

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04325

研究課題名(和文)ディーゼル微粒子フィルターへのPM堆積と低温酸化(マイクロ-マクロ)の研究

研究課題名(英文)PM deposited and low temperature oxidation

研究代表者

中村 真季(Nakamura, Maki)

名古屋大学・工学研究科・特任講師

研究者番号：70708510

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：微粒子フィルターの内部の解明を行った。粒子状物質(PM)がディーゼル微粒子フィルター(DPF)壁面に一様に堆積した後のDPFの流入部でのガス流速分布の計算を市販ソフトを利用して行なった結果を1次元シミュレーションに取り入れた。さらにPM燃焼過程においては、PM酸化触媒(CeO₂)作用によるPM燃焼の詳細な実験結果を考慮した再生現象のモデル化を実施した。昨今ガソリンエンジンから排出されるPMの排出規制も鑑みてガソリン微粒子フィルター(GPF)に流入する排ガスの条件が複雑に変動した場合のPM堆積酸化挙動を研究し、触媒性能評価および触媒活性依存を示唆した。その結果からPM燃焼に最適な条件を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大気汚染や地球温暖化の要因となる排ガス浄化処理の一部として、排ガス中に含まれる粒子状物質(PM, 主成分が炭素)の排出を抑制するフィルターの研究を行った。ディーゼル/ガソリン微粒子フィルター(DPF/GPF)が複雑であることから、実験においてその内部現象を明らかにすることは容易ではない。そのためDPF/GPFの内部現象を本研究で構築した簡易モデルを用いて解析した。今後実験結果と計算結果の比較検証は必要となるものの、部分的な実験結果をモデルに導入し整合性を検証できつつあることから、DPF/GPFの内部現象を示しつつある。これらの成果は触媒の検討を含むDPF/GPFの設計・構築へ貢献できる。

研究成果の概要(英文)：The inside of the particulate filter was elucidated. Commercial software calculated the gas velocity distribution at the DPF inlet after uniform particulate matter (PM) deposition on the diesel particulate filter (DPF) wall. The results were incorporated into a one-dimensional simulation. Furthermore, modelling of the PM combustion process was carried out, considering detailed experimental results on the PM combustion regeneration phenomenon by using a PM oxidation catalyst (CeO₂).

Because of recent regulations on PM emissions from gasoline engines, the PM deposition and oxidation behavior under complex and fluctuating exhaust gas conditions entering the gasoline particulate filter (GPF) was investigated to evaluate the catalyst's performance and suggest the catalyst activity's dependency. The results presented the optimum conditions for PM combustion.

研究分野：熱流体工学

キーワード：ディーゼル微粒子フィルター ガソリン微粒子フィルター PM酸化触媒 酸化セリウム 一次元モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ディーゼルエンジンは貨物の運搬等において有効な動力源とされているが、排ガスに含まれる粒子状物質(Particulate Matter: PM)は環境や人体に悪影響を与える(環境省:”日本の温暖効果ガス排出量の算定結果)。さらに2017年9月からはEuro6 d-TEMPと呼ばれる今までより厳しいPMの排出基準が導入され、PMの粒子数の規制値がさらに強化されたため、排ガス処理の適切な対応が非常に重要な課題になっている。PMはディーゼル微粒子フィルター(Diesel Particulate Filter: DPF)によって抑制され、浄化された排ガスのみが自動車から排出される。PMがDPFに堆積し続けるとフィルターの前後の圧力差である圧力損失が増大する現象がみられる。この圧力損失が増大すると、エンジンに負荷をかけるため定期的にPMを除去する必要がある(再生過程)。PM自体を除去するには排ガスの温度を約650℃に昇温する。再生時には燃料を使用し排ガス温度を昇温し燃費の悪化につながっているため、触媒を用いることで排ガスの温度程度(100~500℃)でPM酸化を行う必要がある。さらにDPFのPM燃焼には位置依存があり、DPFの出口付近のPMは燃え切らないといった従来報告がある。そのため、触媒担持位置を工夫しPMを完全に燃焼するための設計が必要であるが、その指針は全くない。そこで、PMが堆積・再生する現象を明らかにし、触媒が特に必要な場所の特定を行い、PMを偏りなく完全燃焼できるような触媒付きDPFの開発研究の着想に至った。さらに、再生過程に必要な燃料低減による燃費の向上は地球環境の維持につながり、触媒担持位置などの構造最適化による触媒使用量の低減は限りある資源の保護につながる。

2. 研究の目的

本研究では、ディーゼルエンジンから排出されるディーゼル微粒子(Particulate matter: PM)の捕集と燃焼の効率を向上させるため、PM燃焼触媒付きのディーゼル微粒子フィルター(Diesel Particulate Filter: DPF)の構造最適化手法を構築し、PM捕集時の圧力損失の低減と再生時の燃焼温度の低温化が同時に可能となるフィルターの実現を目的とする。

反応科学超高压走査透過電子顕微鏡および走査型電子顕微鏡を用いたPMの酸化反応機構の原子レベルの可視化とデジタルマイクロスコープを用いたテストピースを使用した実機レベルの可視化を行い、固体燃料(PM)・固体触媒・気相の三相界面におけるPM酸化反応評価方法の確立を行う。また、PM堆積および燃焼現象のメカニズムを数値計算にて解明しDPF全体のPM堆積燃焼のモデルを構築する。さらに実験結果を用いて上記のモデルを補完し、DPF全体におけるPM堆積と酸化反応のモデル化を行う。以上の研究を通じたDPFの構造最適化により、300℃台の低温排ガスによるPMの触媒酸化を実現し、PM堆積時の圧力損失と再生時の燃料悪化を大幅に低減させる。

3. 研究の方法

上記の研究背景を元にはしたが、研究の目的及び研究の方法を昨今の自動車排ガス処理のニーズに合わせて大幅に変更した。マクロ視野の実験に焦点を当て、実験結果を数値計算に取り組みDPFの壁面内部の堆積と再生の挙動を明らかにした。

4. 研究成果

2020年度は1.堆積と酸化の現象解明中の”触媒の性能評価”を数値計算を用いて行い、2.堆積と酸化のモデル構築を行なった。その結果本研究で用いたDPF内でのPM堆積および酸化の挙動モデルは、多孔質体に対し流体や伝熱の厳密な物理モデルを適用することは難しいため、簡易的なモデルを用いてDPFへのPM堆積・酸化挙動を示した。このモデルはDPFへのPM堆積過程では、PMを含む100℃の排ガスが、入口から流入部を通り、壁を介してPMが補修され、ガスのみが流出部に出て流出部から排出されるモデルである。一方でDPFの再生過程においては、予備計算として、まず市販シミュレーションソフトウェア(COMSOL)を用いて、PMがDPF壁面に一様に堆積した後のDPFの流入部でのガス流速分布の計算を行なった結果を取り入れ、さらにPM燃焼過程においては、触媒作用によるPM燃焼を考慮した再生現象のモデル化をした。PMのモデルを構築後、DPF形状依存性および、触媒によるPM燃焼共同の解析を行った。さらに2021年度に実験準備を行なった。

2021年度は2020年度に構築したモデルの改良を行った。その結果、DPFのみならずガソリンエンジン用のフィルタ、ガソリン微粒子フィルター(GPF)のWLTC運転試験モードを模擬した数値計算を行った。その結果、GPFに流入する排ガスの条件が複雑に変動した場合のPM堆積酸化挙動を研究し、触媒性能評価および触媒活性依存を示唆した(学術論文にて報告済み)。さらに、多くの先行研究によって性能評価されている粒子状触媒の結果を用いてDPF上触媒への触媒性能変換モデルの構築と実験によるモデルの妥当性を検討した。その結果、粒子状触媒をDPF上に用いる場合、活性化エネルギーは同様であるが、頻度因子が小さくなることを示唆した(学術論文を投稿中)。さらに、フィルターに触媒を担持した場合の圧力損失への影響やフィルター壁面細孔の影響などを調査し学会にて報告を実施した。

2022年度は、触媒付きDPFのPM酸化性能の評価には、高活性な粉末状の触媒をDPF基材を用意し触媒をコートさせた後にPMを付着させ、DPFを高温維持させる実験が必要である。しかし、実験コストや触媒担持技術が容易ではないため、触媒付きDPFのPM酸化性能に関する詳細な検証や評価が行われた研究は少ない。活性な粉末触媒を担持したDPFの性能を予測するため、触媒付きDPFのPM浄化性能の評価を行うモデルの構築が必要である。本研究では、粉末状態のCeO₂を用いたPM酸化性能の評価に関して、CeO₂触媒をコートしたDPFのPM浄化性能の予測を行い、ナノ粉末触媒からDPF全体の挙動までの一連を数値化が可能なモデル作成(コンバータモデル)を目的とした。PM除去の熱重量測定(Thermogravimetry: TG)曲線を反応速度論から解析したPM酸化反応の頻度因子を評価し、換算式の妥当性を評価した。さらにCeO₂とPMの接触状態の違いに着目し、CeO₂粉末を用いた実験とCeO₂触媒を焼結もしくは基板コートさせDPF内部のPM酸化反応を模擬した実験を比較し、換算法の妥当性を確認した。上記の実験結果を計算モデルに取り入れ、ガソリンエンジンのWLTC走行モードに即した数値計算を実施し、PM燃焼に最適な条件を提示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 中村真季, 横田幸治, 岡井健吾, 小澤正邦	4. 巻 54
2. 論文標題 パティキュラーフィルター用触媒のコンバータモデルの構築	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 242-247
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11351/jsaeronbun.54.242	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 中村真季, 横田幸治, 小澤正邦	4. 巻 53
2. 論文標題 1次元モデルによるPM堆積・酸化シミュレーション-運転モードを考慮した数値計算	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 360-365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11351/jsaeronbun.53.360	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 中村真季, 横田幸治, 小澤正邦	4. 巻 52
2. 論文標題 1次元モデルによる触媒付きディーゼル微粒子フィルターのPM堆積・酸化シミュレーション-触媒によるPM 燃焼挙動の解析(第四報)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 257-262
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11351/jsaeronbun.52.257	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 横田幸治, 中村真季, 服部将朋, 小澤正邦	4. 巻 51
2. 論文標題 1次元モデルによる触媒付ディーゼル微粒子フィルターのPM堆積・酸化シミュレーション-DPF形状依存性 (第三報)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 882-887
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11351/jsaeronbun.51.882	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Maki Nakamura, Koji Yokota, Masatomo Hattori and Ozawa Masakuni	4. 巻 2020-01-2169
2. 論文標題 Numerical Calculation of PM Trapping and Oxidation of Diesel Particulate Filter with Catalyst.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SAE Technical Papers	6. 最初と最後の頁 2020-01-2169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4271/2020-01-2169	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 中村真季, 横田幸治, 岡井健吾, 小澤正邦
2. 発表標題 PM酸化触媒活性のコンバータモデルの構築
3. 学会等名 自動車技術会2022, 秋季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村真季, 横田幸治, 小澤正邦
2. 発表標題 一次元モデルによる微粒子フィルターのPM堆積・再生シミュレーション -触媒担持位置依存の評価-
3. 学会等名 自動車技術会2022, 春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村真季, 横田幸治, 小澤正邦
2. 発表標題 1次元モデルによるPM堆積・酸化シミュレーション-運転モードを考慮した数値計算
3. 学会等名 自動車技術会2021, 秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村真季, 横田幸治, 小澤正邦
2. 発表標題 一次元モデルによるPM堆積・酸化シミュレーション - PM酸化挙動の酸素濃度依存性 -
3. 学会等名 自動車技術会2021, 春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Maki Nakamura ¹ , Koji Yokota ¹ , Kengo Okai ¹ , and Masakuni Ozawa,
2. 発表標題 Numerical Calculation of PM Trapping and Oxidation of Diesel Particulate Filter with Catalysts
3. 学会等名 ICMaSS Materials Architecture(DEJI2MA) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Maki Nakamura, Koji Yokota, Masatomo Hattori and Ozawa Masakuni
2. 発表標題 Numerical Calculation of PM Trapping and Oxidation of Diesel Particulate Filter with Catalyst.
3. 学会等名 SAE/ Powertrains, Fuels and Lubricants, Digital summit (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村真季, 横田幸治, 小澤正邦
2. 発表標題 1次元モデルによる触媒付きディーゼル微粒子フィルターのPM堆積・酸化シミュレーション-触媒によるPM燃焼挙動の解析(第四報)
3. 学会等名 自動車技術会2020, 秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横田幸治, 中村真季, 小澤正邦
2. 発表標題 1次元モデルによる触媒付ディーゼル微粒子フィルターのPM堆積・酸化シミュレーション-DPF形状依存性(第三報)
3. 学会等名 自動車技術会2020, 春季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関