

DPF 内のすす堆積を考慮した流れの数値解析

大堀晋也^{*1}, 山本和弘^{*2}
山下博史^{*2}, 大道重樹^{*3}

Numerical Simulation on Flow with Soot Deposition in Diesel Particulate Filter

Shinya OHORI, Kazuhiro YAMAMOTO^{*4},
Hiroshi YAMASHITA and Shigeki DAIDOU

^{*4}Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan

Recently, more strict diesel particulate emissions standards have been setting in many countries. A diesel particulate filter (DPF) has been widely used as for the after-treatment of exhaust gas. Since DPF filling causes pressure drop, it is necessary to use the filter with low pressure drop. Then, it is important to examine pressure change due to soot deposition inside the real filter. In this study, we conducted numerical simulation on flow with soot deposition by the Lattice Boltzmann method to observe the relation between soot deposition process and pressure drop during DPF filling. The inner structure of the cordierite filter was obtained by an Xray CT technique. Results show that there are several soot deposition processes when the soot is attached to the filter wall. Interestingly, based on the pressure change rate to accumulated soot, soot deposition process can be distinguished.

Key Words : Diesel Engine, Porous Media, Computational Fluid Dynamics, Lattice Boltzmann Method

1. 緒 論

バスやトラックなどのディーゼル車は、ガソリン車に比べて熱効率が高く CO₂ の削減につながることから、ディーゼル車の利用は不可欠である。しかしながら、排気ガス中に含まれる粒子状物質 (Particulate Matter, PM) や NO_x は環境や人体に悪影響を及ぼすことが指摘されている。PM は炭素質の固体粒子が主体であるが、これに加えて可溶性有機成分や燃料中の硫黄分に起因する硫酸塩が含まれる。特に、直径 100nm 以下の超微粒子、さらには

数~50nm のいわゆるナノ粒子の有害性が指摘されている^①。その対策の一つとして、排気ガスの後処理技術の開発が進められ、近年 PM を吸着・除去する DPF (Diesel Particulate Filter) が実用化された。

一般に DPF はハニカム構造を持ち、その多数のチャンネル穴の出入り口は交互に目封じされている。DPF は自動車の排気管に装着され、排気ガスに含まれる PM をチャンネル内の多孔体構造を持つセラミックの側壁部分で捕集することによって排気ガスを浄化する。PM 捕集時の技術的課題として、フィルター内部に PM が堆積してフィルター前後の圧力差 (圧力損失) が増大する点が挙げられ、これによって燃費の悪化やエンジンの出力低下などが生じる^②。

DPF の圧力損失は、チャンネル出入口、チャンネル、側壁の 3 つの圧力損失の和で成り立っている^③。側壁における圧力損失が最も大きいため、圧力損失低

*原稿受付 2008 年 月 日。

^{*1}名古屋大学大学院 (〒464-8603 愛知県名古屋市中種区不老町)。

^{*2}正員, 名古屋大学大学院

^{*3}正員, 株式会社日本自動車部品総合研究所

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

減のためには、流体の挙動と合わせて数百マイクロメートル程の側壁にすすなどの微粒子がどのように堆積するかを明らかにすることが重要である。これまでに、実験で側壁表面を観察することにより、すす堆積の様子が調べられている⁽⁴⁾。また、PM 堆積過程とそれに伴う圧力変化の概念的な考察も行われている⁽⁵⁾。しかし、側壁内部という微小な領域での流れと圧力を計測することは難しい。したがって、数値解析を用いて内部の現象を可視化するとともに、流れ場について調べるのが有効である。

そこで本研究では、すす堆積過程と圧力損失の関係を明らかにするため、多孔体内の流れの解析に有効な格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method, LBM) を用いて DPF 内部のすす堆積に伴う流れ場を調べた。実際のフィルターの側壁を X 線 CT 法によって分析し、その内部構造を計算に用いて、側壁における圧力損失およびすす堆積過程について検討を行った。



Fig. 1 Photograph of diesel particulate filter

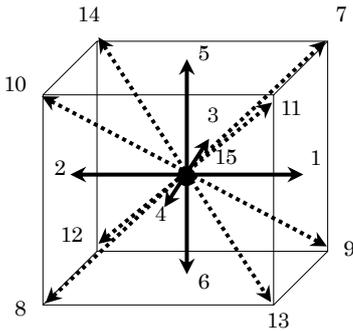


Fig. 2 Velocity directions in d3q15 model

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、格子ボルツマン法(LBM)について簡単に説明する⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾。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。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⁽¹⁰⁾ (図 2) を用いた。

次に計算方法について説明する。既に 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⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁶⁾で行っているため、詳細な説明は省略する。

一般的にすす堆積に伴って DPF の圧力損失が上昇することが知られているが⁽²⁾、この現象を模擬するためには、堆積したすす層による排気ガスの流れ場への影響を考慮する必要がある。そこで、すす層では摩擦力が排気ガスに働くとし、外力項を導入した格子ボルツマン方程式⁽¹⁷⁾を適用することで、この影響を考慮した。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。外力項を導入した格子ボルツマン方程式および局所平衡分布関数は、それぞれ式(1)および式(2)で与えられる⁽¹⁷⁾。

$$f_{p,i}(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \delta_t, t + \delta_t) - f_{p,i}(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{\tau_p} [f_{p,i}(\mathbf{x}, t) - f_{p,i}^{eq}(\mathbf{x}, t)] - \frac{\tau_p - 0.5}{\tau_p} F_i \quad (1)$$

$$f_{p,i}^{(eq)} = w_i \left\{ p + p_0 \left[3 \left(\frac{\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u}}{c^2} \right) + \frac{9}{2} \left(\frac{\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u}}{c^2} \right)^2 - \frac{3}{2} \left(\frac{\mathbf{u}}{c} \right)^2 \right] \right\} \quad (2)$$

ここで、 $w_i=1/9(i=1\sim6)$ 、 $1/72(i=7\sim14)$ 、および $2/9(i=15)$ 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。また、 p_0 は大気圧である。格子ボルツマン法における緩和時間 τ_p は、以下の式により動粘性係数 ν に対応する値を用いる。

$$\nu = \frac{2\tau_p - 1}{6} \frac{\delta_x^2}{\delta_t} \quad (3)$$

圧力 p 、速度 \mathbf{u} 、外力 \mathbf{f} と外力項 F_i は以下の式から求められる。

$$p = \sum_i f_{p,i} \quad (4)$$

$$\mathbf{u} = \sum_i \mathbf{e}_i f_{p,i} / p_0 + 0.5 \mathbf{f} \delta_t \quad (5)$$

$$\mathbf{f} = -\frac{\nu}{\kappa} \mathbf{u} \quad (6)$$

$$F_i = \frac{-3\mathbf{f} \cdot (\mathbf{e}_i - \mathbf{u})}{c^2} f_{p,i}^{(eq)} \quad (7)$$

ここで、 κ は透過する物体の透過率 Permeability である。すすの堆積層は、多くの空隙を持つ構造であることが報告されている。Konstandopoulos らによれば、すす層の透過率は側壁を通過する排気ガスの流速、すす粒子の一次粒子径およびすす粒子の凝集体の拡散係数で定義される Pe 数に依存するが、排気ガスの温度が 573K のとき、すす層への透過率の典型的な値としておよそ $2.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ となることが報告されている⁽¹⁸⁾。そこで、本研究ではすす層の透過率を $2.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ と与えた。

一方、すす堆積層を透過する流れを考慮しないときは、外力 \mathbf{f} をゼロとして解析を行った。この場合、すす堆積層で Non-Slip の境界条件⁽¹⁹⁾を用いることにより、流入前には一様な流れが変化する^{(13)~(15)}。

すす濃度は、流れ場と同様にすす濃度の分布関数をもとに求められる。その発展方程式と平衡分布関数をそれぞれ式(8)と式(9)に示す。

$$\begin{aligned} f_{c,i}(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \delta_t, t + \delta_t) - f_{c,i}(\mathbf{x}, t) \\ = -\frac{1}{\tau_c} [f_{c,i}(\mathbf{x}, t) - f_{c,i}^{(eq)}(\mathbf{x}, t)] \end{aligned} \quad (8)$$

$$f_{c,i}^{(eq)} = w_i Y_c \left[1 + 3 \left(\frac{\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u}}{c^2} \right) + \frac{9}{2} \left(\frac{\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u}}{c^2} \right)^2 - \frac{3}{2} \left(\frac{\mathbf{u}}{c} \right)^2 \right] \quad (9)$$

圧力と同様、式(10)を用いることですす濃度（質量分率）を求めることができる。

$$Y_c = \sum_i f_{c,i} \quad (10)$$

また、濃度場を計算するのに必要な緩和時間 τ_c については、流れ場を計算するのに必要な緩和時間 τ_p と同じ値を用いた。

2・2 すず堆積の計算方法 実際の粒子の吸着現象は、ブラウン拡散やさえぎり効果、重力、フィルター表面の物性などが影響するが⁽²⁰⁾、実際の PM の大きさを考慮すると、ナノメートルのスケールで

解析を行わなければならない、計算負荷は膨大なものとなる。そこで本解析では、濃度場が固相表面に接する境界において、すすの堆積割合 P_D を用いて粒子の壁面への吸着現象を模擬した。

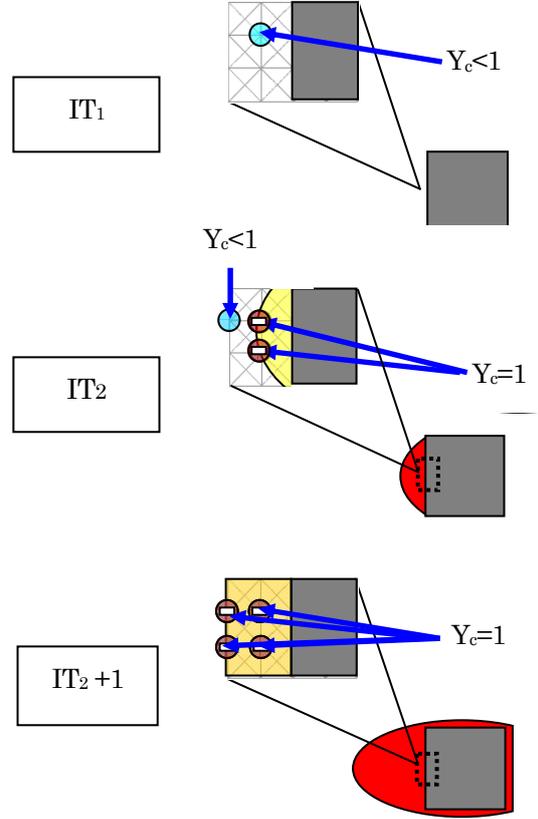


Fig. 3 Approach for soot deposition

すす堆積方法について図3で説明する。ある計算回数(IT_1)において壁に向かって進んできた濃度の分布関数は、(IT_1+1)においてフィルター壁あるいはすす堆積層の固相壁面で反射し、次のタイムステップ(IT_1+2)において堆積割合 P_D で衝突した点の一つ手前の格子点上に積算される。一方、 $(1-P_D)$ の割合の粒子は堆積せずに撥ね返って再度流れにより輸送される。このように分布関数を積算することにより、固相表面の格子点でのすす濃度を求める。すす層の設定方法については図3に示すように、固相表面の格子点ですす濃度の和が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、固相表面のすす濃度の和が初めて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すす層と設定される。次に、すす濃度の和が1に達したかを判定する格子点は、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

1つ手前の点とした。ただし、すす層の流れによる剥離は考慮しない。

2・3 フィルターの構造と計算領域 実際のディーゼルフィルター内部の流れを解析するために、3次元 X線 CT法により内部構造を分析した。得られたコーゼライトフィルターの画像を図4に示す。対象とした側壁の大きさは、X方向(流れ方向)400 μm \times Y方向 400 μm \times Z方向 200 μm である。その際の解像度は 1 $\mu\text{m}/\text{pix}$ である。この側壁データの一部分を数値解析に使用した。

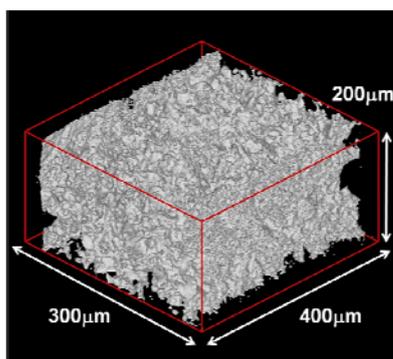


Fig.4 Structure of DPF obtained by 3D-CT technique

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、流れ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) 400 μm とし、Y方向とZ方向に 80 μm とした。画像の解像度は 1 $\mu\text{m}/\text{pix}$ であるため、計算格子数は X方向 401 \times Y方向 81 \times Z方向 81 となる。フィルター側壁を流路中央に配置し、その前後には助走区間を設けた。

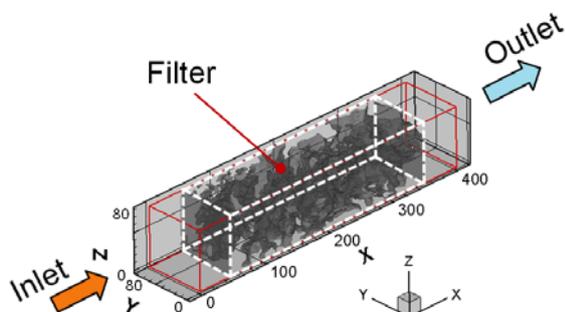


Fig.5 Coordinate and calculation region

次に、境界条件について説明する。入口では温度 573K(300 $^{\circ}\text{C}$)、質量分率 0.1 のすすを含んだ排気ガスを速度 1.0m/s で流入させた。図5に示した流路の

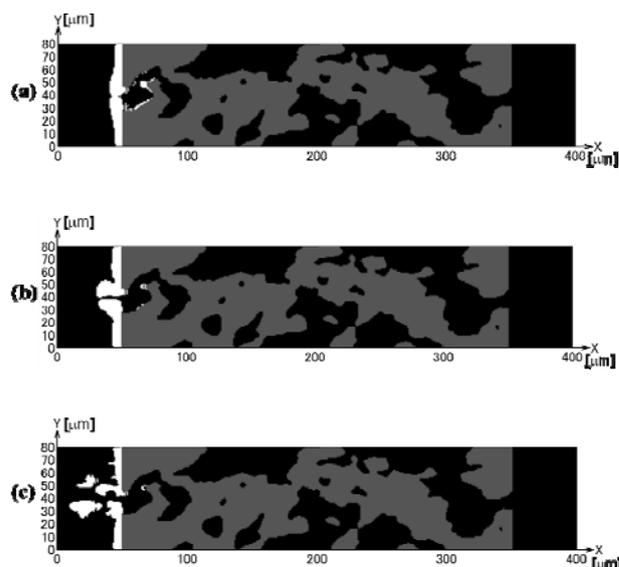
上下左右側面には対称境界として Slip 境界を適用し、出口は圧力一定(大気圧)の自由流出境界とした。

排気ガスのすす層への透過流れを考慮する場合は、すす層の各格子点では摩擦力が排気ガスに働くとして、すす層に外力項を導入した格子ボルツマン方程式を適用した。これにより、すす層内部の流れは摩擦力によって変化することになる。ただし、すす堆積層ではない気相においては外力項のない格子ボルツマン方程式を解く。

これまでの研究において、排気ガスのすす層への透過を考慮しない解析⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾はすでに行っている。したがって、すす層への透過を考慮しない解析結果と比較することで、すす堆積層の影響を調べた。すす層への透過を考慮しない場合、フィルター壁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。この場合も、フィルター表面においてすすが堆積していくと、流れや圧力が変化することがわかっている。

3. 解析結果および考察

3・1 すず堆積の可視化と圧力損失の変化 まず、すす堆積の可視化を行った。排気ガスのすす層への透過を考慮し、時刻 $t=34\mu\text{s}$ において得られたフィルター内の $Z=32\mu\text{m}$ の XY 断面分布を図6に示す。堆積割合 $P_D=0.1, 0.5, 1.0$ の結果である。これによると、 $X<100\mu\text{m}$ の範囲ですずが堆積することが分かる。



■ Gas phase ■ Filter wall □ Soot region

Fig.6 Profile of soot deposition area

(a) $P_D=0.1$, (b) $P_D=0.5$, (c) $P_D=1.0$

また、堆積割合 P_D を 0.1, 0.5, 1.0 におけるすす堆

積量の時間変化を求めた。その結果を図7に示す。ここで、図7の縦軸のすすの密度 ρ_s は式(11)のようにフィルター全容積あたりに堆積したすすの密度として求めた。

$$\rho_s = \frac{\rho_c \cdot V_s}{\alpha \cdot V_F} \quad (11)$$

ここで、 ρ_c は堆積したすす層の密度であり、カーボンブラックの値として 380kg/m^3 を用いた。 V_s は計算領域内に堆積したすす層の体積、 V_F は側壁体積、 α は側壁体積に対するフィルター容積(=側壁と流路の体積の和)の比である。これによると、堆積割合が小さいほど同じ時刻におけるすす堆積量は少なくなることがわかった。

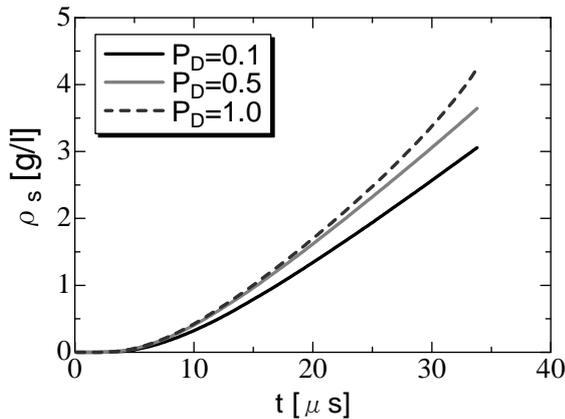


Fig.7 Accumulated soot in DPF

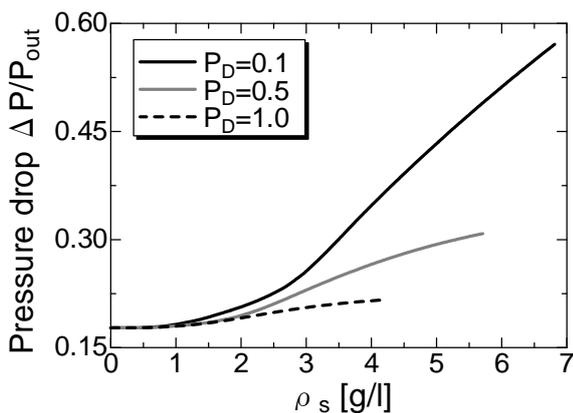


Fig.8 Accumulated soot and pressure drop

次に、それぞれの堆積割合 P_D におけるすす堆積量とフィルター前後の圧力差(圧力損失)の関係を調べた。その結果を図8に示す。横軸は堆積したすす堆積量 ρ_s を、縦軸はフィルター側壁前後の圧力損失を

示している。堆積割合 $P_D = 0.1$ では、圧力損失はすす堆積量が増えるにつれてはじめ緩やかに増大し、その後は変化の仕方がほぼ一定となった。堆積割合 $P_D = 0.5, 1.0$ についても $P_D = 0.1$ と同様の傾向を示した。

3・2 すず堆積過程とそれに伴う圧力損失の変化

本節では、すす堆積過程およびそれに伴う圧力損失の変化について検討を行う。Wirojsakunchai らは、図9のようにDPF内のPM捕集に伴う圧力損失の変化の概念的な検討を行っている⁶⁾。図9の右図は、DPF内の4つのPM捕集過程で、下から順に未捕集のDPF、基材の孔の表面上にPMが堆積する形態、細孔を塞ぐようにブリッジ状に堆積する形態、フィルター側壁の入口表面にすすが層状に小さな密度で堆積する形態を示している。図9の左図は横軸にすす堆積量を、縦軸にフィルター前後の圧力損失をとったものである。すすの堆積が進むにつれて圧力損失がどのように推移するかを示しており、図9の右図に示されるPM捕集過程との対応を検討している。これによると、未捕集のDPFの細孔を塞ぐようにブリッジ状に堆積し、細孔が塞がると圧力損失が大きく増大する。未捕集のDPFから基材の孔の表面上にPMが堆積する場合に比べて、基材の孔の表面上にPMが堆積して細孔を塞ぎ、ブリッジ状に堆積する場合の方が、圧力損失が大きくなるとしている。その後、フィルター側壁の入口表面に層状に堆積したすす層が単に厚くなる場合は、圧力損失の増大は直線的で緩やかに変化すると報告している。

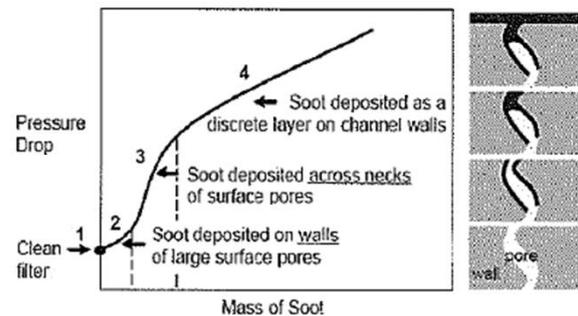


Fig.9 Conceptual model of pressure drop during DPF filling⁽⁶⁾

前節ではすす堆積量の増加に伴って圧力損失が上昇することがわかった。すす堆積過程を検討するため、図8において圧力損失が上昇し始める時刻、圧力損失の変化が最大の時刻、圧力損失の変化が緩や

かになった時刻でのすす堆積分布を図 10 に示す. それぞれ堆積割合 P_D が 0.1, 0.5, 1.0 において, $Z=32\mu\text{m}$ の XY 断面で $0\mu\text{m}<X<100\mu\text{m}$ の分布である. まず, 図 10(a)の 0.5g/l のすす堆積の様子を見ると, 側壁入口表面と側壁内部の孔表面に堆積していることが分かる. 図 10(b)の 3.4g/l のすす堆積の様子を見ると, 側壁入口表面と側壁内部にさらにすすが堆積していることが確認された. 側壁内部ではブリッジ状に孔を塞ぐような堆積の成長過程が見られ, このとき側壁入口では細孔の閉塞が生じた. さらに, 図 10(c)の 5.0 g/l のすす堆積の様子を見ると, 図 10(b)より側壁入口表面にのみ層状に堆積が進行した. 一方, 側壁内部では堆積がほとんど進行していないことがわかる. また, 堆積割合 $P_D=0.5, 1.0$ でも, すす堆積の進行に伴って側壁内部の孔表面への堆積過程, ブリッジ状に孔を塞ぐような堆積過程, 側壁表面への堆積過程が見られた. ただし, 堆積割合が大きいほど側壁内部へのすす堆積量は減少し, 側壁表面への堆積が進行した.

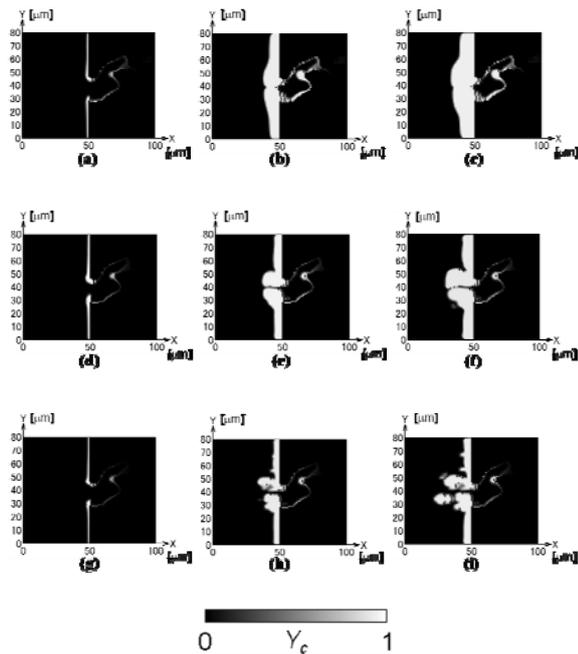


Fig.10 Profile of soot deposition area
 $P_D=0.1$: (a)0.5 g/l, (b)3.4 g/l, (c)5.0 g/l
 $P_D=0.5$: (d)0.6 g/l, (e)2.8 g/l, (f)4.0 g/l
 $P_D=1.0$: (g)0.4 g/l, (h)2.1 g/l, (i)3.0 g/l

次に, すす堆積過程とそれに伴う圧力損失およびその変化率の関係について検討した. 圧力損失の変化率は, すす堆積量に対する圧力損失の変化率として $d\Delta P/d\rho_s$ により求めた. ただし, 圧力は出口の圧

力で無次元化した. 図 11 に堆積割合 $P_D=0.1$ のときに得られた圧力損失およびその変化率の関係を示す. 図 10 によれば, いずれのすす堆積割合でもすすが堆積していくにつれて 3つの過程が観察されている. まず, (a)側壁内部の孔表面および側壁入口表面に堆積し, その後, (b)側壁内部で細孔を塞ぐようなブリッジ状の堆積が発達する. これにより, 堆積部位は上流に移り, やがて(c)入口の側壁表面への堆積のみが進行するようになる. そこで, 図 11 中に(a)~(c)としてそれぞれのすす堆積過程が確認できる区間を示した. これによると, すすの堆積が進むにつれてすす堆積量に対する圧力損失の変化率も上昇するが, その変化率が上昇し始める位置は側壁内部におけるブリッジ状の堆積が発達する過程に対応していた. 側壁入口におけるブリッジ状の堆積が発達する過程では, その変化率が最大となった. 一方, 側壁表面にのみ堆積する過程では圧力損失の増大が緩やかになり, その変化率は減少した. 通常フィルター内部の様子を観察することはできないが, すす堆積量に対する圧力損失の変化率を求めることで, すす堆積過程の変化をある程度推測できることが示唆された.

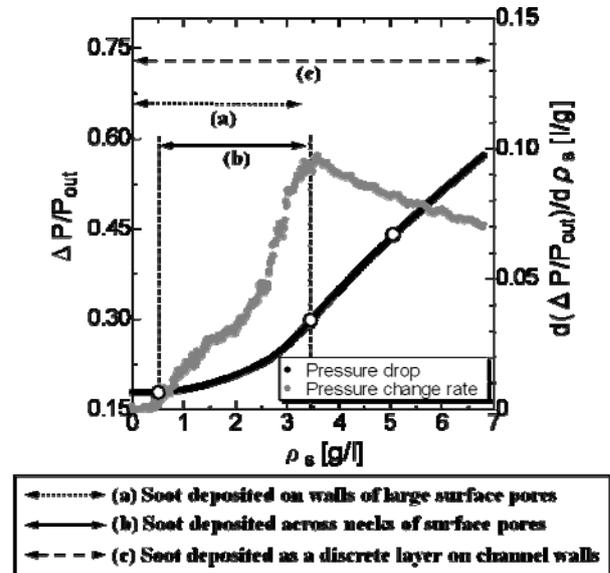


Fig.11 Soot deposition process, pressure drop and pressure change rate

3.3 透過の有無による圧力損失への影響 最後に排気ガスのすす層への透過を考慮する場合と考慮しない場合について調べ, 圧力損失および流れ場の違いについて検討した. 堆積割合 P_D を 0.1, 0.5, 1.0 とし, すす層を透過する流れの有無により得られた圧力損失の変化を図 12 に示す. ただし, 堆積割合が 0.1 における排気ガスのすす層への透過を考慮し

ない場合の圧力損失は、すす堆積によって細孔が閉塞されるまでの値を示した。これによると、全ての堆積割合 P_D において、すす堆積量が約 1.0g/l 以下ではほとんど差がないが、すす堆積量が増えるにつれて、排気ガスのすす層への透過を考慮した場合は圧力損失が小さくなることがわかった。

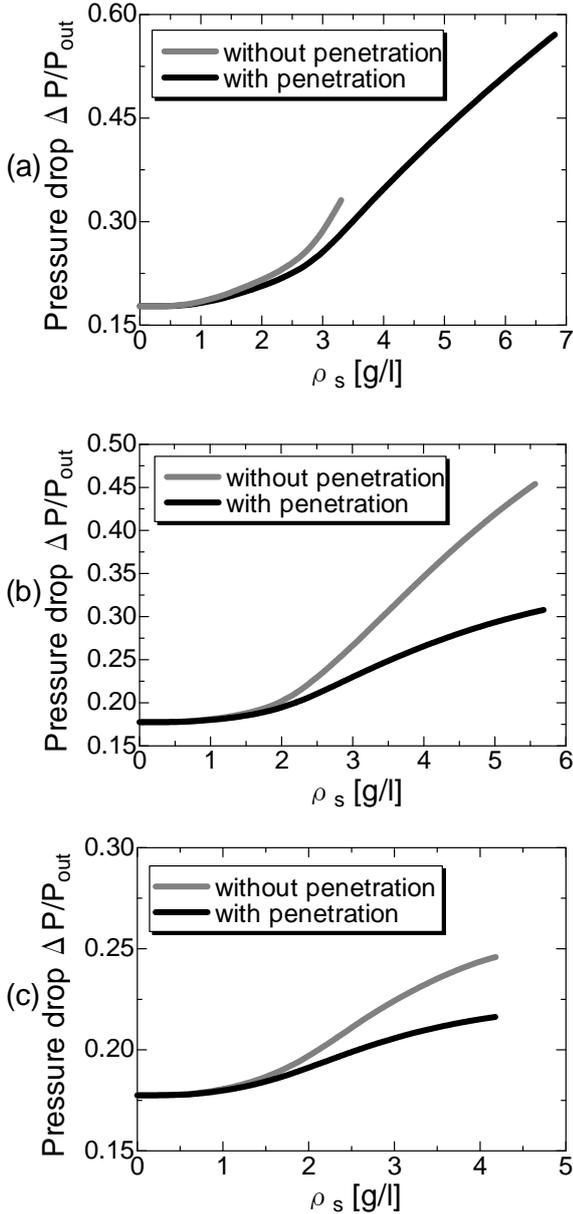
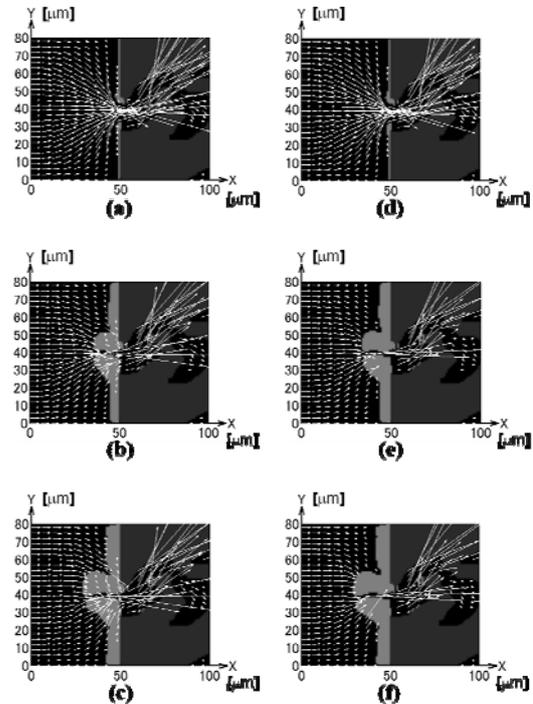


Fig.12 Accumulated soot and pressure drop with and without penetration.

(a) $P_D=0.1$, (b) $P_D=0.5$, (c) $P_D=1.0$

両者の違いについてさらに検討するため、堆積割合が 0.5 で排気ガスのすす層への透過を考慮した場合と考慮しない場合の流れの様子を調べた。図 13(a)~(c)がすす堆積層を透過する流れを考慮した場合、

図 13(d)~(f)は考慮しない場合の結果である。 $Z=32\mu\text{m}$ の XY 断面で $0\mu\text{m} < X < 100\mu\text{m}$ の流れ場の速度ベクトルをそれぞれ示している。黒色は気相、濃い灰色はフィルタ壁、薄い灰色はすす層を表しており、速度ベクトルは流入流速の大きさを基準とした。これによると、排気ガスのすす層への透過を考慮しない場合は、すす堆積が進行して細孔が狭められ、流れが狭まった細孔内に流れ込む様子が見られた。一方、排気ガスのすす層への透過を考慮すると、堆積初期ではすす層を避けて細孔の流れが通過するが、すす堆積が進行してさらに細孔が狭められるとすす層表面に一樣に流入した流れが細孔に流れ込むようになった。したがって、この流れの違いにより図 12 の圧力損失に大きな差が見られたものと思われる。



■ Gas phase ■ Filter wall ■ Soot region

Fig.13 Profile of soot deposition area with velocity vector.

with penetration : (a) 0.6g/l , (b) 2.8g/l , (c) 4.0g/l
without penetration : (d) 0.6g/l , (e) 3.1g/l , (f) 4.0g/l

4. 結 論

本研究では、実際のフィルターの側壁内部を X 線 CT 計測によって取得し、格子ボルツマン法によりフィルター内部における流れとすす堆積の数値解析を行なった。今回は特に、すす層を透過す

る流れの影響を明らかにし、すす堆積による圧力損失の変化について検討を行った。その結果、以下のような結論を得た。

1. すすは、まず側壁内部の孔表面および側壁入口表面に堆積し、その後、側壁内部で細孔を塞ぐようなブリッジ状の堆積が発達する。これにより、堆積部位は上流に移り、側壁内部への堆積は抑制されて側壁表面への堆積のみが進行するようになる。
2. すすの堆積が進むにつれて圧力損失は増大する。すす堆積割合 P_D を変化させたところ、 P_D が大きいほどすすの堆積領域は側壁表面に限定された。また、 P_D が小さいほど堆積量は少なくなる。
3. 排気ガスのすす層への透過を考慮しない場合は、排気ガスの流れは側壁にある細孔に限定される。すす層への透過を考慮すると流れが変化し、考慮しない場合に比べて圧力損失は大きく減少する。
4. すす堆積量に対する圧力損失の変化率を求めたところ、その値はすすの堆積が進行するにつれてゆるやかに増加するが、細孔を狭めるようなブリッジ状の堆積が発達する過程で急激に増大し、フィルター側壁表面にのみ堆積する過程では減少した。

文 献

- (1) Daisyo, Y. Ed., Measurement of nano particles and DEP and evaluation of effects on ecology, NITS INC., (2005), pp.5-7.
- (2) Igarashi, T. Diesel Exhaust Aftertreatment: PM Emission Control, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.59, No.4, (2005), pp.87-92.
- (3) Ishibashi, M. et al., New Technology for Controlling Micro-pores in Cordierite Diesel Particulate Filters, DENSO TECHNICAL REVIEW, Vol.11, (2006), pp.35-40.
- (4) Tsuruta, T. and Hanamura, K., Visualization Study of PM Trapping and Reaction Phenomena in Micro-Structural Pores through Cross Section of DPF Wall, *SAE paper*2007-01-0917.
- (5) Wirojsakunchai, E. et al., Detailed Diesel Exhaust Particulate Characterization and Real-Time DPF Filtration Efficiency Measurements During PM Filling Process, SAE paper 2007-01-0320.
- (6) Hou, S., Shan, X., Zou, Q., Doolen, G. D. and Soll, W. E., Evaluation of Two Lattice Boltzmann Models for Multiphase Flows, *J. Computational Physics* 138, (1997), pp. 695-713.
- (7) Filippova, O. and Hanel, D., Lattice-Boltzmann simulation of Gas-particle Flow in Filters, *J. Comput. Physics B*, Nos.1&2, (2003), pp. 197-200.
- (8) Inamuro, T., Yoshino, M. and Ogino, F., Lattice Boltzmann Simulation of Flows in a Three-dimensional Porous Structure, *Int. J. Num. Methods in Fluids*, Vol.29, (1999), pp. 737-748.
- (9) Inamuro, T., *Physicality research* 77-2, (2001), pp.197-232.
- (10) Qian, Y. H., D'Humie'eres. D. and Lallemand, P., Lattice BGK Models for Navier-Stokes Equation, *Europhys. Lett.* 17, (1992), pp. 479-484.
- (11) Yamamoto, K., Numerical Simulation on Flow in Porous Media with Combustion, *J. Japan Society of Fluid Mechanics*, Vol. 23, (2004), pp. 295-302.
- (12) Yamamoto, K., Takada, N. and Misawa, M., Combustion Simulation with Lattice Boltzmann Method in a Three-dimensional Porous Structure, *Proc. Comb. Inst.*, Vol.30, (2005), pp. 1509-1515.
- (13) Ochi, F., Yamamoto, K. and Yamashita, H., Simulation on Flow in Porous Media with Soot Deposition, *J. Japan Society of Fluid Mechanics*, Vol. 24, No. 5, (2005), pp. 535-541.
- (14) Yamamoto, K. and Ochi, F., Soot Accumulation and Combustion in Porous Media, *J. Energy Inst.*, Vol. 79, No. 4, (2006), pp. 195-199.
- (15) 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.
- (16) Yamamoto, K. and Takada, N., LB Simulation on Soot Combustion in Porous Media, *Physica A*, 362, (2006), pp. 111-117.
- (17) Hayashi, H. Solution method of Brinkman equation by Lattice Boltzmann Method, JSME 16th Computational Mechanics Conference, No.03-26 (2003), pp.125-126.
- (18) Konstandopoulos, A. G. and Skaperdas, E., Microstructural Properties of Soot Deposits in Diesel Particulate Traps, SAE paper 2002-01-1015.
- (19) Zou, Q. and He, X., On Pressure and Velocity Boundary Conditions for The Lattice Boltzmann BGK Model, *physics of Fluids*, (1997), pp. 1591-1598.
- (20) Hinds, W. C. Aerosol Technology Second Edition, (1999), p.198.