

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文概要

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

2021年12月

大気汚染のクリーン化という社会的要請に応えるために、内燃機関の排出ガス浄化技術は目覚ましい発展を遂げ、かつ、CO₂排出低減への関心の高まりから低燃費技術も大幅に進歩してきたが、近年の異常気象や災害の増加により、脱炭素社会の早期実現は社会全体の共通目標となっており、内燃機関はカーボンニュートラル化、ゼロエミッション化の実現が急務となっている。

本研究では高い耐久性が求められる商用車用、建設機械さらには定置式などのディーゼルエンジンのゼロエミッション化において重要な役割を担うと考えられる、排出ガス後処理装置の1つである微粒子捕集フィルタ (Particulate Filter) に着目し、その技術課題であるアッシュ堆積を研究対象とした。アッシュはほとんどがエンジンオイル中の金属系添加剤に由来し、主にピストンリング周りから燃焼室へ放出されたアッシュ分を含む油滴の燃焼によるもの、と考えられている。油滴の燃焼に伴い気相化合物へ変換されたアッシュは、排気工程における希釈・冷却により1次粒子を形成し、同時に排出されるスート粒子に凝集・付着した形でPFへ流入・堆積する。PFは前後差圧をセンシングすることで堆積スートの量を検知している場合が多く、スート堆積量が増加すると、PFの温度を上げてスートを酸化除去する、強制再生と呼称される運転が実施される。このときアッシュは残存し、スート酸化の影響を受けて粒成長や流路内の移動を伴いながら、エンジン稼働時間の経過とともに不可逆的に蓄積され、PFの圧損特性を変化させる。このため、アッシュの堆積量が増加するとPFに堆積したスートの量を正確に見積もることが難しくなる。アッシュ堆積層の形成は、実際には数万キロの走行距離を経て生じるため、実験により把握することが困難である。従って、精度よく予測するモデルが求められている。

流路内のアッシュ移動現象は、Sappokらが構築したアッシュ層に作用するせん断応力に基づくモデルが存在するが、アッシュと気流間に作用するせん断応力の臨界値はフィッティングパラメータであり、この臨界値のモデル化が課題であった。またWallアッシュの堆積層形成には、再生時の堆積スート量の影響が示唆されている。

そこで本研究では、先行研究で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消失が、圧損因子である堆積アッシュの粒子径、空隙率に与える影響をモデル化し、さらにDPF流路内のアッシュ移動現象をモデル化することで、実機運転状態に応じたDPF流路内アッシュ堆積層の厚み分布と、DPF全体の圧力損失を予測することを目的とした。

本論文は、以下に示す全5章より構成される。

第1章では、序論として研究背景と先行研究について示し、研究目的を明確化する。研究背景では、内燃機関からの排出ガス後処理技術の重要性とその技術課題を示したうえで、本研究で取り組むDPFへのアッシュ堆積研究の重要性を明確

化した。また、先行研究における課題点を指摘したうえで、これらを解明する現象解析とそれに基づくモデリングを研究目的と位置付けた。

第 2 章では、DPF の圧力損失を予測するうえで重要となる DPF 流路内堆積アッシュの物性解析とモデル化を実施した。まず実験により運転状態、特に新規に堆積したアッシュ量に対するスート量の比 (S/A 比) と、Wall アッシュの粒子径・空隙率との関係を解析した。具体的には、DPG (Diesel Particulate Generator) で生成し DPF へ堆積させたアッシュの物性調査と、新たに構築した流通場でのスート燃焼・アッシュ層形成装置を用いたアッシュ層形成の調査を行なった。次にこれらの結果を基に、S/A 比と 20 nm と仮定したアッシュ 1 次粒子径からアッシュ 2 次粒子径を求める 2 次粒子モデルと、アッシュ層の空隙率を求める空隙率モデルを構築した。これとアッシュの成分割合より推算できるアッシュの真密度から、アッシュ層の透過率とかさ密度を求めることを可能とした。その結果、S/A 比が大きいほど Wall 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、また S/A 比が大きいほど Wall アッシュ層の空隙率が増加すること、さらに粒子径が小さいほど Wall アッシュ層の空隙率が増加することを見出した。次にこれらの結果をもとに、Wall アッシュ層の 2 次粒子径モデルは、フラクタル次元を用いてモデル化することで、S/A 比で変化する 2 次粒子物性を予測できるモデルとして構築した。さらに、Roller の式をベースに、S/A 比で変化する同層の空隙率を予測できるモデルも構築した。

第 3 章では、前述の先行研究で構築されている、アッシュ堆積層に作用するせん断応力に基づくモデルをベースとして、DPF 流路内のアッシュ移動のモデル化を実施した。このため、アッシュ堆積層表層の凝集粒子塊がせん断剥離 (再飛散) するメカニズムを検討し、その再飛散のされにくさをモデル化して、粒子径・空隙率が大きい Wall アッシュほど堆積層表層の凝集粒子塊の臨界せん断応力が低くせん断されやすい特性を示す、Rumpf の式に基づく臨界せん断応力モデルを構築した。

第 4 章では、DPF 圧損モデルに、第 2 章で構築した運転条件 (S/A 比) に応じて変化するアッシュ堆積層の 2 次粒子径とアッシュ層空隙率を計算するモデルを含むアッシュ堆積層モデルと、第 3 章で構築したアッシュ堆積層の性状からアッシュの移動のしやすさを計算する臨界せん断応力モデルを連成させることで、DPF の運転状態に応じて形成されるアッシュ堆積層の性状・堆積形態と、それを反映させた DPF 全体の圧力損失を予測できるモデルを構築した。その結果、まず低 S/A 比条件においては、粒子面粗さと、再堆積 Plug アッシュのかさ密度を実験結果に基づいて与えることで、Plug アッシュ長さやアッシュ堆積厚み分布が DPG での実験結果を再現することが示された。また、サイクル中を含めて、アッシュ堆積 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。次にモデルの適用範囲をより高 S/A 比条件へ拡張した場合、低 S/A 比条件で用いたモ

デル定数では、定性的な傾向は得られるものの、本条件での Plug アッシュ長さやアッシュ堆積厚み分布の計算予測精度には改善の余地があることが懸念された。これは高 S/A 比条件に対して Wall アッシュ層の臨界せん断応力が過少に評価されたためと考えられたので、アッシュ移動の抑制効果を比例定数の増大として組み込むこととした。その結果、この比例定数を同定することにより、アッシュ堆積分布の予実差が縮小して、アッシュ圧損の推定精度が向上し、実験結果とほぼ同等の圧損推定が可能であることが示された。最後に構築した一連のモデルを活用した DPF サイズ最適化の検討として、容積一定のまま DPF の長さを倍/半分と変えた条件で、それぞれ前述の DPG 運転を模擬した計算を行い、DPF サイズが異なる場合のアッシュ堆積影響の予測・評価を実施した。その結果、スート堆積量が少ない条件での稼働がメインと想定されるのであれば、容積は変えず、長さを短くして直径を大きくした DPF の方が、スート堆積時圧損が僅かに低くなることが分かった。逆に長さを長くして直径を小さくすると、スート堆積時圧損が高くなることも分かった。以上で示したように、本研究で構築した予測モデルにより、基材のジオメトリや運転条件など制御可能なパラメータの変更影響確認を実施できることが示された。

第 5 章では、各章で得られた成果を総括し、今後の研究の展望について述べた。

以上、第 2 章から第 4 章にかけて構築・検証してきた一連のモデルを用いることで、DPF の運転条件に依存する強制再生時のスート堆積量と、堆積スートとアッシュ量の比である S/A 比が既知であれば、長期的なアッシュ堆積形態や圧損影響を広く予測でき、実機試験では非常に長い試験時間を要するアッシュ堆積の圧損影響確認を、シミュレーションにより短時間で実施することを可能とした。さらに、基材のジオメトリや運転条件など制御可能なパラメータの変更の影響が、現実的な設計リードタイムで予測することを可能とした。アッシュ堆積は時間スケールが非常に長く、実機試験が現実的でないため、このような現象を扱う際のモデルベース開発の有用性を示した。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 宮原 哲順

印

(2021年 12月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
投稿論文 (査読付き)	<p>○宮原 哲順, 福間 隆雄, 草鹿 仁, 松野 真由美, 北村 高明, “Diesel Particulate Filter 流路内のアッシュ移動モデルの構築 –アッシュの粒子径, 空隙率, 透過率が移動に及ぼす影響–”自動車技術会論文集, Vol.52, No.1, pp.1924-2021, 2020年 11月</p> <p>○宮原 哲順, 福間 隆雄, 草鹿 仁, 松野 真由美, 北村 高明, “堆積スートの酸化がDiesel Particulate Filter 流路内Wallアッシュの粒子径と空隙率へ及ぼす影響”自動車技術会論文集, Vol.52, No.4, pp.851-856, 2021年 7月</p>
学会口頭 発表・講演	<p>○宮原 哲順, 福間 隆雄, 草鹿 仁, 松野 真由美, 北村 高明, “Diesel Particulate Filter 流路内のアッシュ移動モデルの構築 –アッシュの粒子径, 空隙率, 透過率が移動に及ぼす影響–”2020年自動車技術会秋季大会 2020年10月</p> <p>○宮原 哲順, 福間 隆雄, 草鹿 仁, 松野 真由美, 北村 高明, “堆積スートの酸化がDiesel Particulate Filter 流路内Wallアッシュの粒子径と空隙率へ及ぼす影響”2021年自動車技術会春季大会 2021年5月</p>