

機関番号：13901

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560188

研究課題名 (和文) 固気界面の熱輸送とディーゼル微粒子燃焼過程の連成解析

研究課題名 (英文) Simulation on Gas-Solid Heat Transfer in Diesel Combustion

研究代表者

山本 和弘 (YAMAMOTO KAZUHIRO)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：60283488

研究成果の概要 (和文)：近年、ディーゼル微粒子を後処理するフィルター (DPF) が開発されたが、捕集した微粒子を焼却するフィルターの再生過程が必要である。ここでは、実際のフィルターを対象とするため、X線CT法によりその内部構造を解析し、格子ボルツマン法を用いたシミュレーションを行った。内部の温度を正確に予測する必要があるため、本研究ではフィルターの壁内部 (固相) と流路 (気相) を連成問題として扱うことにより現象を解析する手法を提案した。

研究成果の概要 (英文)：To reduce diesel particles, a diesel particulate filter (DPF) has been developed for the after-treatment of exhaust gas. Since the filter would be plugged with particles to cause an increase of filter back-pressure, filter regeneration process is needed. In this study, we simulate the flow in DPF by the lattice Boltzmann method (LBM). Here, the real filter is used in the simulation. The inner structure of the filter sample is scanned by a 3D X-ray CT technique. Especially, to consider the heat transfer to the solid wall of the filter, the equation of heat conduction was solved, simultaneously. That is, the approach for the simulation of gas-solid flow was presented.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：シミュレーション、ディーゼル微粒子、格子ボルツマン法、熱伝導、後処理

1. 研究開始当初の背景

近年、各国でディーゼル車の微粒子 (PM) に対する排出ガス規制が強化されてきている。そこで、排気ガスの後処理技術としてディーゼル微粒子除去フィルター (DPF) が開発された。エンジン燃焼の改善も行われているが、これによる PM 排出量の低減には限界があり、DPF の使用が不可欠である。

ディーゼル車にフィルターを装着した場合、捕集された PM を連続的または間欠的に焼却・除去し、フィルターを再生する必要が

ある。PM を DPF に捕集することは比較的容易であるが、PM を捕集した DPF を安全に高い信頼性を持って再生することにはかなりの問題点が存在する。再生方法には電気ヒーターなど様々な方法が提案されている。現状では、実験によるフィルター内部の解析が困難なため、内部の現象を十分に把握することができていない。

2. 研究の目的

これまでに我々は、格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method, LBM) を用いて、DPF 内の流れやすすの燃焼を数値シミュレーションにより模擬し、排ガスの後処理過程を検討した。ただし従来のモデルでは、排気ガスの気相のみを解き、固相であるフィルターの内部は解析していない。しかしながら実際は、すすが燃焼することにより高温となり、気相から固相のフィルター基材内部への熱輸送が重要となる可能性がある。

そこで本研究では、LBM により気相を解析し、固相は別に熱伝導方程式を解くことで、連続再生式 DPF を想定した排ガスの後処理を気相と固相の連成問題として扱うことにした。今回はコーゼライトフィルターの内部構造を X 線 CT 法により分析し、フィルター内部の流れや反応を検討した。

3. 研究の方法

気相は格子ボルツマン法を用いて解析した。LBM では、仮想粒子の並進と衝突から流れを解析する。粒子の分布関数は、1 時間ステップで 1 格子だけ分布が移動する並進過程と、衝突により平衡分布へ緩和する衝突過程により求める。衝突項は、単一緩和時間近似を用いて、局所平衡分布とのずれにより簡略化している (BGK 近似)。フィルター内部では流速が小さく、燃焼による温度上昇以外の密度変化は無視できるため、非圧縮のモデルである圧力に対する分布関数をもとに流れを計算した。

今回は、排気ガス中の PM としてすすのみを考慮した。すすの反応速度は Lee らの一段反応により求めた。ただし、すすがフィルター内に堆積することは考慮していない。

次に固相の計算方法について説明する。今回は固相のフィルター基材内部への熱輸送を考慮するため、以下に示す熱伝導方程式の解析を、上記で説明した気相の格子ボルツマン法の解析と同時にこなす。この際、フィルターの比熱、熱伝導率、密度の値が必要になるが、今回はコーゼライトフィルターの物性値を用いた。

図 1 に本計算で用いた領域を示す。計算領域の大きさは $0.40\text{mm}(X) \times 0.04\text{mm}(Y) \times 0.04\text{mm}(Z)$ とし、格子数はそれぞれ 401, 41, 41 である。フィルターは計算領域中央に配置し、その前後に助走区間を設けた。計算条件は、フィルター上流部 (入り口) よりすすを含んだ排気ガス (温度 400°C) を一様に流入させる。入口での流入速度は 1.0m/s とした。排気ガスの組成は、体積比で酸素 10%、窒素 90% とし、流入するすすの質量分率は 0.001, 0.01, 0.05 の 3 条件とした。境界条件は、入口で流入境界、上下の壁はすべりなし境界とし、出口は自由流出境界とした。

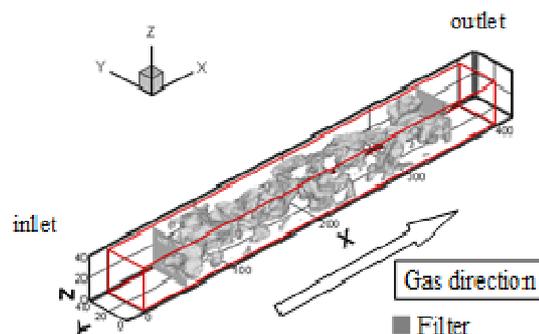


図 1 計算領域

4. 研究成果

3 次元 X 線 CT 法により得られたディーゼルフィルターの画像を図 2 に示す。座標系は、排気ガスが DPF の壁を透過する方向を X 軸 (流れ方向)、それに垂直な方向にそれぞれ Y 軸と Z 軸をとっている。解像度は $1\mu\text{m}/\text{pix}$ であり、フィルターの側壁の一部を示している。矢印の点線で示した領域のサイズは、 $0.4\text{mm}(X) \times 0.4\text{mm}(Y) \times 0.2\text{mm}(Z)$ である。平均空隙率は約 0.4 であり、その内部にさまざまな空孔構造がある様子が明確にとらえられている。

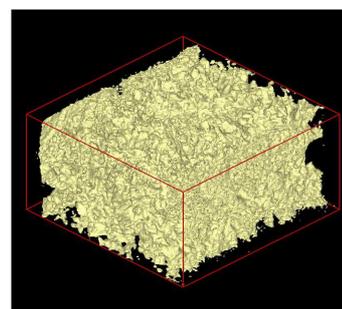
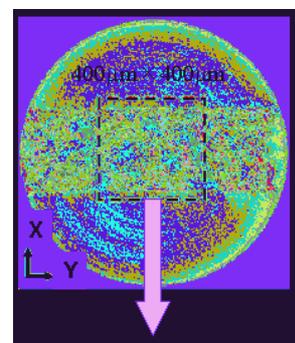


図 2 X 線 CT 法により得られた DPF 構造

まず、非燃焼場の計算を行った。今回対象としたコーゼライトフィルターは、内部に無数の空孔が存在する多孔質のセラミックであるが、図 2 で示したように計算にはフィ

ルター全体の極一部しか用いていないため、まず非燃焼の流れを計算して、流れ場について検討した。図3に流れ方向の平均速度と圧力の分布を示す。それぞれ YZ 断面の平均値であり、比較のため空隙率も示している。これによると、フィルターの空隙率が局所的に変化し、流れが大きく変化していることがわかる。また、一部で流路が非常に狭くなっているため、速度が大きく加速され、同時に圧力も変化することがわかった。

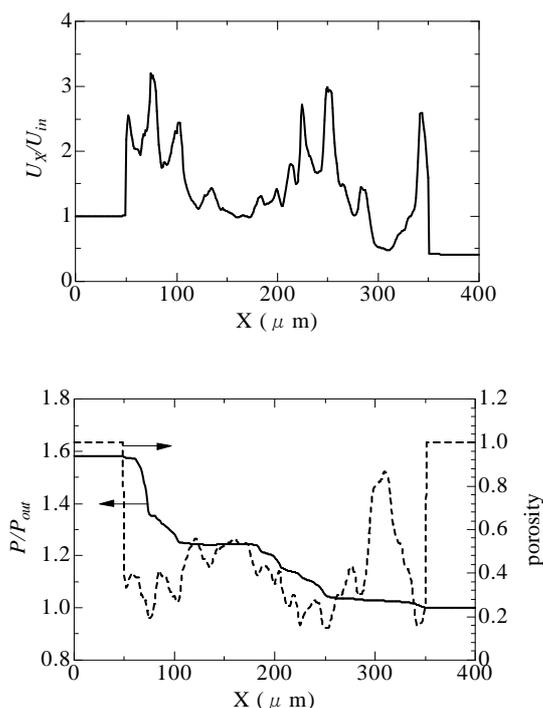


図3 流れと圧力の分布

次に、得られた摩擦係数を多孔体の流れに対する経験式である Ergun の式と比較した。その結果、計算結果が経験式によく一致しており、今回のような狭い計算領域を用いた場合でも、多孔体流れが再現できていることを確認した。

最後に、燃焼計算を行った結果を示す。図4は、フィルターの基材内部の温度が変化の様子を示した図である。計算開始からの経過時間がそれぞれ $0.01 \mu\text{s}$, $0.33 \mu\text{s}$, $10 \mu\text{s}$ 後の温度分布を示しており、すすの質量分率は 0.05 である。すすの燃焼により気相と固相であるフィルターの温度が上昇していく様子が見られる。その後十分に時間が経過すると、気相と固相の基材の温度が同じになり、最終的にフィルター内部の温度が一様になることがわかった。

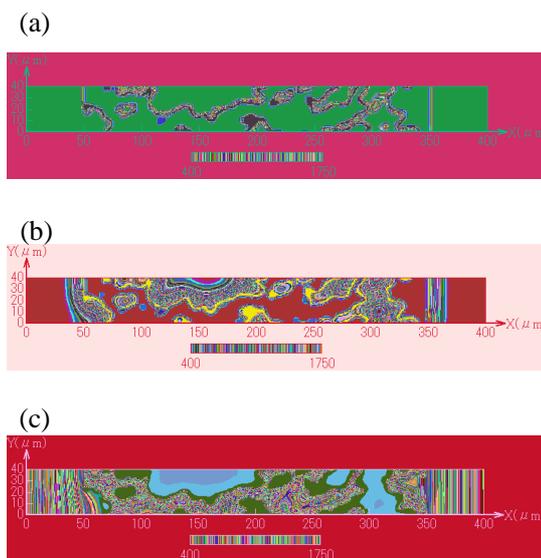


図4 フィルター内部の温度分布; (a) 時刻 $0.01 \mu\text{s}$, (b) 時刻 $0.33 \mu\text{s}$, (c) 時刻 $10 \mu\text{s}$

さらに、すす濃度と反応速度について調べた。それぞれの分布を3次元で示した結果を図5に示す。すすの質量分率は 0.05 である。計算開始から十分に時間が経過し、定常になった結果を示している。これによると、すすがフィルター内部に入ると次第に燃焼し、濃度が減少している様子が見られる。一方、反応速度はフィルター入り口付近の上流部で高い値を示した。また、流入するすす濃度を変化させて計算を行ったところ、フィルター内の最高温度は、流入するすす濃度が 0.001 , 0.01 , 0.05 の場合に、それぞれ 489°C , 773°C , 1902°C となった。したがって、流入するすす濃度が高いほど、フィルターの内部が高温となり、排ガスの後処理が促進されることがわかった。

このことを確認するため、排気ガス中のすす濃度を変化させてフィルター内部のすす濃度を調べた。これにより、すすがどの程度燃焼しているかについて検討した。その結果流入するすす濃度が 0.05 の場合、フィルター内部で燃焼するすすの量は6割程度であった。したがって今回の計算条件では、フィルター出口において未反応のすすが4割程度あることがわかった。後処理が不十分な理由としては、すすがフィルターに吸着する現象を考慮していないことが挙げられる。さらに、触媒を用いることによりすすの燃焼量が増え、排ガスの後処理が改善されるものと思われる。

本研究で提案した手法によりシミュレーションを行うことにより、フィルター内部で起こる再生過程がより厳密に計算できる。今後、実験とシミュレーションを融合させた効率的なフィルター開発が可能となり、PM 処理

技術の今後の改善が期待できる。

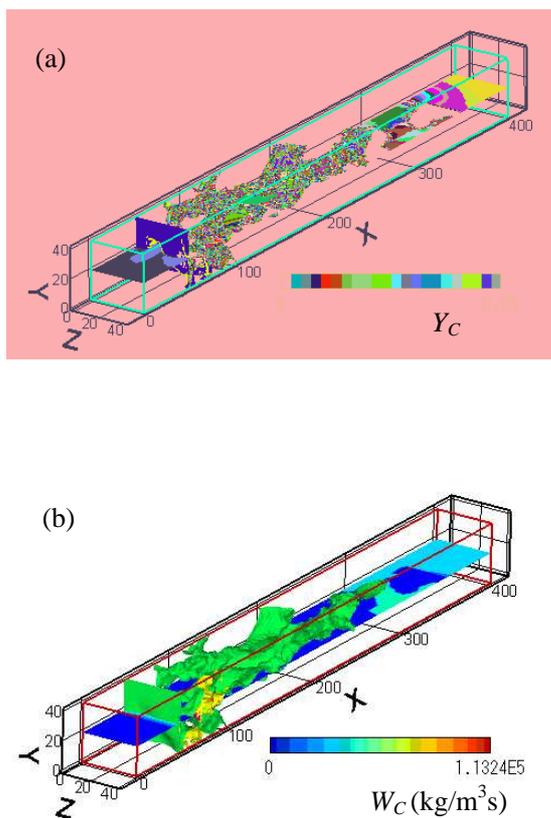


図5 すず濃度と反応速度の分布

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① K. Yamamoto, M. Nakamura, and H. Yamashita, Simulation on Flow and Heat Transfer in Diesel Particulate Filter, ASME Journal of Heat Transfer, 査読有, Vol.133, 2011, 1-6.
- ② K. Yamamoto, and M. Nakamura, Simulation on Gas-Solid Flow with Heat Transfer in Diesel Particulate Filter, 18th Int. Conference on the Discrete Simulation of Fluid Dynamics, 査読有, 2009, Book of Abstract.1-2 ページ
- ③ K. Yamamoto, M. Nakamura, and H. Yamashita, Simulation on Flow and Heat Transfer in Diesel Particulate Filter, Proc. 2nd Thermal Issues in Emerging Technologies, 査読有, 2008, 245-250.

[学会発表] (計 4 件)

- ① K. Yamamoto, Simulation on Catalytic

Reaction in Diesel Particulate Filter, Research Seminar in Max-Planck-Gesellschaft, 2010 年 5 月 25 日, Berlin, Germany.

- ② 中村匡統, 山本和弘, DPF 内の伝熱とすす燃焼の固気連成解析, 第 47 回燃焼シンポジウム, 2009 年 12 月 4 日, 北海道.
- ③ 中村匡統, 山本和弘, DPF 内の伝熱と燃焼の固気連成解析, 第 20 回内燃機関シンポジウム, 2009 年 9 月 3 日, 早稲田大学 (東京).
- ④ 山本和弘, 中村匡統, 山下博史, ディーゼルフィルター内の伝熱と燃焼反応の固気連成解析, 第 46 回燃焼シンポジウム, 2008 年 12 月 3 日, 京都テルサ (京都市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 和弘 (YAMAMOTO KAZUHIRO)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 60283488

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし