

連続再生式ディーゼルフィルターにおけるすすの燃焼と堆積の数値解析

松井健太*1, 山本和弘*2

Numerical Simulation on Soot Combustion and Deposition in Continuously Regenerating Diesel Filter

Kenta MATSUI, and Kazuhiro YAMAMOTO*3

*3 Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan

Since particulate matters (PM) emissions including soot from diesel cars do harm to our health, a diesel particulate filter (DPF) has been used in the after-treatment of exhaust gas. It is reported that DPF filling with PM causes higher back-pressure and more fuel consumption, and continuously regenerating PM trap system is needed. Then, we have focused on the diesel exhaust gas perfect burning system (DEGPBS) developed by COTEC, Ltd., where soot is trapped and burned by the heater. However, the phenomena in the system are not well understood, because it is difficult to conduct the measurement inside the filter. In this study, we simulated soot combustion and deposition by the lattice Boltzmann method to observe the combustion field in the filter. The inner structure of the filter was obtained by a **3D X-ray CT** technique. Results show that the heat and mass transport in DEGPBS are well visualized. It is found that temperature of the filter and oxygen concentration are important factors to burn soot in exhaust gas.

Key Words : Diesel Engine, Numerical Simulation, Combustion, Lattice Boltzmann Method

1. 緒 論

ディーゼル車は低燃費、高耐久性という特徴を持ち、温室効果ガスである CO₂ の排出を抑制することができることから、将来的に幅広い利用が期待されている。日本のディーゼル車から排出される NO_x は日本における NO_x 総排出量の 75%、粒子状物質 (PM, Particulate Matter) は総排出量のほとんどを占め、大気汚染の主要原因となっている⁽¹⁾。特に、PM は肺がんの発症原因として危惧され、さらに、環境ホルモンとしてアレルギー性疾患を引き起こすと言われており、早急な対策が必要である。

その対策として、排ガス中の PM を吸着・除去するディーゼル微粒子除去フィルター (Diesel Particulate Filter, DPF) が実用化された。DPF はディーゼル車の排ガス中の PM を後処理するため、PM を

吸着・除去するフィルターである。現在、PM の捕集によるエンジン背圧の増加、それに伴う燃費の悪化⁽²⁾とエンジン出力の低下が問題視されており、これを防ぐために、捕集した PM を連続的に酸化処理する連続再生式 DPF が提案されている。今回は、連続再生が可能な排ガスの後処理技術として株式会社コーテックが提案しているディーゼル排ガス完全燃焼システム DEGPBS (Diesel Exhaust Gas Perfect Burning System) に着目した⁽³⁾。このシステムでは触媒を用いない (触媒フリー)。フィルターの目詰まりを防ぐため、走行中にヒーターで加熱し、さらに空気を導入して PM の酸化を促進させ、連続再生を行う (図 1 参照)。しかし、実験で得られる情報はエンジン負荷と圧力損失の関係や排ガスの PM 粒径分布などに限られる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。そのため、内部ですすがどのように堆積し、燃焼しているのかを把握することは難しい。これまでに著者らは、格子ボルツマン法 (LBM) を用いて、すす粒子の吸着過程と燃焼過程をそれぞれ別々にではあるが、数値的に模擬することに成功

*原稿受付 2009年 9月 日。

*1 名古屋大学大学院 (〒464-8603 愛知県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

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

している⁽⁶⁾⁻⁽¹¹⁾.

本研究では連続再生式ディーゼelfilterの数值解析を行うため、すすの燃焼と堆積を同時に計算する初の試みを行った。特に、実際のfilter内部で起こる現象を直接検討するため、3次元 X 線 CT 法によりfilterの構造を取得し、その内部の反応流れをLBMにより解析した。これにより、連続再生式システムの開発に必要なすすの堆積や燃焼の過程を定量的に評価することができる。

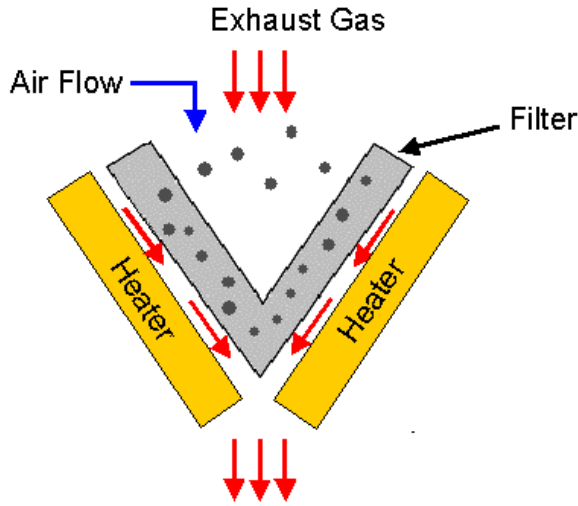


Fig. 1 Schematic of DEGPBS

2. 解析モデルおよび解析方法

2・1 格子ボルツマン法 ここでは、解析に用いた格子ボルツマン法 (LBM) について簡単に説明する⁽¹²⁾⁻⁽¹⁵⁾. LBM では、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 タイムステップで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。3次元の計算を行うため、空間を立方格子で離散化する d3q15 モデル⁽¹⁶⁾ (図 2) を用いた。

次に計算方法について説明する。著者らが提案している燃焼計算モデルでは、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ようになる。

$$F_{p,\alpha}(\mathbf{x} + \mathbf{e}_\alpha \delta_t, t + \delta_t) - F_{p,\alpha}(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{\tau_p} [F_{p,\alpha}(\mathbf{x}, t) - F_{p,\alpha}^{eq}(\mathbf{x}, t)] \quad (1)$$

$$F_{p,\alpha}^{eq} = w_\alpha \left\{ p + p_0 \left[3 \frac{(\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u})}{c^2} + \frac{9(\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u})^2}{2c^4} - \frac{3\mathbf{u}^2}{2c^2} \right] \right\} \quad (2)$$

ここで、 $w_\alpha = 1/9$ ($\alpha = 1 \sim 6$), $1/72$ ($\alpha = 7 \sim 14$), および $2/9$ ($\alpha = 15$) である。また、 $c = \delta_x / \delta_t$ であり、 δ_x と δ_t は格子間隔と時間間隔である。圧力 p と速度 \mathbf{u} は以下の式から求められる。

$$p = \sum_\alpha F_{p,\alpha} \quad (3)$$

$$\mathbf{u} = \sum_\alpha \mathbf{e}_\alpha F_{p,\alpha} / p_0 \cdot (T/T_0) \quad (4)$$

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。

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

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

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、緩和時間は実際の Re と格子ボルツマン法における Re が同じになる緩和時間 τ_p を与えた。ここで、代表速度 U 、代表長さ L 、動粘性係数 ν はそれぞれ、排ガスの流入速度、filter幅、排ガス温度における空気の動粘性係数を用いた。

燃焼場を計算するためには、上記の圧力の分布関数に加えて、温度や酸素などの化学種の分布関数が必要となる⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁹⁾⁽¹¹⁾⁽¹⁹⁾. 温度やすす、酸素濃度などのスカラー量は、流れ場と同様に各スカラー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。

$$F_{s,\alpha}(\mathbf{x} + \mathbf{e}_\alpha \delta_t, t + \delta_t) - F_{s,\alpha}(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{\tau_s} [F_{s,\alpha}(\mathbf{x}, t) - F_{s,\alpha}^{eq}(\mathbf{x}, t)] + w_i Q_s \quad (7)$$

$$F_{s,\alpha}^{eq}(\mathbf{x}, t) = w_\alpha s \left\{ 1 + 3 \frac{(\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u})}{c^2} + \frac{9(\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u})^2}{2c^4} - \frac{3\mathbf{u}^2}{2c^2} \right\} \quad (8)$$

$s = T, Y_i$

ここで、 Q_s は、すすの燃焼により温度や濃度が変

化する項である。これらの分布関数を積算することにより、温度 T と化学種 i の濃度（質量分率 Y_i ）が求められる。

$$s = \sum_{\alpha} F_{s,\alpha} \quad s = T, Y_i \quad (9)$$

また式(7)の緩和時間 τ_s については、式(5)の τ_p と同じ値を用いた。

今回の計算では堆積したすすの温度はフィルター温度 (T_w) と同じであるとした。フィルター内部において、①すすは酸素と反応し燃焼する、②気相中で燃焼しなかったすすはフィルター表面に堆積する、③堆積したすすはフィルター表面で燃焼する、の3つの過程を考慮することで連続再生式フィルターを模擬している。なお、本システムには触媒を用いていない。反応は一段不可逆反応とし、反応速度は Lee らが提案している式を用いた⁽²¹⁾。すすの堆積過程については次節で説明する。

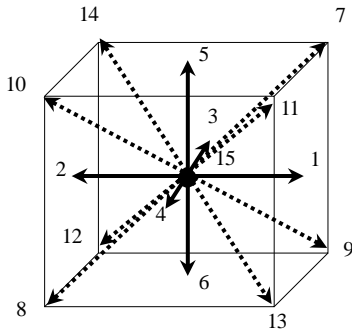


Fig. 2 Velocity directions in d3q15 model

2・2 すず堆積の計算方法 すず堆積の計算方法はすでに報告しているので、ここでは簡単に説明する (図 3)⁽¹⁸⁾。本解析では、気流中のすすは気相のすす、堆積したすすは固相のすすとしている。堆積し始めた時間 IT_1 (IT はタイムステップ) においてはフィルター壁の隣の点が堆積箇所であり、堆積したすす濃度の和 (Y_{cs}) が 1 未満の点には、流体が進入できるものとする。流れによりすすが堆積箇所に輸送され、運ばれてきたすすのうち P_D (堆積割合) の割合のすすは堆積し、 $(1-P_D)$ の割合のすすは堆積せずに撥ね返って再度流れにより輸送される。ただし、すす層の流れによる剥離は考慮しない。時間がたつにつれ、堆積したすす濃度が増え、やがてあるタイムステップ IT_2 で堆積したすす濃度の和 (Y_{cs}) が 1 になる。このフィルター壁 (あるいはすす層) 近傍のすす濃度が 1 となった点は、次のタイムステ

ップ (IT_{2+1}) から気相ではなく固相のすす層に設定される。そして、堆積箇所は IT_2 で設定されたすす層の1つ隣の点に移る。このようにして、すすの堆積層が成長していく。

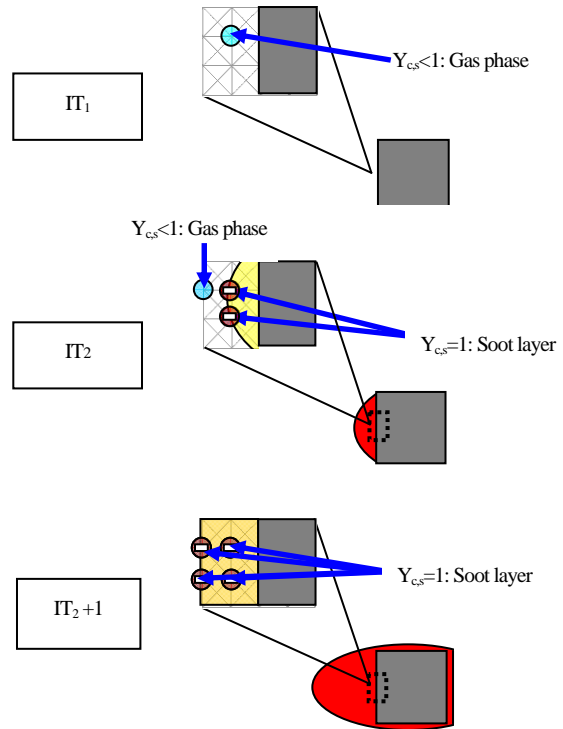


Fig. 3 Soot deposition model

2・3 フィルターの構造と境界条件 実際のフィルター内部の流れを解析するために、3次元 X 線 CT 法によりフィルターの内部構造を取得した (図 4)。フィルターには、高い熱耐久性があり航空宇宙分野で広く用いられている炭素繊維を用いた。厚さ (L) は 3.1mm である。解像度は $13.3\mu\text{m}/\text{pix}$ であり、点線で示したフィルターの一部を計算に用いた。

本解析で用いた座標系および計算領域を図 5 に示す。座標系は、排ガスがフィルターを通過する流れの方向およびそれに垂直な2つの方向の座標系を (X, Y, Z) とし、それに対応する速度成分を (u, v, w) とした。計算領域の大きさは X 方向 (流れ方向) 5.19mm, Y 方向と Z 方向に 0.53mm とし、計算格子は 391(X) \times 41(Y) \times 41(Z) である。フィルターを流路中央に配置し、その前後には助走区間を設けた。

次に、境界条件について説明する。図 5 に示した流路の上下左右側面は対称境界として Slip 境界を適用し、出口は圧力一定 (大気圧) の自由流出境界とした。また、フィルター表面とすす層表面の境界条件には、流速がゼロになる Non-Slip の境界条件を用いた⁽¹⁷⁾。これにより、すす堆積の進行に伴い、流れが

変化することになる。排ガスの条件としては、入口から温度 400°C 、質量分率 0.01 のすすを含んだ混合気が速度 1.0m/s で流入する。混合気の酸素濃度やフィルター温度 (T_w) を $800\sim 1400^{\circ}\text{C}$ で変化させた。酸素濃度は排ガス中の代表的な値として質量分率 0.113 (体積濃度 $10\%^{(20)}$) と空気の 0.233 (体積濃度 21%) の二つを用いた。

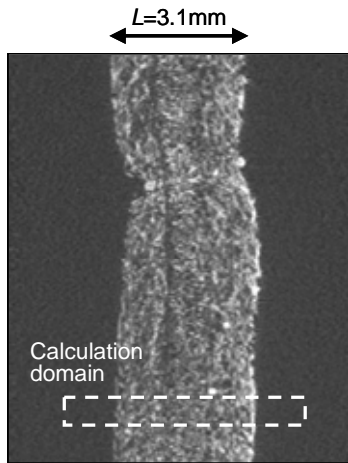


Fig.4 Structure of DPF obtained by 3D X-ray CT technique

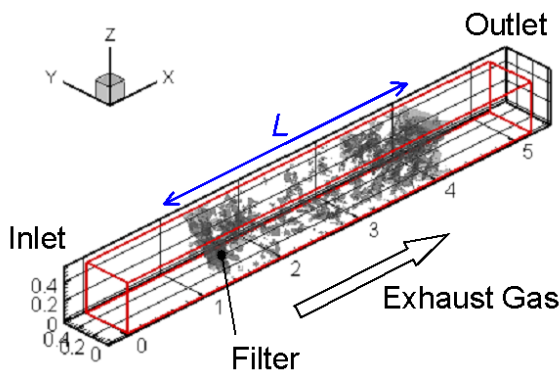


Fig.5 Coordinate and calculation region

3. 解析結果および考察

3.1 堆積を考慮しないときの燃焼場 まず、すすの堆積を考慮しない場合、気相中において流入したすすがどの程度焼却処理 (酸化処理) されるかを検討した。図 6 は計算開始から 10ms 後の気相のすす濃度、温度、反応速度の分布である。このときフィルター温度 (T_w) は 800°C 、酸素の質量分率 0.113 であり、計算領域の中央 XY 断面で得られた分布を示した。これによると、 $T_w=800^{\circ}\text{C}$ では気相のすすはほとんど燃焼していないことがわかる。また、反

応速度分布をみると、すすがわずかに燃焼しているものの、焼却処理されずにフィルター出口から排出されるすすがかなりあることがわかる。比較のため $T_w=1400^{\circ}\text{C}$ でのすす濃度場と反応速度場を計算した結果を図 7 に示す。これによると、反応速度はフィルター入口付近で非常に大きな値を示した。また、フィルター出口におけるすす濃度がほぼゼロであったことから、排ガス中のすすはフィルター内部で十分焼却処理されていることがわかる。

ここで、排ガス中のすすを完全に処理する条件について検討した。 $T_w=800, 1200, 1400^{\circ}\text{C}$ とし、異なる酸素濃度 $Y_{\text{O}_2}=0.113, 0.223$ において得られた計算結果を図 8 に示す。これらは十分計算が進み、分布がほぼ定常状態となった場合の結果であり、YZ 断面の平均すす濃度分布を示している。 $1.05\text{mm} < X < 4.15\text{mm}$ の点線で挟まれた領域にフィルターが存在する。 $T_w=800^{\circ}\text{C}$ では酸素濃度を高くしても流入する気相のすすがほとんど未反応のままフィルター出口より排出されている。一方、 $T_w=1400^{\circ}\text{C}$ にすればすすはフィルターを通過する間に焼却できることがわかった。また、酸素濃度を増やすことによって反応が促進され、すすが早い段階で減少することがわかる。以上により、フィルター温度と酸素濃度によって処理できる気相中のすす量に上限があることがわかった。

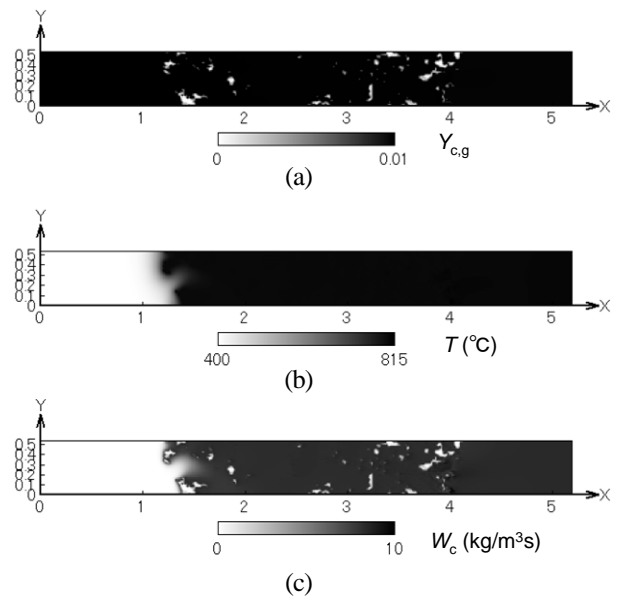
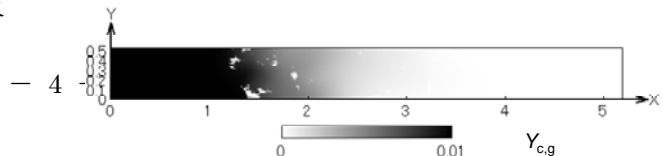


Fig. 6 Distribution of (a) soot mass fraction in gas phase, (b) temperature, (c) reaction rate; $t = 10\text{ms}$, $T_w=800^{\circ}\text{C}$, $Y_{\text{O}_2}=0.113$



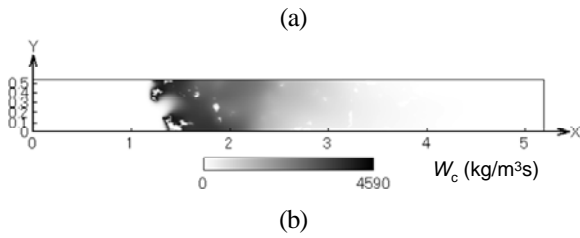


Fig. 7 Distribution of (a) soot mass fraction in gas phase, (b) reaction rate; $t=10\text{ms}$, $T_w=1400^\circ\text{C}$, $Y_{\text{O}_2}=0.113$

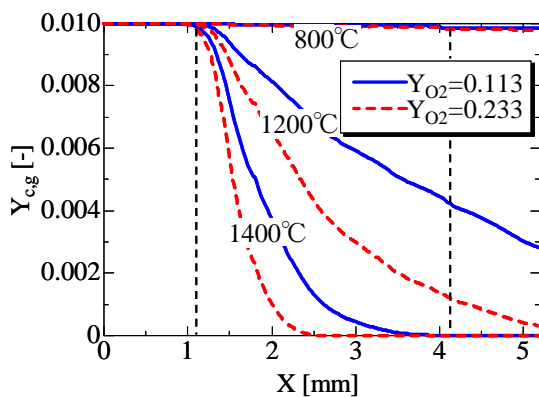


Fig. 8 Soot mass fraction in gas phase; $t=10\text{ms}$

3.2 すず堆積過程を考慮した燃焼場 次に、すずの燃焼と堆積を同時に計算した。この場合、既に説明したように、すずが高温のフィルター内部に流入し、気相中で燃焼しなかったすずがフィルター表面に堆積する。フィルター温度 (T_w) を変化させて燃焼場を調べた。酸素の質量分率が 0.113、計算開始から 10ms 後の結果について検討する。まず、図 9 にフィルター温度が 800°C での結果を示す。図中の XY 断面は気相のすず濃度分布を表し、計算領域内部の黒い領域は堆積した固相のすず、灰色の領域はフィルターを表している。この図から、すずがフィルター内部で堆積と燃焼により減少していること、また、主にフィルター入口付近ですずが堆積していることがわかる。

さらに詳しく検討するため、計算領域中央の XY 断面における、気相のすず濃度 (Y_{cg})、温度場、堆積した固相のすず濃度 (Y_{cs})、反応速度の分布を図 10 に示す。図 10(a)の気相のすず濃度の分布を見ると、フィルター出口では濃度がほぼ 0 になっている。図 8 の結果から $T_w=800^\circ\text{C}$ では気相のすずはほとんど燃焼しないことがわかっているため、すず濃度の減

少は主にすずの堆積によるものであることがわかる。一方、図 10(b)の温度分布において、すずの燃焼反応によってフィルター内部の温度が 25°C 程度上昇することがわかった。図 10(c)と図 10(d)から、特にフィルター表面で反応速度が大きいことがわかる。これは、フィルター表面にすずが堆積すると濃度が高くなるため、その部分での反応速度が大きくなるからである。したがって、フィルター温度 800°C では気相中のすずがまず堆積し、その後燃焼することがわかった。

比較のため、フィルター温度を 1400°C としたときの堆積した固相のすず濃度 (Y_{cs})、反応速度の分布を図 11 に示す。図 10(c)と比べて、堆積箇所はフィルター入口付近に限られていることがわかる。反応速度をみると、 1400°C では 800°C に比べて非常に大きな値を示し、その最大値は 100 倍以上となった。また、フィルター出口でのすず濃度は完全にゼロとなっている。したがって温度 1400°C では、気相中のすずだけでなく堆積したすずも燃焼し、流入するすずを全てフィルター内で焼却処理できることがわかった。

今回の排ガス処理システムにより堆積したすずを連続で再生するためには、フィルター内部で燃焼するすず量が流入する排ガス中のすず量を上回る必要がある。そこで、フィルター内部におけるすずの堆積量と燃焼量について調べた。すずの堆積を考慮した場合としない場合の結果を比較した。 $T_w=800, 1200, 1400^\circ\text{C}$ とし、YZ 断面の気相の平均すず濃度を調べた $t=10\text{ms}$ の結果を図 12 に示す。酸素濃度は $Y_{\text{O}_2}=0.113$ とした。これによると、堆積を考慮しない場合、 $T_w=800^\circ\text{C}$ ではすずはほとんど焼却されてお

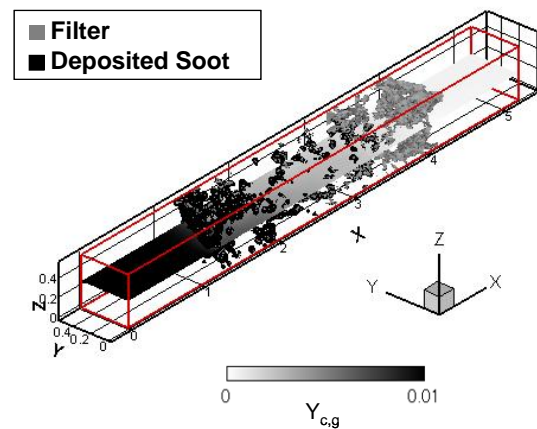


Fig. 9 Soot distribution in the filter; $t=10\text{ms}$, $T_w=800^\circ\text{C}$, $Y_{\text{O}_2}=0.113$

らず、この条件では堆積によってすず濃度が減少し

ていることがわかる。したがって、流入するすすがフィルター内に堆積し、やがてフィルターが目詰まりすることになる。ただし、 $Y_{O_2}=0.233$ （酸素の体積濃度 21%）とすると、フィルター出口のすす濃度が完全にゼロとなった。

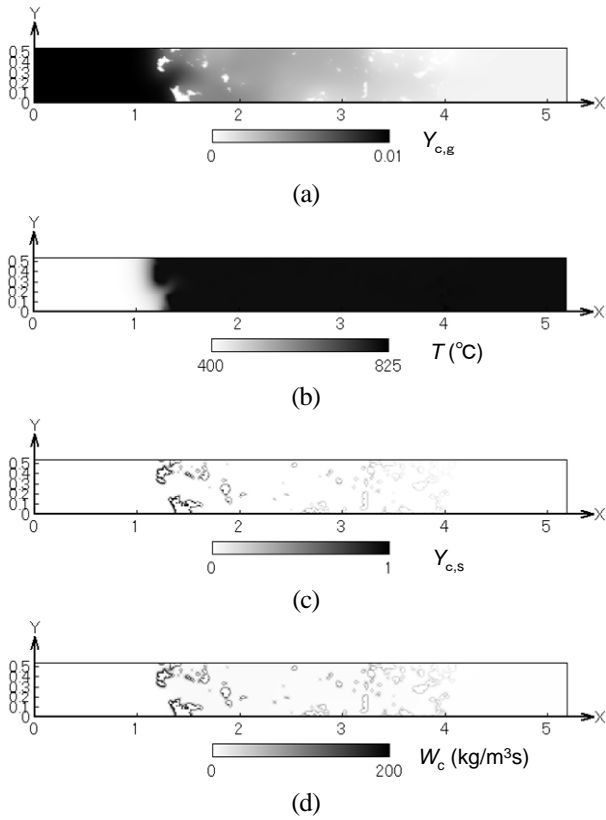


Fig. 10 Distributions of (a) soot mass fraction in gas phase, (b) temperature, (c) accumulated soot mass fraction, (d) reaction rate; $t = 10\text{ms}$, $T_w = 800^\circ\text{C}$, $Y_{O_2} = 0.113$

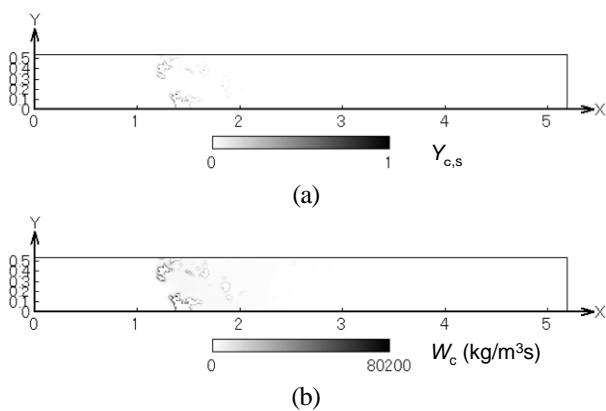
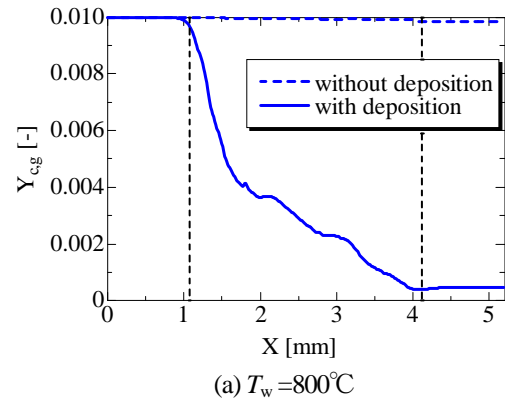


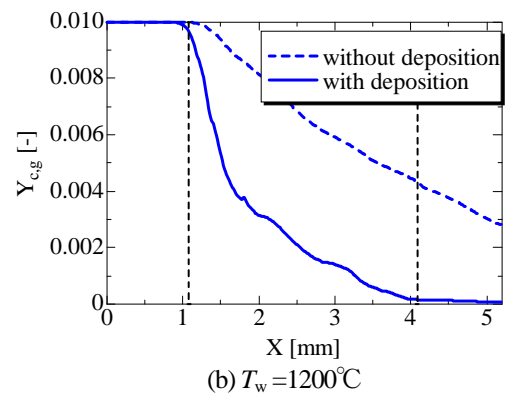
Fig. 11 Distribution of (a) accumulated soot, (b) reaction rate; $t = 10\text{ms}$, $T_w = 1400^\circ\text{C}$, $Y_{O_2} = 0.113$

一方、 T_w が高温になるほどすすの燃焼量が増え、

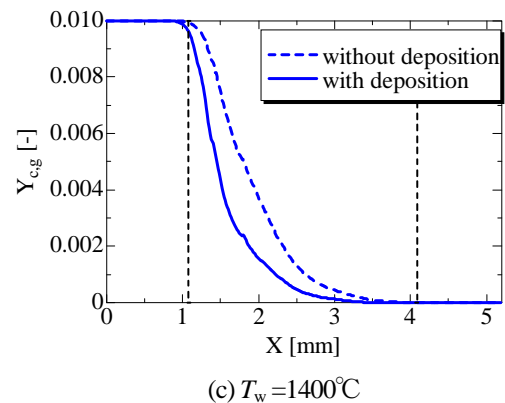
フィルター内部のすす濃度が急激に減少する。図 8 によれば、酸素濃度による違いは見られるものの、すすの堆積過程を考慮しない場合、出口すす濃度がゼロとなるにはフィルター温度が 1200°C 以上必要であった。以上により、連続再生式ディーゼルフィルターを正確に模擬するためには、気相の燃焼だけでなく堆積したすすが燃焼する過程を考慮する必要があるといえる。



(a) $T_w = 800^\circ\text{C}$



(b) $T_w = 1200^\circ\text{C}$



(c) $T_w = 1400^\circ\text{C}$

Fig. 12 Soot mass fraction in gas phase; $t = 10\text{ms}$, $Y_{O_2} = 0.113$

次に、堆積を考慮した 3 つの結果を比較する。

1mm<X<1.5mm のフィルター入口付近では T_w によらずすす濃度の減少傾向はほぼ同じであった。したがって、この領域では主に堆積によって気相中のすす濃度が減少しているものと思われる。一方、1.5mm<Xにおいては T_w が高くなるほど早い段階ですすが減少した。また、酸素濃度が高い条件では、 T_w が800°C以上で連続再生が可能であることを確認した。

今回のシミュレーションでは、フィルターの温度を800°Cから1400°Cに設定したが、ヒータだけでなく堆積した微粒子の燃焼熱も利用することができるため、常にヒータの加熱を最大にする必要はなく、燃費への影響はそれほど大きくないと思われる。今後流入するすす濃度を変化させて、連続再生に必要なフィルター温度などの条件について検討する予定である。

4. 結 論

本研究では、X線CT法により得られた実際のフィルターの内部構造を用いて、格子ボルツマン法により触媒フリーの連続再生式ディーゼルフィルターの解析を行った。特に堆積を考慮した場合としない場合を比較することで、フィルター内部におけるすすの堆積量と燃焼量を評価した。その結果、以下の結論を得た。

1. 高温のフィルター内部で焼却できるすす量を調べたところ、フィルター温度と酸素濃度によって焼却処理できるすす量に上限があることがわかった。また、酸素濃度を高くすることで、すすの燃焼が促進される。
2. フィルター温度が低いと、気相中ではすすがほとんど燃焼しない。堆積を考慮するとすすはフィルター内で吸着・除去されるが、やがてフィルターが目詰まりする。
3. 酸素濃度を高くすると、気相中で燃焼しなかったすすはフィルター表面に堆積して燃焼するため、フィルター温度800°C以上で連続再生が可能となる。

本研究の一部は、(独)科学技術振興機構・地域イノベーション創出総合支援事業・平成21年度シーズ発掘試験により行われた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Kajiwara, M. Ed., *Particle removal technologies of diesel car exhaust gas*, CMC Publishing Co., Ltd., (2001), pp.217-227.
- (2) Timo, D., Uwe, J., Manfred, P., A CFD-model describing filtration, regeneration and deposit rearrangement effects in gas filter systems, *Chemical Engineering journal*, 135 (2008), pp. 49-55.
- (3) <http://www.wa.commufa.jp/skcvd/>
- (4) Yokota, H., Koyano, S., Asaumi, Y. and Fukuoka, S., Application of Diesel Particulate Filter to heavy duty diesel truck (1), *Japan Society for Atmospheric Environment*, 34 (4) (1999), pp. 299-309.
- (5) Wehner, B., Uhmer, U., Lewis, S., Zallinger, M. and Widensohler, A., Aerosol number size distributions within the exhaust plume of a diesel and gasoline passenger car under on-road conditions and determination of emission factors, *Atmospheric Environment*, 43 (2009), pp. 1235-1245.
- (6) Yamamoto, K., Takada, N. and Misawa, M., Combustion Simulation with Lattice Boltzmann Method in a Three-dimensional Porous Structure, *Proceeding of Combustion Institute*, Vol.30 (2005), pp. 1509-1515.
- (7) Ochi, F., Yamamoto, K. and Yamashita, H., Simulation on Flow in Porous Media with Soot Deposition, *Journal of Japan Society of Fluid Mechanics*, Vol. 24, No. 5, (2005), pp. 535-541.
- (8) Yamamoto, K. and Ochi, F., Soot Accumulation and Combustion in Porous Media, *Journal of Energy Institute*, Vol. 79, No. 4, (2006), pp. 195-199.
- (9) Yamamoto, K., Satake, S., Yamashita, H., Takada, N. and Misawa, M., Lattice Boltzmann Simulation on Porous Structure and Soot Accumulation, *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 72, (2006), pp. 257-263.
- (10) Yamamoto, K. and Takada, N., LB Simulation on Soot Combustion in Porous Media, *Physica A*, 362, (2006), pp. 111-117.
- (11) Yamamoto, K., Oohori, S., Yamashita, H. and Daido, S., Simulation on Soot Deposition and Combustion in Diesel Particulate Filter, *Proceeding of Combustion Institute*, Vol. 32 (2009), pp. 1965-1972.
- (12) Hou, S., Shan, X., Zou, Q., Doolen, G. D. and Soll, W. E., Evaluation of Two Lattice Boltzmann Models for Multiphase Flows, *Journal of Computational Physics* 138, (1997), pp. 695-713.
- (13) 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.
- (14) Inamuro, T., Yoshino, M. and Ogino, F., Lattice Boltzmann Simulation of Flows in a Three-dimensional Porous Structure, *International Journal for Numerical Method in Fluids*, Vol.29, (1999), pp. 737-748.
- (15) Inamuro, T., *Busseiron kenkyu*, 77-2, (2001), 197-232.
- (16) Qian, Y. H., D'Humie'res, D. and Lallemand, P., Lattice BGK Models for Navier-Stokes Equation, *Europhysics Letters*, 17, (1992), pp. 479-484.
- (17) Zou, Q. and He, X., On Pressure and Velocity Boundary Conditions for The Lattice Boltzmann BGK Model, *Physics of Fluids*, 9, (1997), pp. 1591-1598.
- (18) Oho, S., Yamamoto, K., Yamashita, H. and Daido, S., Numerical Simulation on Flow with Soot Deposition in Diesel Particulate Filter, *Japan Society for Mechanical Engineers*, Vol. 75, No. 750, (2009), pp. 370-377.

- (19) Yamamoto, K., He, X. and Doolen, G. D., Simulation of Combustion Field with Lattice Boltzmann Method, *Journal of Statistical Physics*, Vol.107, Nos.112, (2002), pp. 367-383.
- (20) Oi-Uchisawa, J., 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.
- (21) Lee, K. B., Thring, M. W. and Beer, J. M., On the Rate of Combustion of Soot in a Laminar Soot Flame, *Combustion and Flame*, Vol.6, (1962), pp.137-145.
-