

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

Diesel Particulate Filter内アッシュ堆積層形成過程の
モデリングと圧損予測精度の向上

Modeling on Ash Layer Formation to Improve Pressure Drop
Prediction in a Diesel Particulate Filter

申請者

宮原 哲順

Akikazu MIYAHARA

総合機械工学専攻 熱エネルギー反応工学研究

2022年2月

(1) 審査経緯

当該博士論文審査は、以下の通り実施された。

- 2021年11月19日 予備審査会
- 2021年12月2日 教室受理決定
- 2021年12月16日 創造理工学研究科運営委員会受理決定
- 2022年1月10日 博士論文審査 第1回目
- 2022年1月13日 公聴会
- 2022年1月25日 博士論文審査 第2回目
- 2022年1月27日 博士論文審査 第3回目
- 2022年2月8日 審査分科会
- 2022年2月25日 創造理工学研究科運営委員会合否判定

(2) 論文の背景、内容および評価

運輸物流部門におけるカーボンニュートラル化、ゼロエミッション化が注目されている。本研究では、モーター＋バッテリーシステムで代替することができない高耐久性及び長時間にわたる高出力の持続、が求められる商用車、建設機械、さらには定置式発電システムの動力源として用いられるディーゼルエンジンのゼロエミッション化に必要な微粒子捕集フィルタ (Particulate Filter, PF) 内のアッシュ堆積を研究対象としている。PF にスートが堆積すると排気流れ中の PF 前後の差圧は上昇する。実機では、これをセンシングすることで堆積スートの量を推定しており、スート堆積量が定められた閾値に達したものと ECU (Engine Control Unit) が判断すると、排気に燃料を添加し酸化触媒で燃焼させ排気ガスを昇温させる。そして、この高温の排気ガスにより PF に堆積したスートを酸化・燃焼させ CO₂ として除去する強制再生が行われる。大型商用車の場合、実路走行においては1日に 1 回程度の頻度で強制再生が行われている。

強制再生中は排気中の酸素密度を制御することで、PF に堆積したスートの酸化・燃焼の表面反応速度を低下させているものの、スート堆積量が多いと、PF の温度上昇が大きくなり、コーゼライトまたはシリコンカーバイド製の担体が溶損する。その一方で、溶損を恐れるがあまり、スート堆積量の少ないうちに強制再生を行うと、燃料添加の頻度が増え燃費が悪化する。このため、PF 内の堆積スート量を正確に把握し、適切なタイミングで強制再生を行うことが求められる。

本研究で対象としているアッシュは、そのほとんどがエンジンオイル中の金属系添加剤に由来する。主にピストンリング周りから燃焼室へ飛散したエンジンオイルの油滴が2000K を超える温度で燃焼し、その後、膨張・排気行程で冷却されると 1 次粒子を形成し、燃焼生成物質であるスート粒子に混じり PF に堆積する。その後、然るべきタイミングで強制再生が起こると、PF 担体の最高温度はせいぜい1300K 程度なので、アッシュは PF に残存し、スート燃焼の影響を受け粒子成長や流路内移動を伴いながらチャンネル壁面上に長手方向に厚みの分布を持ちながらウォールアッシュが堆積される。また、強制再生の回数が増えるにつれ、目封じされたチャンネル末端へ付着するプラグアッシュの厚みも増加する。堆積されたアッシュは PF の圧損を増大させるので、圧損から推定される堆積スート量は見かけ上、増大したかのように検知されることになる。実際のアッシュ堆積層は数万キロの走行を経て形成されるため、これを実験により把握することが困難であることも PF の開発を難しくしている一因である。

そこで本研究では、先行研究の課題や示唆されている点を踏まえて、DPF (Diesel Particulate Filter)へ堆積したスートの酸化・燃焼が、堆積アッシュの粒子径、空隙率に与える影響を解析し、これらを用いて DPF 流路表面に堆積したアッシュが強制再生の度に剥離しチャンネル後端へ付着する移動現象をモデル化した。そして、実機運転状態のアッシュ堆積層の長手方向における厚み分布、プラグアッシュ厚み及びフィルタ前後の圧力損失(圧損)を予測し、触媒設計及びエンジン制御に活用可能な数値モデルを構築したことに本研究の意義がある。

まず、エンジンオイルに含有されるアッシュの主要成分量の異なる4つのサンプルを用い、DPG (Diesel Particulate Generator)でアッシュを生成し、DPF へアッシュを堆積させた。そして、DPFを長手方向に多数のピースに切断し、ウォールアッシュ及びプラグアッシュの堆積分布、堆積層の透過率、気孔率、かさ密度、アッシュ粒子真密度、堆積層を構成する一次粒子の空隙率を詳細に分析した。また FE-SEM 観察から、アッシュの2次粒子の粒径分布を計測した。次に流通式のスート燃焼・アッシュ層形成装置を新たに開発し、燃焼後のアッシュ層の解析を実施した。そして、これらの結果よりスート/アッシュ(以後、S/A)比とアッシュ1次粒子径からアッシュ2次粒子径及びアッシュ層空隙率を推算する手法を提案している。この推算手法とアッシュ成分の割合から推定されるアッシュ真密度を用い、アッシュ層の透過率とかさ密度を求めS/A比の違いがアッシュ堆積層の構造に与える影響を解析した。その結果、S/A比が大きいくスートの燃焼温度がより高温化している方がウォールアッシュの2次粒子径は小さくなり、かつ2次粒子内の空隙が減少すること、及び粒子径が小さいほどウォールアッシュ層の空隙率が増加することを見出している。

次に、これまでの研究で示されている、気流によるせん断応力がアッシュ堆積層に作用し堆積層からアッシュが剥離する、という考え方を見直し DPF 流路内のアッシュの剥離の有無を判定する手法を提案している。これは、アッシュ堆積層表層に凝集粒子塊があると仮定し、これが気流からのせん断力に起因する曲げモーメントを受け、発生した曲げ応力により、層界面から剥離し、チャンネル後端に付着するという考え方である。その結果、粒子径・空隙率が大きいウォールアッシュほど、堆積アッシュ表層の凝集粒子塊が剥離する臨界せん断応力の値が低く、剥離し易い特性があることを示すとともに、Rumpfの式に基づく臨界せん断応力のモデル化を行った。さらに、DPF圧損推定において、運転条件で決定されるS/A比に応じて変化するアッシュ堆積層の物性値と、アッシュの剥離を判定する臨界せん断応力を考慮させることで、エンジンの運転状態に応じてPF内に形成されるアッシュ堆積層の性状・堆積形態、さらには、DPF前後の圧力損失を数値的に予測可能な手法を提案している。その結果、低S/A比条件においては、粒子面粗さと、再堆積プラグアッシュのかさ密度を実験結果に基づいた入力条件として与えることで、プラグアッシュ厚さやウォールアッシュ堆積層の厚み分布の実験結果を数値計算にて再現することを可能としている。また、堆積、強制再生を繰り返すサイクルでは、アッシュが堆積したDPFの圧力損失を概ね $\pm 20\%$ 程度の精度で予測することを可能とした。さらに、高S/A比条件に対しウォールアッシュ層の臨界せん断応力が過少に評価されること考慮し、アッシュ移動の抑制効果をモデル定数の増大分として組み込むことで、高S/A条件においても実験で得られたアッシュの堆積予測分布を合理的に説明できることを示している。

本論文の最終章では、容積一定のもと長さを2倍または半分と変更したDPFを対象に、数値計算を行い、アッシュの堆積形態を予測している。その結果、スート堆積量が少ない条件でエンジンが稼働した場合は、DPFの容積はベースラインから変更せず、長手方向長さを短く、か

つ、大径化する方がスート堆積時の圧損を低く抑えることができることを示した。また、長手方向のサイズを長くし小径化すると、スート堆積時の圧損が高くなることを説明している。つまり、本研究で構築した数値モデルは、DPF 基材の設計や強制再生に関わるエンジン制御に活用できることを示したと言える。

以上を要するに本論文は、構築した数値モデルにより、長期的なアッシュ堆積形態や DPF 前後の圧損を予測可能とし、これまで非常に長い試験時間を要したアッシュ堆積の実験・解析を数値シミュレーションで代用できる可能性を示しただけではなく、触媒設計やエンジン制御にも活用可能であることを示したものである。また、論文では工学的に有用な数多くの知見が示されており、上記を総合的に鑑み、博士(工学)の学位論文として認めることとした。

2022年 2月

審 査 員

(主査) 早稲田大学 教授 博士(工学) 早稲田大学 草 鹿 仁

(副査) 早稲田大学 教授 博士(工学) 早稲田大学 中 垣 隆 雄

(副査) 早稲田大学 教授 博士(理学) 東京工業大学 滝 沢 研 二

(副査) 早稲田大学 准教授 博士(工学) 名古屋大学 松 田 佑

(副査) 早稲田大学 客員教授 工学博士 武蔵工業大学 福間 隆雄