酸素濃度及び燃焼温度を下げることでそ

の排出量を低減することが可能である。一方、PM についてはその主成分であるすす粒子のエンジン筒内での生成・酸化過程が極めて複雑な現象であり、未だ完全な現象解明及び解決に至っていないため、複雑化するエンジンシステムの開発・設計に不可欠なすす生成・酸化予測モデルの開発が急務とされている。

上述のモデルの開発には、筒内での物理現象をできるだけ詳細に考慮した 3 次元数値解析を行い、重要な過程のみを現象論的モデルとして抽出する必要がある。ディーゼル機関筒内のすす粒子生成・消滅過程の詳細な 3 次元数値解析は複数報告されているが、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が決定的に不足している。光学エンジン内のレーザー計測等により火炎内化学種濃度や火炎内微粒子の性状を調査した例はあるが、限られた実験条件下での定性計測に留まっており、最新のディーゼル機関相当の雰囲気及び燃料噴射条件下での定量計測は極めて少ない。そのため近年、Engine Combustion Network (以下 ECN) と呼ばれる世界的共同研究の枠組みが確立され、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及び 3 次元数値解析の検証が進められている。ECN では、特にディーゼル燃焼場での複雑な流れ及びすす生成と関連の深い化学種を可視化計測により詳細に調査しているが、定量的なすす粒子性状については取得が容易ではなく、現象理解及びモデル検証への課題となっている。この定量的なすす粒子性状を取得する試みとして、透過型電子顕微鏡（以下 TEM）による解析が挙げられるが、その適用例の多く

は排気管中やバーナー火炎中のすす粒子を対象としているため、ディーゼル噴霧火炎内のすす粒子生成・酸化過程の詳細な理解には至っていない。ディーゼル火炎内すす粒子の性状に関する先駆的な研究として、Kook らは、定容燃焼器内で模擬したディーゼル燃焼場で初めて火炎内すす粒子の捕集に成功したが、捕集メカニズムとしている熱泳動現象が未解明であり、また、大小様々な粒子が混在する多分散な粒子性状の解析結果を収束させる方法を確立できていないため、定性的な議論に留まっている。

本研究では、上述の従来研究で明らかになっていないディーゼル燃焼場でのすす粒子性状に着目し、実機筒内並の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捕集する方法及び、その捕集粒子性状を定量評価する方法を確立することを目的とする。さらに、ここで確立された手法を実際に様々な火炎内位置及び条件に適用し、実機エンジン筒内でのすす粒子生成・酸化過程の現象解明及び3次元数値解析結果検証への筋道を示すことが本研究の役割である。

## 2. 本研究の構成ならびに各章の要約

本論文は、全5章から構成されており、以下に各章の概要を記す。

第1章では、本研究の背景を述べており、電気自動車等の次世代自動車用動力源が注目される現代においての、内燃機関、とりわけディーゼル機関の技術向上の必要性を説くと共に、当該技術が直面している有害微粒子排出という課題について説明する。また、有害微粒子の主成分であるすす粒子の生成・酸化過程の現段階での理解と現象解明に対する最先端計測の動向を述べ、現行の研究では理解が不十分な点を明確化し、本研究の“ディーゼル燃焼場でのすす粒子性状の定量評価”の必要性を説明する。さらに、“ディーゼル噴霧火炎内すす粒子生成・酸化過程の理解”という本目的に対し、本論文で取り組むべき点を明確化し、それぞれの目的に対する検討内容を記す。

第2章では、ディーゼル噴霧火炎中から直接すす粒子を捕集する方法及びその過程について検討している。本研究で提案している、“すすサンプラー”によるすす粒子の捕集方法について説明し、捕集過程において検討すべき、サンプラー侵襲による火炎構造の変化、単発ディーゼル噴霧火炎のショット毎のばらつきについて詳述している。また、熱泳動効果によると考えられている本手法

の捕集メカニズムを明らかにするため、火炎温度及びTEMグリッドの温度を計測し、すす粒子捕集期間中のTEMグリッド近傍の温度境界層厚さ及び熱泳動速度を試算することで、粒子輸送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、火炎内すす粒子性状をできる限り保つことができかつロバストな捕集方法を提案している。

第3章では、第2章で詳述した手法により捕集されたすす粒子をTEMによって観察解析する過程について検討している。具体的には、TEMによるすす粒子の観察・撮影方法、粒子性状の解析理論及び撮影された画像の解析方法について説明している。さらに、すす粒子のTEM観察及び解析過程において検討すべき、TEMグリッド上の位置によるすす粒子性状のばらつき、解析に必要な粒子数、解析者個人差について詳述し、信頼性のある定量データ算出方法を提案している。

第4章では、前章までで検討してきた手法をディーゼル噴霧火炎に適用し、従来の方法で得られなかった火炎中の定量的なすす粒子性状を取得し、筒内すす粒子生成・酸化過程の知見を深める。まず、定容燃焼器内で模擬した単発ディーゼル噴霧火炎の異なる噴霧軸上の位置からすす粒子を捕集、TEM観察・解析し、得られた定量データから自由噴霧火炎内におけるすす粒子生成・酸化過程の新たな理解を示している。また、筒内現象の中でも特にすす粒子生成・酸化過程に影響を与える噴霧火炎の壁面衝突現象を、定容燃焼器内で模擬し、すす粒子性状を定量評価することでその影響を検討している。さらに、本研究で確立した手法を応用し、筒内すす生成・酸化過程のさらなる現象理解を深める取り組みとして、時間分解サンプリング及びすす粒子の微細構造観察を試みている。最後に、本手法で得られたすす粒子性状の定量データから数値解析結果を検証する方法を提案している。

第5章では、本研究で得られた主な成果及び結論をまとめると共に、今後の展望について述べている。

以上、本論文は、透過型電子顕微鏡によるディーゼル噴霧火炎内すす粒子生成・酸化過程の研究結果をまとめたものである。

本研究で提案した侵襲式すすサンプラーを用いた熱泳動捕集及びTEM解析によって、ディーゼル噴霧火炎内すす粒子の定量的なすす粒子性状を取得することが可能となり、筒内すす生成・酸化過程の現象解明及び数値解析結果検証への見通しを得たと結論づけている。