

ディーゼル微粒子の堆積とフィルタの再生過程の数値解析*

佐竹真吾^{*1}, 山本和弘^{*2}, 山下博史^{*3}Numerical Simulation on
Diesel Particle Trap and Filter RegenerationShingo SATAKE, Kazuhiro YAMAMOTO^{*4}, and Hiroshi YAMASHITA^{**} Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

Recently, more strict diesel particulate emissions standards are being set in many countries. To have an advantage of low fuel consumption in comparison with gasoline engines, several improvements including combustion conditions in diesel engines have been considered. As for the after-treatment of exhaust gas, a filter such as cellular diesel particulate filters has been widely used. In this study, we conducted fluid simulation in the diesel filter by the Lattice Boltzmann method. The soot deposition was considered for the soot trap inside the filter. The soot combustion was also simulated to burn accumulated soot particles in filter regeneration process. The inner structure of the filter developed by COTEC Limited was obtained by a 3D-CT technique. Results show that the flow pattern is largely changed when the soot is attached to the filter wall, with higher back-pressure. The soot combustion is well simulated to show the effects of oxygen concentration on the temperature and reaction rate.

Key Words: Diesel Engine, Computational Fluid Dynamics, Combustion, Combustion Products, Lattice Boltzmann Method

1. 緒 論

現在、貨物トラックやバスなどディーゼル車は広くわれわれの生活に用いられている。ディーゼル車は耐久性がよく、高出力であるためこのような輸送手段に用いられる。また、ディーゼル車はガソリン車に比べて燃費がよいため、ヨーロッパでは乗用車に占めるディーゼル車の割合が50%を超えている。しかしながら、ディーゼル車から排出される排気ガス中の大気汚染物質が問題となっている。特に、粒子状物質(PM)は発がん性を有するため健康を損なうことが懸念されており⁽¹⁾、ヨーロッパのEuroVや日本のポスト新長期規制など排出ガス規制が強化されている。したがって、ディーゼル車から排出される有害成分を低減するため、燃料の改質やエンジンの燃焼技術の改善だけでなく、触媒などの後処理技術の開発が行われている。

近年、ディーゼル微粒子除去フィルタ(Diesel Particulate Filter, DPF)を用いて、排気ガス中のPMを

吸着・除去する技術が実用化された。DPFの原理は、多孔体構造をもつセラミックスのフィルタに排気ガスを通し、PMを内部に吸着させて除去する仕組みである。しかしながら、フィルタ内部にすす粒子が堆積するとフィルタ前後の圧力差(圧損)が増加し、燃費の悪化やエンジンの出力低下などの問題が生じる。そこで、フィルタを定期的に交換するか、その内部に堆積したPMを燃焼により強制的に焼却するフィルタの再生過程が必要となっている。将来的には、微粒子をフィルタ内部に吸着させると同時に、触媒等により酸化処理する連続再生方式が望ましいが、すす粒子が燃焼する際の局所的な温度上昇によりフィルタの内部構造が破壊されることが懸念されており、依然開発段階にある⁽²⁾。

通常、フィルタの開発においては、試作したフィルタに排気ガスを通し、内部に吸着した微粒子の量を見積もる実験がおもに行われているが、測定可能なデータはフィルタ前後の圧力差や排気ガスの温度とガス組成だけであった。そこで、実験だけでなく内部の現象を数値的に解析し、フィルタの特性を把握することが望ましい。しかし、フィルタの内部構造は非常に複雑であり、N-S方程式などの保存式を解く従来の方法では解析が困難である。

* 原稿受付 2007年3月9日。

^{*1} 名古屋大学大学院工学研究科(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。^{*2} 正員, 名古屋大学大学院工学研究科。^{*3} 正員, フェロー, 名古屋大学大学院工学研究科。

E-mail: kazuhiro@mech.nagoya-u.ac.jp

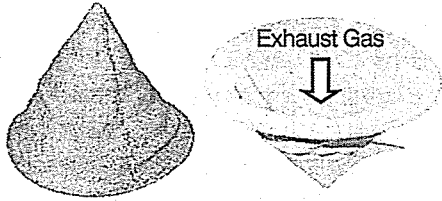


Fig. 1 Photographs of COATEC diesel filter

そこで著者は、複雑な境界面をもつ流れの解析に有効な格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann Method, LBM)に着目し、すす粒子の吸着過程と燃焼反応を数値的に解析してきた⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。本研究では実際に開発中のディーゼルフィルタを対象とする。図1に(株)コーテック製のフィルタを示す。フィルタは円すい形状をしており、素材は炭素繊維である。図1のように排気ガスを矢印の方向に通すことで、PMを吸着・除去する仕組みである。本研究では、フィルタをマイクロフォーカス三次元X線CT法により分析し、得られた画像から内部構造を求めて、すすが堆積する現象とすすの燃焼反応を解析した。

2. 解析モデルおよび計算方法

2.1 格子ボルツマン法 ここでは、格子ボルツマン法(LBM)について簡単に説明する⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾。LBMでは格子ガス法(LGA)と同様、粒子の並進と衝突の過程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格子だけ分布関数が移動する並進過程と、分布関数が衝突により平衡分布へ緩和する衝突過程により記述される。今回は三次元の流れを計算するため、空間を立方格子で離散化するd3q15モデル⁽¹³⁾(図2)を用いた。

次に計算方法について説明する。すでにLBMによる粒子の堆積計算や燃焼計算の詳細については他の文献(3)~(8)で行っているため、詳細な説明は省略する。非圧縮のモデルでは、圧力*p*に対する分布関数をもとに流れを計算する。発展方程式と平衡分布関数はそれぞれ以下のようになる。

$$F_{p,a}(x + e_a \delta_x, t + \delta_t) - F_{p,a}(x, t) = -\frac{1}{\tau_p} [F_{p,a}(x, t) - F_{p,a}^{eq}(x, t)] \dots\dots\dots (1)$$

$$F_{p,a}^{eq} = w_a \left\{ p + p_0 \left[3 \frac{(e_a \cdot u)}{c^2} + \frac{9}{2} \frac{(e_a \cdot u)^2}{c^4} - \frac{3}{2} \frac{u^2}{c^2} \right] \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $w_a = 1/9 (a=1\sim6)$, $1/72 (a=7\sim14)$, および $2/9 (a=15)$ である。また、 $c = \delta_x / \delta_t$ であり、 δ_x と δ_t

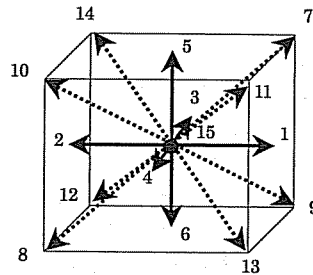


Fig. 2 Velocity directions in d3q15 model

は格子間隔と時間間隔である。圧力*p*と速度*u*は以下の式から求められる。

$$p = \sum_a F_{p,a} \dots\dots\dots (3)$$

$$u = \sum_a e_a F_{p,a} / p_0 \dots\dots\dots (4)$$

ここで p_0 は大気圧とした。格子ボルツマン法における動粘性係数 ν とレイノルズ数 Re は、それぞれ次式により与えられる。

$$\nu = \frac{2\tau_p - 1}{6} \frac{\delta_x^2}{\delta_t} \dots\dots\dots (5)$$

$$Re = \frac{UL}{\nu} \dots\dots\dots (6)$$

計算では変数をすべて無次元化し、その無次元量を実際の値に対応させるため、式(5)、(6)で与えられる Re が実際のレイノルズ数と同じになる緩和時間 τ_p を算出して計算に用いた。ここで、代表速度 U 、代表長さ L 、動粘性係数はそれぞれ、流入速度 U_{in} 、フィルタの厚さ L 、空気の動粘性係数を用いた。

一方、温度、すすや酸素の濃度などのスカラ量は、流れ場と同様に各スカラ量に対する分布関数を用いて求める。その発展方程式と平衡分布関数を示す。

$$F_{s,a}(x + e_a \delta_x, t + \delta_t) - F_{s,a}(x, t) = -\frac{1}{\tau_s} [F_{s,a}(x, t) - F_{s,a}^{eq}(x, t)] + w_i Q_s \dots\dots (7)$$

$$F_{s,a}^{eq} = w_{as} \left[1 + 3 \frac{(e_a \cdot u)}{c^2} + \frac{9}{2} \frac{(e_a \cdot u)^2}{c^4} - \frac{3}{2} \frac{u^2}{c^2} \right] \quad s = T, Y_i \dots\dots\dots (8)$$

ここで Q_s は生成項であり、すすの堆積計算では堆積したすす濃度を変化させ、燃焼計算では反応による発熱や化学種の生成・消滅を表す項である⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾⁽¹⁸⁾。式(7)の緩和時間 τ_s については、式(1)の τ_p と同じ値を与えた。これらの分布関数を積算することにより、温度と化学種 i の濃度(質量分率)が求められる。

$$s = \sum_a F_{s,a} \quad s = T, Y_i \dots\dots\dots (9)$$

2.2 フィルタの構造と境界条件 実際のディー

ゼルフィルタ内部の流れを解析するために、三次元 X 線 CT 法により内部構造を分析した。ディーゼルフィルタの一部を採取し、マイクロフォーカス X 線断層撮影システム XVA-160 [(株)ユニハイトシステム製] により撮影した⁽¹⁴⁾。装置は透過形マイクロフォーカス開放管(最大出力 160 kVp, 200 μ A)と 4 インチ X 線イメージンシファイヤを搭載しており、画像は 8 ビット CCD カメラにより撮影される。画素数は 640 \times 480 であり、解像度は約 13 μ m/pix である。撮影されたフィルタの三次元画像を図 3 に示す。画像のサイズは、4.1 mm (X) \times 8.7 mm (Y) \times 9.5 mm (Z) である。このフィルタは三つの炭化層からなり、複雑な繊維構造をもつようすが明確にとらえられている。

図 4 に計算領域と座標系を示す。図 3 で撮影した画像の一部を抽出して計算に用いた。計算領域は、X 方向(流れ方向)2.66 mm \times Y 方向 0.53 mm \times Z 方向 0.53 mm とし、格子数はそれぞれ 201, 41, 41 とした。フィルタの一部を計算領域中央に配置し、その前後に助走区間を設けた。また、フィルタの厚さ L は 1.06 mm であり、格子で 80 個分である。図の左よりすす粒子を含む混合気を速度 U_{in} で一様に流入させ、フィルタ内部を通過する際の流れを計算する。今回は図 1 のフィルタを通過する流れの垂直成分 U_{in} のみを考慮した。フィルタ壁の境界条件には、壁表面において流速が零になる Non-Slip の境界条件⁽¹⁵⁾を用いる。その他の境界条件は入口では流入境界、出口では圧力一定(大気圧)の自由流出境界、上下左右のフィルタ壁でない部分は滑り壁とした。

2.3 すず粒子の堆積計算 一般にディーゼル微

粒子は、燃焼場で生成されるすすに加え、潤滑油などの揮発成分もあるが、今回の計算においては考慮する粒子はすすのみとした。また、すす粒子の大きさや形状などは考慮せず、すすの濃度(質量分率)を計算する⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。これにより、流れ場と同様、すす濃度の分布関数を用いて濃度場を計算できる。境界条件については、入口では流入すす濃度 $Y_{c,in}$ 、出口では十分に発達しているとしてすす濃度の流れ方向のこう配を零とした。流路の側面境界条件は、対称条件を用いた。また、入口のすす濃度を変化させて、すすの堆積量を計算した。

次に、すす粒子の堆積方法について説明する。図 5 に示すように壁面近傍の格子点で、堆積したすす濃度の質量分率が 1 未満の計算回数 (IT_1) においては、その格子点に流体が進入できるものとする。計算が進み、壁面近傍のすすの質量分率の和が初めて 1 となった計算回数 (IT_2) の次のタイムステップからその格子点は障害物(Non-Slip 境界条件)に設定される。これにより流れはすすの堆積によって変化することになる。また、すすの堆積層の表面の堆積したすすの質量分率を計算する格子点は、次のタイムステップ ($IT_2 + 1$) からすすが堆積した格子点の隣の点とした。ただし、流れによるすすのはく離は考慮しない。

以上のようにして、フィルタ壁にすすが吸着していくようすを模擬した。ただし実際の粒子の吸着現象では、吸着表面の特性、重力、さえぎり効果やブラウン拡散が複雑に作用するため、どの程度のすすが吸着するかを簡単には予測できないが⁽¹⁶⁾、本解析では壁面に衝突したすすは 100% 壁面に吸着するとした。ただしすすの堆積層は、完全には空けきが零となっていないことが報告されている。その値は排気ガスの流速条件により変化するが、典型的な値として 0.93 という値が報告されている⁽¹⁷⁾。このような場合には、流れの一部がすす層を透過することになるため、フィルタ前後の圧力差も変化する可能性がある。そこで今回は、新

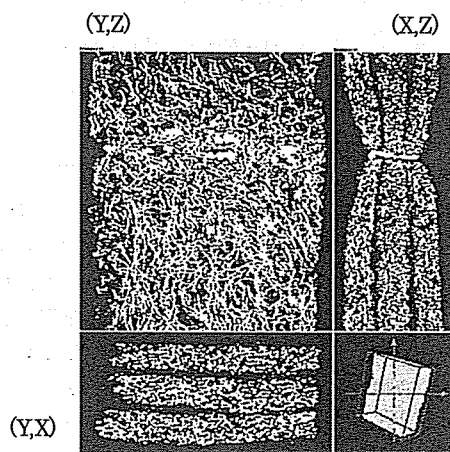


Fig. 3 Structure of DPF obtained by 3-D-CT technique

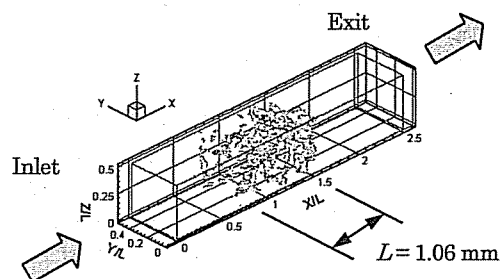


Fig. 4 Coordinate and diesel filter

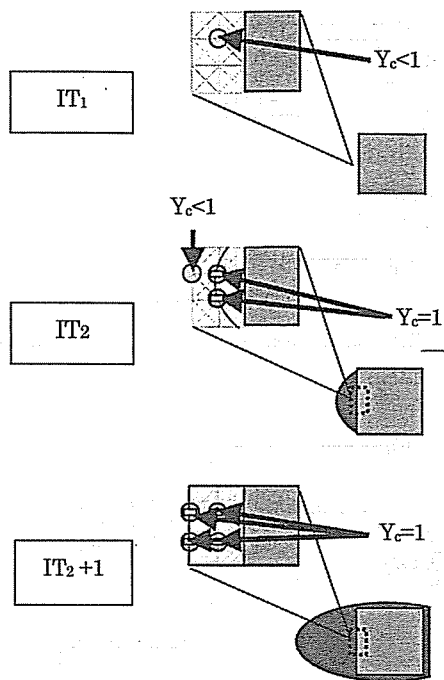


Fig. 5 Approach for soot deposition

しいパラメータとして透過割合 P_F を導入することにした。具体的には、確率 P_F によりすす層を分布関数(流れ)が透過し、確率 $(1-P_F)$ で分布関数(流れ)がもとの方向に戻る粘性壁の Non-Slip の境界条件を用いることにした。これにより、すす層を透過する流れが模擬できる。

2.4 フィルタの再生過程の計算 前述のように、フィルタ内部に堆積したすす粒子を焼却処理する過程は、フィルタの再生過程と呼ばれる。格子ボルツマン法により燃焼場を計算する方法はすでに報告している⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾⁽¹⁸⁾。これには、流れ場の計算に必要な圧力の分布関数に加えて、温度と酸素などの化学種の分布関数が必要となる。流入する空気の温度を 300 K とし、フィルタ壁とすすが堆積している層の温度を 900 K とすることで、すすの燃焼を開始させる。空気中の酸素は対流と拡散によりフィルタ表面のすす層に輸送され、すすとの反応により消費される。

計算では、すすが堆積している表面の格子点で燃焼によりすす濃度が零となると、次のタイムステップからその格子点は空けきとみなし、流体が進入できるようになる。これにより内側に堆積していたすすが表面に現れ、流路も変化していく現象が模擬される。境界条件については、入口で空気の温度と組成を与え、流路の側面では対称条件とした。出口では流れ方向のこ

う配を零とした。また堆積しているすすの初期分布には、堆積計算で得られたすす濃度の分布を与えた。反応は式(10)の一段不可逆反応とし、反応速度は Lee らが提案している式(11)を用いた⁽¹⁹⁾。

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \dots\dots\dots(10)$$

$$W_c = k_c P_{O_2} Y_c^{2/3} / T^{1/2} \exp(-E/RT) \dots\dots\dots(11)$$

3. 解析結果および考察

3.1 すず粒子の堆積と流れ場 まず初めに、フィルタ壁にすす粒子が堆積するようすを計算した。流入するすすの質量分率を 0.01、流入流速を 0.5 m/s としたときの計算開始から 4 ms と 12 ms 後の三次元分布および計算領域中央における X-Y 断面の二次元分布を図 6 に示す。これによるとすす粒子が吸着するにつれてフィルタ前方で流れが変化することがわかった。特に、すす粒子が堆積するのはおもにフィルタ前面であり、これにより流路がかなり狭められ、流れが大きく加速されることがわかった。

次に、すすが堆積したことによる圧力変化を調べた。図 7 に 0, 4, 6, 12 ms における流れ方向の圧力分布を示す。ここでの圧力は Y-Z 断面の平均圧力である。これによると、すす粒子が堆積するにつれ、入口の圧力が大きくなることがわかった。これはすすが堆積することにより流路が狭められ、流動抵抗が増加したためであると考えられる。特に、すすがおもに堆積しているフィルタ前面で圧力が大きくなっていることがわかった。

また、入口におけるすす粒子の質量分率を 0.01, 0.0075, 0.005 と変化させ、堆積したすすの量を調べた。図 8 にフィルタ壁に堆積しているすす量の時間変化を示す。すす量はカーボンブラックの密度 380 kg/m³ を用いて質量を算出した。時間がたつにつれ、吸着しているすすが増加するようすがわかる。また、流入するすす濃度が高いほど吸着するすすの量が多くなるという妥当な結果が得られた。

次に、フィルタに流入するすす濃度を変化させて、すすの堆積量とフィルタ前後の圧力差の関係を調べた。その結果を図 9 に示す。なお、時刻 12 ms までの結果を示した。これによると、同じ時刻においては流入するすす濃度が高いほどフィルタ内部に堆積するすすの量は多くなる。このため、 $Y_{c,0} = 0.01$ の場合は時刻 12 ms までに堆積したすす量が最も多く、いちばん大きな圧力差を示した。また、すすの堆積量と圧力差はすす濃度によらず、ほぼ線形関係にあることがわかった。この結果は、すでに報告⁽¹⁷⁾されているすす堆積量と圧力差の関係と定量的にほぼ同じであったこと

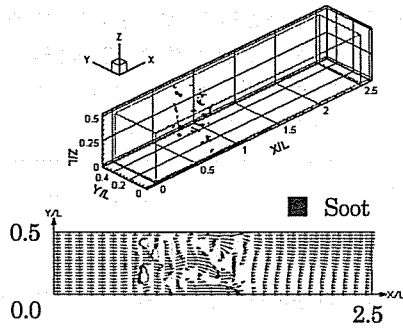
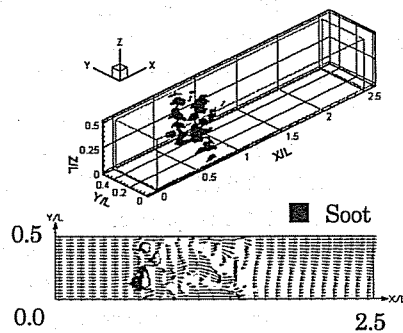
(a) $t=4$ ms(b) $t=12$ ms

Fig. 6 Accumulated soot with velocity vector

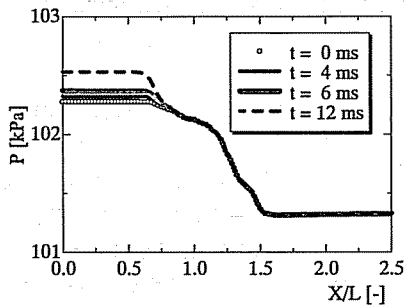
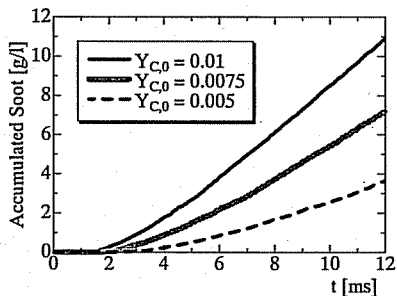
Fig. 7 Distributions of pressure at $t=0, 4, 6$ and 12 ms

Fig. 8 Accumulated soot inside the filter at different soot concentration at the inlet

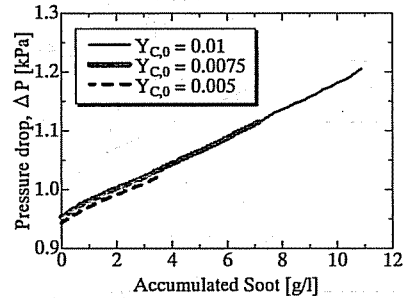
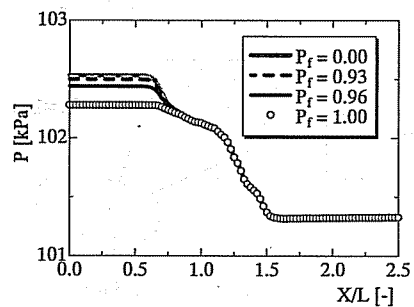


Fig. 9 Relation between pressure drop and accumulated soot

Fig. 10 Distributions of pressure at $P_f=0, 0.93, 0.96$, and 1.00

から、本解析手法の妥当性を確認できた。

最後に、すすの堆積層を透過する流れの影響について検討した。2・3節でも説明したが、Konstantopoulosらは、すす層の空けき率が0.93程度であることを報告している⁽¹⁷⁾。この場合、流れの一部がすす層を透過することになるため、フィルタ前後の圧力差が変化することが予想される。そこで著者らは、新しいパラメータとして透過割合 P_f を導入することにより、すす層を透過する流れを模擬した。

図10に透過割合 P_f を0.0, 0.93, 0.96, 1.0と変化させたときの流れ方向の圧力分布を示す。すすの堆積分布は図6(b)を用いた。ちなみに、透過割合が零の場合は空けき率が零の完全な固体壁、透過割合が1.0の場合は空けき率が1の気相(流路)に相当する。また、この計算ではフィルタに流入するすす濃度は零とし、流れが定常になったときの圧力分布を求めてすす堆積層の流れへの影響を調べた。これによると、透過割合が大きいくほど、すす堆積層を通過する流れが多くなるためフィルタ内部の流動抵抗が減少し、フィルタ前面での圧力が減少した。すなわち、フィルタ前後の圧力差が小さくなる結果となった。ただし、すす堆積層はおもにフィルタ前方となっているため、透過割合

を変化させたときの圧力分布の違いもすす堆積層がある部分に限定されていた。しかしながら、報告されている空げき率である0.93に相当する透過割合の0.93に設定しても、すす堆積層を完全な固体壁とした透過割合が零の計算結果とそれほど大きな違いは見られない。したがって、すす堆積層の通過する流れの影響は小さいことがわかった。

3.2 フィルタの再生過程 次に、燃焼計算を行い、フィルタの再生過程を模擬した。すすが堆積した分布 [図6(a)の結果] を初期値とし、流入する酸素濃度として空気中の21% (質量分率0.233) を与えた。また流入する空気の温度は300 Kとし、すす層およびフィルタ壁の温度は900 Kとした。流入速度は0.1 m/sとした。図11に計算開始後の時刻53.2 msの温度分布、酸素濃度分布、すす濃度分布および反応速度分布を(a)~(d)に示す。図11はそれぞれ計算領域中央のX-Y断面での二次元分布で示している。こ

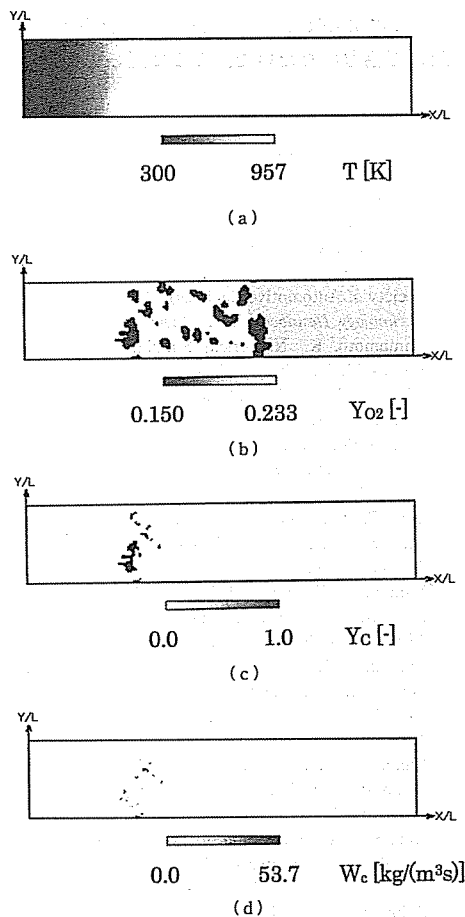


Fig. 11 Distribution of (a) temperature, (b) oxygen, (c) soot, and (d) reaction rate, at 53.2 ms

れによると、すすの燃焼反応によりフィルタ内部の温度が957 Kまで上昇したことがわかる。また酸素濃度はフィルタの内部で減少している。特に、フィルタの入口付近の反応速度が高いことがわかるが、これは図5で示したように、すすの堆積している領域はおもにフィルタの前面であることによる。

実際のディーゼルフィルタの再生過程では、局所的に高温の領域が生じると内部構造が破壊される可能性がある。そこで排気ガス循環(EGR)を想定し、酸素濃度を低下させた場合の結果について検討した。流入する酸素濃度として空気中の酸素濃度21% (質量分率0.233) とディーゼルの排気ガス中の酸素濃度10%⁽²⁰⁾ (質量分率0.113) の二とおりを計算し、比較した。図12に燃焼に伴うすすの残存量の時間変化を示す。ここでは、初期に存在していたすす量に対して残存しているすす量の質量割合 X_c (%) を示している。これによると、いずれの酸素濃度でも時間が進むにつれてすすが反応するため、フィルタ内部のすすの濃度は減少した。ただし、流入ガスとして空気の値を用いた場合はより多くのすすが反応していることがわかる。

この酸素濃度の違いについてさらに検討するため、すす層表面における平均温度の時間変化を求めた。この結果を図13に示す。これによると、いずれの条件でも初期温度として与えた900 Kより温度が高くなっているが、酸素濃度が高いほど温度の上昇も大きくなるという結果となった。また、図14にすす層表面近傍の気相の平均反応速度の時間変化を示す。いずれの酸素濃度でも計算初期に急激に反応速度は上昇したが、図13に示すように酸素濃度が低いと温度上昇が抑制されて、反応速度も小さくなることがわかった。以上より、流入酸素濃度を変化させることでフィルタ内の燃焼反応を制御できることが確認できた。

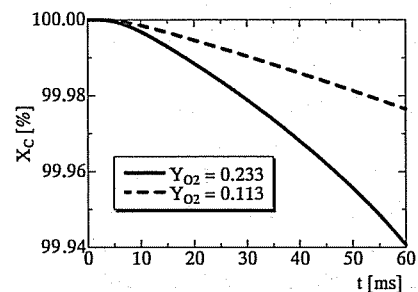


Fig. 12 Mass fraction of remained soot to initial soot at different oxygen concentration

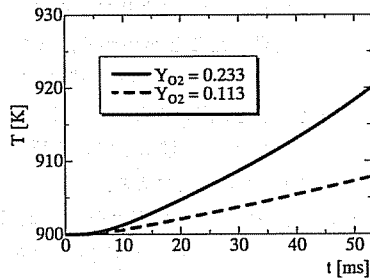


Fig. 13 Mean temperature on accumulated soot surface at different oxygen concentration

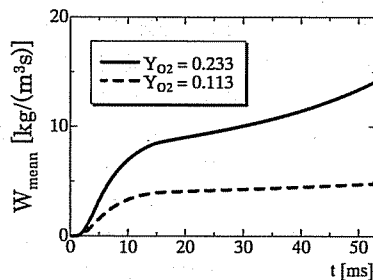


Fig. 14 Mean reaction rate on accumulated soot surface at different oxygen concentration

4. 結 論

本研究では、格子ボルツマン法を用いてディーゼルフィルタ内の流れを計算し、すすの堆積過程とすすの燃焼計算によるフィルタの再生過程を模擬した。その結果、以下のような結論を得た。

(1) 実際のディーゼルフィルタを三次元 X 線 CT 法により分析した結果、複雑な繊維構造をもつようすを明確にとらえることができた。この CT 計測による構造分析と組合わせた数値シミュレーションを行うことにより、実験では測定することができないフィルタ内部の現象を検討することができる。

(2) すすはおもにフィルタの前面に堆積する(表層ろ過)。すすが堆積することにより、フィルタを通過する際の圧力損失が大きくなるが、すすの堆積量と圧力差は線形関係にあり、すでに報告されている実験データとほぼ同じであった。

(3) 透過割合を設定して、すす堆積層を通過する流れの影響を調べたところ、すす堆積層がある部分で圧力分布に違いが見られた。ただし、報告されているすす堆積層の空げき率である 0.93 に相当する透過割合にしても、すす堆積層を完全に固体壁とする計算結果と大きな差は見られないことから、すす堆積層を通

過する流れの影響は小さい。

(4) フィルタに流入するすす濃度を変化させて、内部に堆積するすすの量を調べたところ、すす濃度によらずすすの堆積量とフィルタ前後の圧力差はほぼ同じ関係にある。

(5) すす層とフィルタ壁の温度を上げると、周囲にある酸素がすすと反応し、すす堆積層の表面にあるすすが燃焼するようすが再現され、フィルタの再生過程が模擬された。フィルタに流入する混合気の酸素濃度を変化させることで、温度や反応速度を抑制し、フィルタ内で燃焼させるすす量を制御できることを確認した。

謝 辞

本研究の一部は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)平成 17, 18 年度産業技術研究助成事業助成により行われたものである。また(株)コーテックには開発中のフィルタを提供いただいた。CT 撮影に際しては産業技術総合研究所の三澤雅樹氏・高田尚樹氏にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Hamada, H. and Obuchi, A., Recent trends; The After-treatment Technologies of NO_x and PM Emission from Diesel Vehicles, *Engine Technology*, Vol. 6, No. 4 (2004), pp. 14-20.
- (2) Society of Automotive Engineers of Japan, *Automotive Technology Handbook*, Vol. 4 (2005), pp. 117.
- (3) Yamamoto, K., Numerical Simulation on Flow in Porous Media with Combustion, *J. Japan Society of Fluid Mechanics*, Vol. 23 (2004), pp. 295-302.
- (4) Yamamoto, K. et al., Combustion Simulation with Lattice Boltzmann Method in a Three-dimensional Porous Structure, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30 (2005), pp. 1509-1515.
- (5) Ochi, F. et al., Simulation on Flow in Porous Media with Soot Deposition, *J. Japan Society of Fluid Mechanics*, Vol. 24, No. 5 (2005), pp. 535-541.
- (6) Yamamoto, K. and Ochi, F., Soot Accumulation and Combustion in Porous Media, *Journal of the Energy Institute*, Vol. 79, No. 4 (2006), pp. 195-199.
- (7) Yamamoto, K. et al., Lattice Boltzmann Simulation on Porous Structure and Soot Accumulation, *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 72 (2006), pp. 257-263.
- (8) Yamamoto, K. and Takada, N., LB Simulation on Soot Combustion in Porous Media, *Physica A*, Vol. 362 (2006), pp. 111-117.
- (9) Hou, S. et al., Evaluation of Two Lattice Boltzmann Models for Multiphase Flows, *J. Computational Physics*, Vol. 138 (1997), pp. 695-713.
- (10) Filippova, O. and Hanel, D., Lattice-Boltzmann simulation of Gas-particle Flow in Filters, *Journal of Computational Physics B*, Nos. 1 & 2 (2003), pp. 197-

- 200.
- (11) Inamuro, T. et al., Lattice Boltzmann Simulation of Flows in a Three-dimensional Porous Structure, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 29 (1999), pp. 737-748.
- (12) Inamuro, T., *Physicality research*, Vol. 77, No. 2 (2001), pp. 197-232.
- (13) Qian, Y. H. et al., Lattice BGK Models for Navier-Stokes Equation, *Europhysics Letters*, Vol. 17 (1992), pp. 479-484.
- (14) Misawa, M. et al., Oblique View Cone Beam Tomography for Inspection of Flat-Shape Objects, *Key Engineering Materials*, Vol. 270-273 (2004), pp. 1135-1142.
- (15) Zou, Q. and He, X., On Pressure and Velocity Boundary Conditions for The Lattice Boltzmann BGK Model, *physics of Fluids*, (1997), pp. 1591-1598.
- (16) Hayashi, H., Lattice Boltzmann Method and its Application to Flow Analysis in Porous Media, *R & D Review of Toyota CRDL*, Vol. 38, No. 1 (2003), pp. 17-25.
- (17) Konstandopoulos, A. G. et al., Microstructural Properties of Soot Deposits in Diesel Particulate Traps, *SAE paper*, 2002-01-1015 (2002), pp. 1-9.
- (18) Yamamoto, K. et al., Simulation of Combustion Field with Lattice Boltzmann Method, *J. Statistical Physics*, Vol. 107, No. 112 (2002), pp. 367-383.
- (19) Lee, K. B. et al., On the Rate of Combustion of Soot in a Laminar Soot Flame, *Combustion and Flame*, Vol. 6 (1962), pp. 137-145.
- (20) Oi-Uchisawa, J. and Obuchi, A., Effect of Feed Gas Composition on the Rate of Carbon Oxidation with Pt/SiO₂ and the Oxidation Mechanism, *Applied Catalysis B*, Environmental 21 (1999), pp. 9-17.