

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	六角形状セル構造フィルターにおけるディーゼル微粒子堆積に及ぼす Inlet/Inlet壁内バイパス流の影響
Title(English)	Effects of bypass flows through Inlet/Inlet walls on PM deposition in hexagonal channel diesel particulate filters
著者(和文)	中川 順達, 坂間 理, 渋谷 匠, 花村 克悟
Authors(English)	Masamichi NAKAGAWA, Satoru SAKAMA, Takumi SHIBUTA, Katsunori HANAMURA
出典(和文)	日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 858, p. 17-00412
Citation(English)	Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (in Japanese), Vol. 84, No. 858, p. 17-00412
発行日 / Pub. date	2018, 2

六角形状セル構造フィルターにおけるディーゼル微粒子堆積に及ぼす Inlet/Inlet 壁内バイパス流の影響

中川 順達^{*1}, 坂間 理^{*2}, 渋田 匠^{*3}, 花村 克悟^{*4}

Effects of bypass flows through Inlet/Inlet walls on PM deposition in hexagonal channel diesel particulate filters

Masamichi NAKAGAWA^{*1}, Satoru SAKAMA^{*2}, Takumi SHIBUTA^{*3} and Katsunori HANAMURA^{*4}

^{*1,*2,*4} Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Tokyo Institute of Technology
2-12-1-NE-5 Ohokayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

^{*3} Energy & Functional Materials Research Laboratory, Sumitomo Chemical Co., Ltd.
5-1 Sobiraki-cho, Nihama-shi, Ehime 792-8521, Japan

Received: 15 September 2017; Accepted: 14 January 2018

Abstract

Microscopic visualization experiments and simple numerical calculations using Darcy's law have been conducted for soot (PM) deposition in hexagonal channel diesel particulate filters (HEX DPFs) made of aluminum titanium oxide. In the HEX DPFs, a flow rate of the conventional wall-through flow crossing over a wall between inlet and outlet channels (an Inlet/Outlet wall) changes drastically during surface pore filtration, because a part of working gas with soot is distributed to an Inlet/Inlet wall as a bypass flow which is introduced into a wall between inlet and inlet channels (an Inlet/Inlet wall), then turning toward the direction parallel to its wall surface, and finally exiting into the outlet channel. In this case, the thickness of soot deposited on the surface of the Inlet/Inlet wall becomes thinner for the dependence on the distance from the outlet channel. On the other hand, during soot cake layer filtration, since the difference between both superficial flow velocities for Inlet/Inlet and Inlet/Outlet walls become smaller, growth rates of soot cake layers are almost uniform on both wall surfaces. Consequently, the thickness of soot deposited on the Inlet/Inlet wall has a distribution from the minimum height at the center of the channel width to the maximum around the edge.

Keywords : Particulate Matter (PM), Hexagonal Channel Diesel Particulate Filter (HEX DPF), Inlet/Inlet walls, Bypass flows, Soot (PM) deposit thickness distribution

1. 緒 言

ディーゼルエンジンは理論熱効率の高さから、石油資源の有効利用や二酸化炭素の排出量削減のため注目されている。しかし、ディーゼルエンジンの排ガス中に含まれる粒子状物質 (Particulate Matter : PM) は、人体の呼吸器系への悪影響が問題となる中で、その排出量の規制が強化されている。そのため、PM の排出量の低減が大きな課題となっている(斉藤, 2009)。

排ガス中に含まれる PM は、ディーゼルエンジンの後処理装置 (After-treatment device) の 1 つである Diesel Particulate Filter (DPF) によりろ過することによって、大気中への放出量を抑制されている。この PM 捕集過程は、次の 3 段階に分類できる。すなわち、第 1 段階において、DPF を構成する基材粒子 (グレイン) 間の微細な空孔内に、スス (PM) が局所的に堆積して樹状に成長し、やがてその樹状ススが架橋して空孔を塞ぐ。この過程において、DPF 前後の圧力損失が増大し始める。第 2 段階において、この架橋したススの上流側の空孔内にススが堆

No.17-00412 [DOI:10.1299/transjsme.17-00412], J-STAGE Advance Publication date : 29 January, 2018

^{*1} 正員, 東京工業大学 工学院 機械系 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-NE-6)

^{*2} 東京工業大学 工学院 機械系

^{*3} 住友化学 (株) エネルギー・機能材料研究所 (〒792-8521 愛媛県新居浜市惣開町 5-1)

^{*4} 正員, フェロー, 東京工業大学 工学院 機械系

E-mail of corresponding author: nakagawa.m.ac@m.titech.ac.jp

積する。この第1段階から第2段階へ移行する際に、急激に圧力損失が増大する。また、この移行期に捕集効率も100%に達する。ここまですら表面空孔捕集と称する。そして第3段階では、空孔の上流側、すなわち流入チャンネル内壁に様に堆積するケーキ層の形成が始まり、空孔内より排ガスの流速が低いいため、圧力損失の増加は穏やかになる。DPFにおけるこの一連の過程は、四角形セル構造 SiC 製 DPF において、走査型電子顕微鏡、FE-SEM (Field Emission-SEM) を用いた粒子スケール可視化実験によって初めて明らかにされている(Sanui and Hanamura, 2015) (Sanui and Hanamura, 2016)。

PM 捕集過程では、PM が DPF 壁面に蓄積し DPF の圧力損失が増大することにより、燃料消費量も増大する。そのため、一定量の PM を捕集する過程と、その後に PM を酸化除去する過程(再生過程)とを交互に繰り返す。この再生過程には2種類の方法がある。1つは、触媒を使い排ガス温度のみにより連続的に PM を酸化し除去する連続再生(Passive Regeneration)である。もう1つは、DPF の温度を上昇させるために燃料を使って排ガスの温度を上昇させ PM を酸化させる強制再生(Active Regeneration)である。実際には連続再生のみでは PM を完全に除去できず、強制再生との併用が一般的である。DPF を強制再生する場合、PM を蓄積したまま DPF を昇温させるために付加的な燃料を使うので、燃料消費量が増加する。よって、強制再生時の燃料消費量が少なく、かつ強制再生の頻度も少なくなる DPF が必要であると考えられる。強制再生の頻度を減少させるためには、多くの PM を捕集した状態における圧力損失が低く、かつ強制再生時の温度上昇が緩やかで耐熱衝撃性が高い DPF が必要になる(Shibuta et al., 2014)。

そこで本研究では、チタン酸アルミニウム(Aluminum titanate: AT)製の六角形状セル構造 DPF (Hexagonal DPF: HEX DPF)を用いた。HEX DPF は、再生過程における最高温度を低減できる可能性があり、耐熱衝撃性と再生効率が向上すると報告されている(根本他, 2011)。また、HEX DPF は図5に例示するように、1つの流出流路(Outlet)を6つの流入流路(Inlet)が取り囲む構造をしており、正方(正四角)形セル構造 DPF に比べて、ろ過面積を大きくできるため圧力損失が小さいことや、アッシュキャパシティ(Ash capacity: 再生過程時に DPF で酸化できず残留する PM の灰である Ash の収容能力)が増大する(根本他, 2011)ことから注目されている。しかし、PM の堆積過程および再生過程のメカニズムが必ずしも明確ではない。

その理由として、HEX DPF には、流入流路(Inlet)と流出流路(Outlet)が隣り合う壁面(Inlet/Outlet 壁面)だけでなく、流入流路同士が隣り合う壁面(Inlet/Inlet 壁面)が存在することが挙げられる。そのため、Inlet/Outlet 壁内を横断する普通のろ過流れに加え、Inlet/Inlet 壁内を壁表面と平行に流れるバイパス流が存在し、これら両者への流量配分により、Inlet/Inlet 壁表面と Inlet/Outlet 壁表面の PM 捕集量が異なることが報告されている(Shibuta et al., 2014) (中村他, 2015a) (Nakamura et al., 2015c)。

本研究では、特にバイパス流が通過する Inlet/Inlet 壁表面における PM 堆積の様子に注目した。Inlet/Inlet 壁内を壁表面と平行に流れるバイパス流は、流れるコースの距離によって圧力損失が大きく異なることが予想される。そこで本研究では、このことを考慮に入れた数値計算と可視化実験を行い、スス(PM)堆積過程をより詳細に明らかにしたので報告する。

2. 計算モデルおよび計算手法

図1に六角形状セル構造ディーゼル微粒子フィルター(HEX DPF)の計算モデルの概要を示す。この計算モデルは、中村らによるスス堆積シミュレーション(中村他, 2015b) (Nakamura et al, 2015c)の計算モデルに基づいて作成されている。計算領域には、六角形状セル構造の幾何学的対称性を利用して、計算の最小単位となる、左右を Inlet (流入流路)、下側を Outlet (流出流路)とする逆Y字形の三叉壁ユニットを考え、さらにその右半分の一点鎖線により囲まれた領域を対象とする。

特に本研究では、バイパス流による Inlet/Inlet 壁面のスス(PM)堆積厚さ分布に注目していることから、Inlet/Inlet 壁内を壁表面と平行に流れる複数のコース(流れ)を考える。ここで、DPF を構成する基材粒子(グレイン)径や空孔径が数十 μm オーダーであることから、Inlet/Inlet 壁を6等分、すなわち壁面に平行な中心線を対称軸としてその片側を3等分した流れを考える。その幅は、例えば Inlet/Inlet 壁厚さ 356 μm の場合、6等分した約 59 μm となる。

Inlet 流路から Outlet 流路へ壁面を垂直に横断する流れ (Inlet/Outlet 流れ) を流れ 1 と呼び、その空塔速度 (superficial velocity : 流路内に DPF 基材が存在しないと仮定したときの流速) を u_1 、流路長さは壁厚さ W 、六角形の 1 辺の長さを L とする。Inlet/Inlet 壁面内の流れ (バイパス流) を Outlet 流路から近い順に、流れ 21、流れ 22、流れ 23 と呼び、空塔速度をそれぞれ、 u'_{21} 、 u'_{22} 、 u'_{23} とする。この空塔速度により Inlet/Inlet 壁表面のスス堆積さおよび堆積した際の圧力損失が決定される。一方、Inlet/Inlet 壁に流入した気体は、図 1 に示した点線のような流線に沿って流れると考えられるが、ここでは簡易計算とするため、流入位置から Outlet 流路まで壁厚さ W を 6 等分した流路幅を真っ直ぐ流れると仮定する。この流れの空塔速度はそれぞれ、 $u_{21}=(L/W)u'_{21}$ 、 $u_{22}=(L/W)u'_{22}$ 、 $u_{23}=(L/W)u'_{23}$ と記述できる。これにより基材内部の圧力損失が決定される。

これらバイパス流と Inlet/Outlet 流れは、DPF 多孔質内の浸透流れであるから、ダルシー則 (Darcy's law) を適用できる。このとき、ダルシー則自体が速度ポテンシャルの定義式と同形式であるから、上述のバイパス流と Inlet/Outlet 流れは、形式上ポテンシャル流れと考えられる。例えば、実際の平均空孔径 $11\ \mu\text{m}$ 、空塔速度 $24\ \text{mm/s}$ 、すなわち空隙率により除して局所平均流速に換算すると $53.3\ \text{mm/s}$ 、作動ガス (実験では窒素ガス) の動粘性係数 $1.57 \times 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}$ を用いた場合、局所レイノルズ数は 0.037 と 1 よりも小さく、ダルシー則やポテンシャル流れの考え方を適用するには十分である。

なお、バイパス流における圧力勾配が、分割された各流れ (各コース) において異なるため、図 1 の流れは、左右対称な流れとはなるものの、実際には Outlet 流路に向かうにつれて 2 次元的なポテンシャル流れになると考えられるが、ここでは簡易計算のためこれらを考慮せず、1 次元流れと考える。さらに、時間と共にススの堆積厚さは変化するが、その圧力損失の変化は瞬時に計算領域の全域に伝わるものとして、その時間ステップごとにスス堆積厚に伴う定常状態の圧力損失が計算できるものとする。

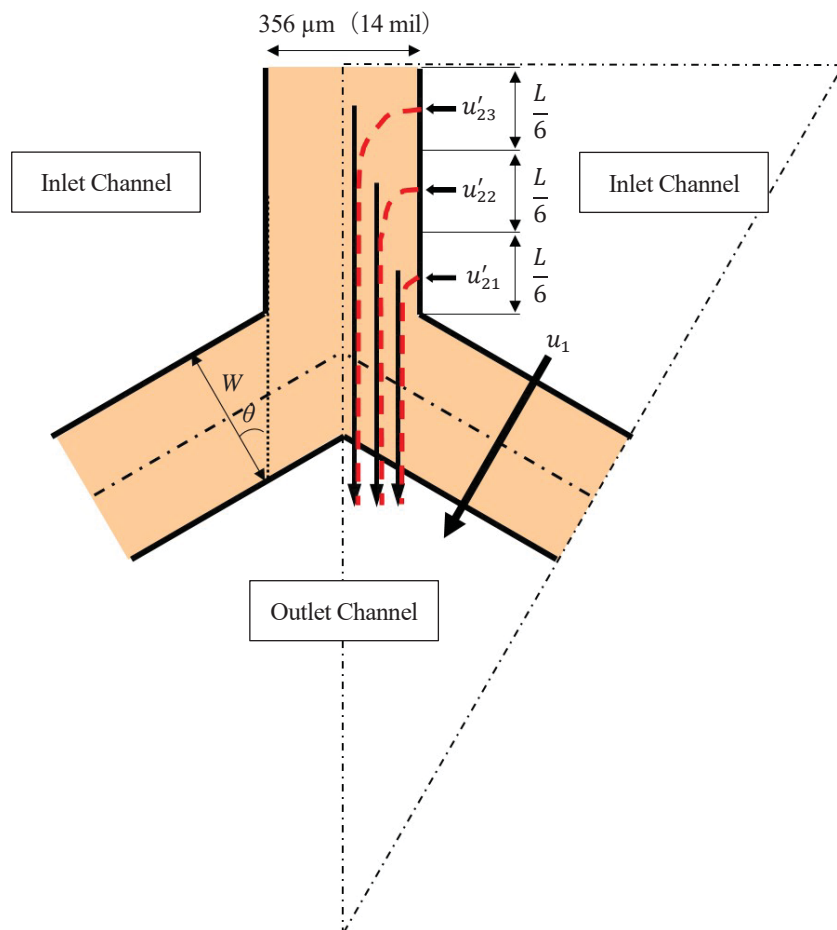


Fig.1 Schematic diagram of symmetrically minimum unit of the numerical calculation. The arrow lines show an Inlet/Outlet flow and three bypass flows for calculating the distribution of the thickness of soot (PM) deposition on both Inlet/Outlet and Inlet/Inlet walls. The dotted lines superposed on the arrow lines are approximate streamlines.

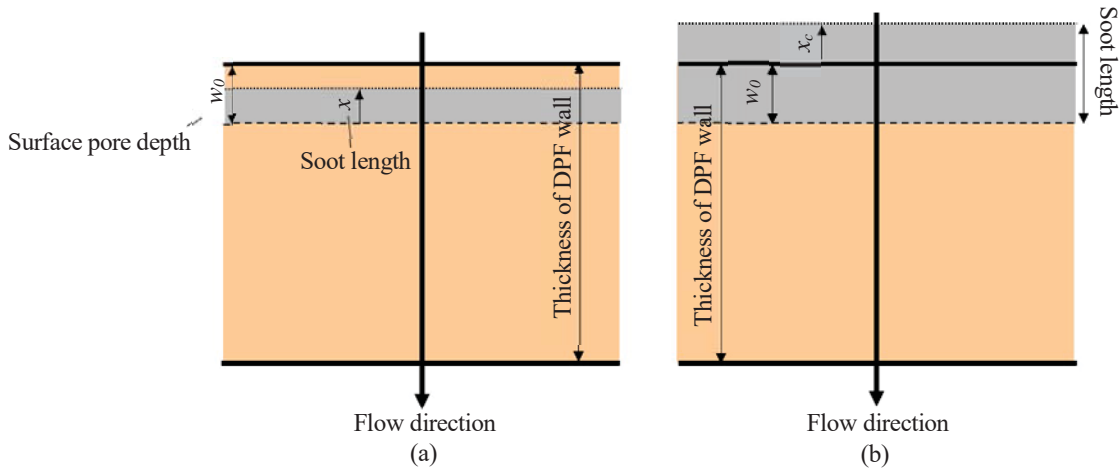


Fig.2 Model of soot (PM) deposition process. First, the soot (PM) is trapped inside the DPF wall, *i.e.* surface pore filtration (a), and then makes soot cake layer, *i.e.* soot cake layer filtration (b).

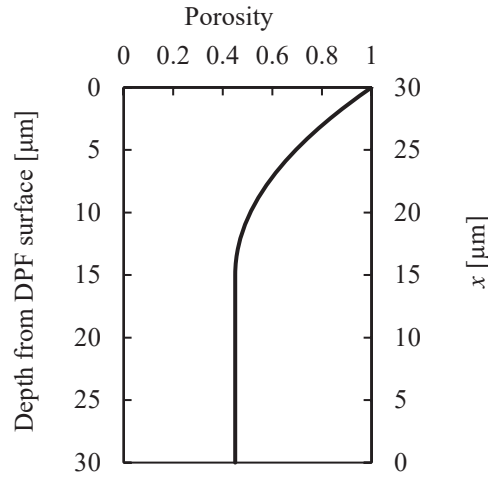


Fig.3 Porosity distribution along the depth of surface pore in the DPF. The upper axis shows porosity. The left axis shows the depth from the DPF surface and the right shows an axis from the origin where the deposition of soot starts. The function of porosity distribution is obtained from the data fitting among the previous results of experiments (Nakamura et al., 2015b in Japanese) (Nakamura, 2015c).

表面空孔におけるスス(PM)の堆積は、図 2(a)に示すように、表面空孔深さ w_0 を起点として開始するものとする。その位置をスス(PM)堆積厚さ x の原点とする。表面空孔内がススにより満たされると、図 2(b)に示すように、ススは DPF 壁表面にケーキ層として堆積する。このとき、壁表面を原点とした座標 x_c を用いる。なお、捕集開始の表面空孔深さは、空隙率分布を有する深さのおよそ 2 倍程度とする讃井らの実験結果(Sanui and Hanamura, 2015) (Sanui and Hanamura, 2016)から、深さ $30 \mu\text{m}$ と仮定されている。図 3 には、模擬された空隙率分布を示す。区間 $0 \leq x \leq 15 \mu\text{m}$ において、DPF 多孔質内の空隙率は 0.45 と一定である。一方、 $x = 15 \mu\text{m}$ において空隙率 0.45 、 $x = 30 \mu\text{m}$ (DPF 表面) において空隙率 1 、となるように 2 次関数を用いて表せば、空隙率変化は、以下の関数 $F(x)$ で書ける。

$$F(x) = 0.45 + (2.44 \times 10^9) (x - 15 \times 10^{-6})^2 \quad (15 \leq x \leq 30 [\mu\text{m}]) \quad (1)$$

$$F(x) = 0.45 \quad (0 \leq x \leq 15 [\mu\text{m}]) \quad (2)$$

時間 dt の間に表面空孔内に堆積するスス堆積厚さ dx , $dx_i (i=1, 2, 3)$ は、中村らの実験(中村他, 2015a) により得られた堆積係数 $\alpha (=4.5 \times 10^{-7})$, および空隙率変化に伴う局所流速 $u_1/F(x)$, $u'_{2i}/F(x_i) (i=1, 2, 3)$ を用いて、以下のように記述できる。ここで、 $x_i (i=1, 2, 3)$ は、Inlet/Inlet 壁表面における座標を示す。

$$dx = \alpha \frac{1}{F(x)} u_1 dt \quad (3)$$

$$dx_i = \alpha \frac{1}{F(x_i)} u'_{2i} dt \quad (i=1, 2, 3) \quad (4)$$

また、表面空孔が PM により満たされた後、時間 dt の間に堆積するケーキ層の PM 堆積厚さ dx_c , $dx_{ci} (i=1, 2, 3)$ は、それぞれ空塔速度を用いて、以下のように表せる。

$$dx_c = \alpha u_1 dt \quad (5)$$

$$dx_{ci} = \alpha u_{2i} dt \quad (i=1, 2, 3) \quad (6)$$

Inlet 流路から Outlet 流路へ通過する単位奥行き当たりの流量 Q は、2 章において述べたポテンシャル流れ（流線 [流れのコース] が互いに交差しない）を仮定すると、空塔速度と有効断面積から、以下のように表せる。

$$Q = \frac{L}{2} u_1 + \frac{W}{6} (u_{21} + u_{22} + u_{23}) \quad (7)$$

仮想的な流れ 1, 流れ 21, 流れ 22, 流れ 23 における Inlet から Outlet までの圧力損失をそれぞれ、 ΔP_1 , ΔP_{21} , ΔP_{22} , ΔP_{23} とし、ダルシー則を用いて計算する。各流路断面において DPF 内部の表面空孔にスス(PM)が堆積されている場合の圧力損失は、以下の式で表せる。

$$\Delta P_1 = \frac{\mu}{k} u_1 (W - x_0) + \frac{\mu}{k_{\text{soot}}} u_1 \int_0^x \frac{1}{F(x)} dx + \frac{\mu}{k} u_1 (w_0 - x) \quad (8)$$

$$\Delta P_{2i} = \frac{\mu}{k} u_{2i} \left\{ \frac{W}{\cos \theta} + \left(\frac{1}{12} + \frac{i-1}{6} \right) L \right\} + \frac{\mu}{k_{\text{soot}}} \frac{W}{L} u_{2i} \int_0^{x_i} \frac{1}{F(x)} dx + \frac{\mu}{k} \frac{W}{L} u_{2i} (w_0 - x_i) \quad (i=1, 2, 3) \quad (9)$$

ここで、 μ はガスの粘性係数、 k は DPF 基材の透過係数、 k_{soot} は PM の透過係数である。式 (8), (9) の右辺第 1 項は表面空孔以外の DPF 基材部分、第 2 項は表面空孔に PM が堆積した部分、第 3 項は表面空孔に PM が堆積していない基材による各圧力損失である。また、第 2 項において式 (3), (4) と同様に、 $u_1/F(x)$, $u_{2i}/F(x_i) (i=1, 2, 3)$ として、表面空孔内部のスス層に対する局所空塔速度を求めている。なお、PM の透過係数 k_{soot} は、ケーキ層堆積時の圧力損失の増加速度について、数値計算の結果と可視化実験の結果をフィッティングして求められる。その値は、 $1.42 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ である。

また、各流路断面の表面にケーキ層が形成された後の圧力損失は、以下の式で表せる。

$$\Delta P_1 = \frac{\mu}{k} u_1 (W - w_0) + \frac{\mu}{k_{\text{soot}}} u_1 \int_0^{w_0} \frac{1}{F(x)} dx + \frac{\mu}{k_{\text{soot}}} u_1 x_c \quad (10)$$

$$\Delta P_{2i} = \frac{\mu}{k} u_{2i} \left\{ \frac{W}{\cos \theta} + \left(\frac{1}{12} + \frac{i-1}{6} \right) L \right\} + \frac{W}{L} u_{2i} \int_0^{w_0} \frac{1}{F(x)} dx + \frac{\mu}{k_{\text{soot}}} \frac{W}{L} u_{2i} x_{ci} \quad (i=1,2,3) \quad (11)$$

ここで、 x_c 、 x_{c1} 、 x_{c2} 、 x_{c3} はケーキ層厚さである。式(10)、(11)の右辺第1項はDPF基材部分、第2項はPMにより満たされた表面空孔部分、第3項はケーキ層部分の各圧力損失である。さらに、InletとOutletの圧力差は、流れによらず共通のため、以下の条件が成り立つ。

$$\Delta P_1 = \Delta P_{21} = \Delta P_{22} = \Delta P_{23} \quad (12)$$

単位奥行き当たりの流量 Q を一定として、有限な時間間隔 dt を仮定し、時間ステップごとに以上の式を連立させて解くことにより、時刻 t における圧力損失、各流れの空塔速度、およびそれらの時間積算量としてPM堆積厚さが求められる。本研究では、この時間間隔を0.1秒として計算している。

3. 可視化実験装置および実験手順

図4に実験装置の概略を示す。本実験ではPMとして、カーボン電極間に放電することにより得られるススを用いている。スス発生器(PALAS社DNP-2000)から導入されたススは、窒素ガスと共にDPFに流入する。この

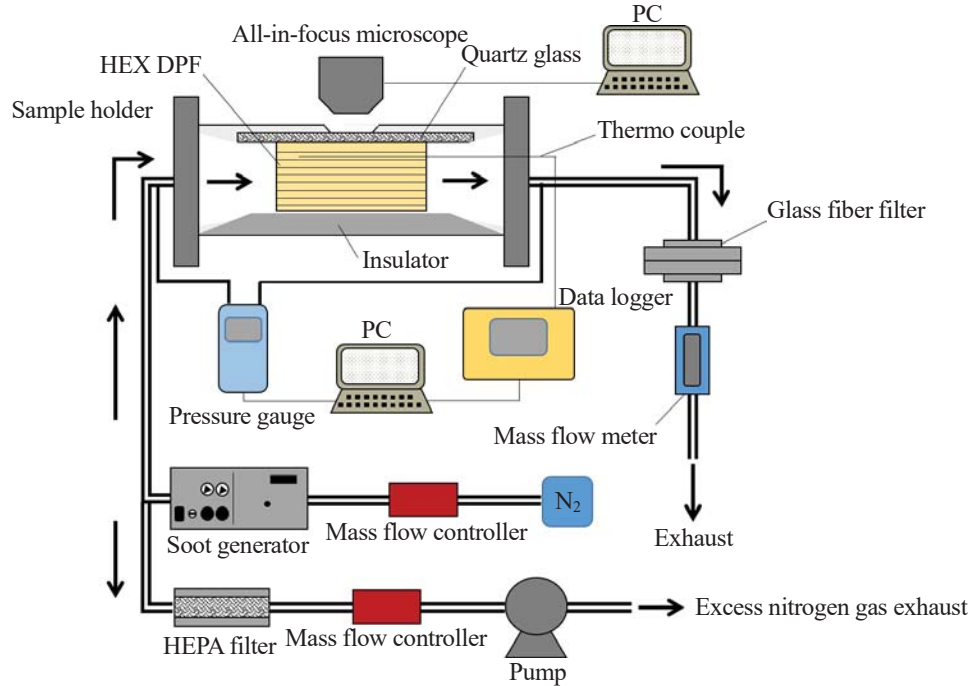


Fig.4 A view of experimental setup for the visualization of trapping diesel soot (PM) in the HEX DPF. The diesel soot (PM) was introduced from the soot generator (PALAS, DNP-2000). The carrier gas N_2 was regulated by two mass flow controllers (HORIBA, SEC-E40), to 24 mm/s as the superficial flow velocity, by exhausting the excess N_2 gas by the pump. The pressure drop of the HEX DPF sample was measured by the digital pressure gage (HODAKA, EDEMA), as the pressure difference between both ends of the sample holder including a HEX DPF sample. The video-pictures of soot (PM) deposition process were taken by the all-in-focus microscope (FOTRON, Focuscope FV-100C) placed right over the observation window.

とき、スス発生器に必要な窒素流量と DPF に導入する流量に大きな差があるため、ススが導入された窒素ガスの一部を排気しつつ、DPF 壁面の空塔速度が 24mm/s となるように質量流量計（堀場製作所製 SEC-E40）により調整される。HEX DPF の実験サンプルは、ステンレス鋼製サンプルホルダー流路（ $\square 34 \text{ mm} \times 95 \text{ mm}$ ）内に、上面を石英ガラスにより、その他の面を断熱材により覆われた状態で設置されている。その圧力損失は、サンプルホルダー両端において差圧計（HODAKA 製 EDEMA）により測定される。また、DPF サンプル温度は、その断面中央の Outlet 流路に挿入した K 型シーース熱電対（ $\phi 0.5 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ）により測定される。これらの温度と圧力は、Data logger（KEYENCE 製 NR-1000）と PC の“wave thermos”を用いて記録される。DPF にススが堆積する様子は、可視化窓の上部に設置した全焦点光学顕微鏡（オリンパス製）を介して CCD カメラ（フォトロン製 Focuscope FV-100C）により撮影される。

図 5 に示すように、断面 $8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 、長さ 20 mm の HEX DPF 実験サンプルに、Inlet 流路と Outlet 流路が再現できるようにセラミック製接着剤（ファイアガム、Holts 製）を充填し、目封じを施す。Inlet 流路に隣接する Outlet 流路の側壁を鏡面研磨し、厚さ 0.5 mm の石英ガラスを密着させることで可視化用流路とする。

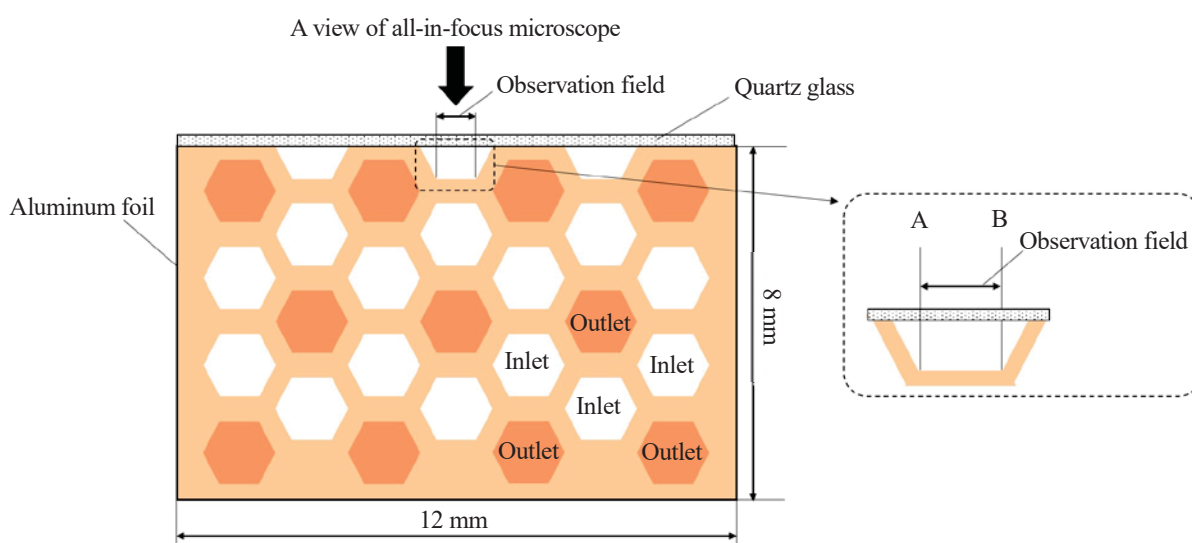


Fig.5 A cross-section of a sample piece of the HEX DPF used in visualization experiments, with 8 mm in height by 12 mm in width and 20 mm in length. The honeycomb-like channels were plugged by ceramic glue (Firegum of Holts), making channels of the Inlets and the Outlets. The surface of the Inlet/Outlet walls in the visualizing side was polished up glassy. A transparent plate of quartz glass with 0.5 mm in thickness was put on the polished surface.

図 6 に、全焦点光学顕微鏡における可視化の視野を示す。その範囲は、淡い青色の領域として示された $800 \mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$ である。図 6 中の A と B は、Inlet/Inlet 壁面の Outlet 流路に最も近い位置を示し、中心線（一点鎖線）は Outlet 流路から最も遠い位置を示す。ススを含む窒素ガスは、一部は紙面の表側から裏側へ流れることが予想され、他は流路の上側と下側に Inlet/Outlet 壁が隣接するため、徐々にその中心線から上下両端へ向きを変えて流れると予想される。ここで、Inlet/Inlet 壁面両端の Outlet 流路に近い部分を Area 1、Inlet/Inlet 壁面の中心部分を Area 3、Area 1 と Area 3 の間を Area 2 とする。Area 1 と Area 2 は、Inlet/Inlet 壁面の中心線に対称な 2 つのエリアから構成される。そのため、各エリアは、 $L_1 (133 \mu\text{m}) \times 800 \mu\text{m}$ が 2 つの場合（Area 1 と Area 2）と、 $L_3 (266 \mu\text{m}) \times 800 \mu\text{m}$ が 1 つの場合（Area 3）の面積となる。全焦点光学顕微鏡で撮影した画像は、画像解析ソフト ImageJ を用いて、エリアごとの平均輝度として解析される。堆積開始時においては全面 DPF 壁面のみ、他方、実験終了時（90 min）においては全面ススのみであることから、各エリアの平均輝度は理論的には同じとなる。しかし、実際には、光学顕微鏡の照明光の反射具合の影響で平均輝度に差が生じると考えられる。そのため、堆積開始時と実験終了時の各エリアの平均輝度の差を輝度の最大変化として、ケーキ層表面の輝度を 0（ススにより完全に覆われた 90 min 後のケーキ層表面の輝度値を 0 と定義した）、基材表面の輝度を 1 として正規化した。

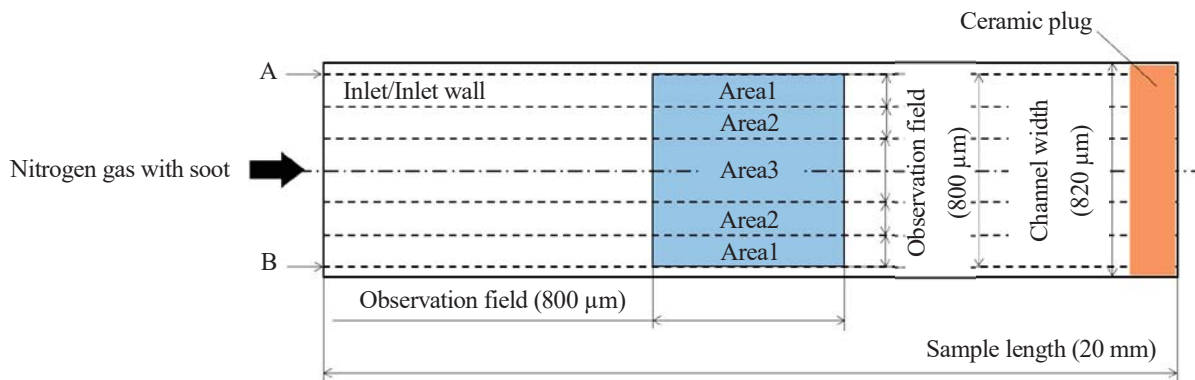


Fig.6 An observation field of the Inlet/Inlet wall in a half-cut channel. The observation field was subdivided into 3 areas light-blued with $800\mu\text{m} \times 800\mu\text{m}$. Arrows from A and B locate the areas nearest to both Outlet channel sides of the Inlet/Inlet wall, and the center line (a dotted and dashed line) locates the area farthest from both Outlet channel sides.

4. 数値計算結果と可視化実験結果および考察

図7に、スス堆積過程における、Inlet/Outlet 流れの空塔速度 u_1 (黒線) と、壁厚さ(幅)方向に3等分割されたバイパス流につながる Inlet/Inlet 壁表面の空塔速度 u'_{21} , u'_{22} , u'_{23} (Outlet 流路から近い順に青線, 赤線, 緑線) の計算結果を示す。堆積開始から約 700 秒経過するまでは、Inlet/Outlet 壁の厚さが薄いため、同じ圧力損失の条件の下では、Inlet/Outlet 流れ u_1 がバイパス流 u'_{21} , u'_{22} , u'_{23} に比べて大きい。3つに分割されたバイパス流においては、Outlet 流路に近いほど壁内部を通過する距離が短くなるので空塔速度が大きくなっている。その速度差が、いずれの経過時間においてもほぼ等間隔であることから、Inlet/Inlet 壁内のバイパス流は直線的な速度分布となっていることがわかる。さらに経過時間と共に、基材に比べて、ススのケーキ層における圧力損失が支配的となるため、バイパス流の空塔速度は、Inlet/Outlet 流れの空塔速度に漸近する。なお、経過時間約 700 秒から約 1300 秒における一時的な速度の増大と減少(あるいは減少と増大)については、図8のスス堆積過程と併せて考える。

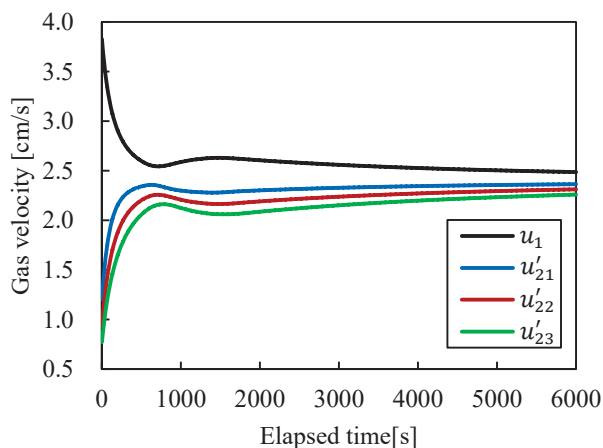


Fig.7 Changes of superficial velocities of Inlet/Outlet flow u_1 and bypass flows u'_{21} , u'_{22} , u'_{23} with elapsed time during soot trapping process. The Inlet/Outlet flow velocity is larger than those of bypass flows. During soot trapping, those approach to almost the same velocity as the soot cake layer becomes thicker.

図8には、Inlet/Outlet 壁面におけるスス (PM) 堆積厚さ x (黒線)、および3等分された Inlet/Inlet 壁面におけるスス (PM) 堆積厚さ x_1 , x_2 , x_3 (Outlet 流路から近い順に青線, 赤線, 緑線) の計算結果を示す。Inlet/Outlet 壁においては、堆積開始から空塔速度が時間と共に減少する(図7)ため、スス堆積速さ(堆積厚さの時間増加率)も減少し、図8の堆積厚さは時間経過につれてやや上に凸の増加傾向を示す。時間の経過と共に、堆積する表面空

孔の空隙率が增大（図3）するため、堆積厚さの時間増加率はさらに鈍る。

そして経過時間約1300秒以降においてはケーキ層堆積となるため、堆積厚さの増加はほぼ一定となる。一方、Inlet/Outlet壁においては、堆積開始から空塔速度は時間と共に増大（図7）するため、堆積開始直後にはやや下に凸の増加傾向を示す。時間の経過と共に表面空孔の空隙率が增大するため、その増加率は鈍る。そして約1600秒以降においてはOutlet流路に最も近い部分からケーキ層の堆積となるため、堆積厚さの増加はほぼ一定となる。さらに約1800秒以降においては、Outlet流路から最も遠い部分においてもケーキ層の堆積となる。ケーキ層堆積厚さの増加速度（時間に対する勾配）の違いは、図7に示した空塔速度の差によるものと考えられる。

このように、空隙率分布を有する表面空孔の堆積厚さが、同じ経過時間において異なるため、図7に示した空塔速度の一時的な増大（減少）と減少（増大）が生ずることになる。すなわち、経過時間が約700秒において、Inlet/Outlet壁におけるPM堆積厚さは約15 μm であり、図3から表面空孔の空隙率は大きく変化しないことがわかる。他方、同じ経過時間において、Inlet/Outlet壁におけるPM堆積厚さは約24 μm であり、そこからDPF表面（堆積厚さ30 μm ）に至るまでに空隙率が大きく変化する。このため、それぞれの表面空孔にススが堆積した場合の圧力損失を比較すると、Inlet/Outlet壁において増加率が小さく、ゆえに空塔速度が一旦増大する。逆に、Inlet/Outlet壁では空塔速度が減少することになると考えられる。

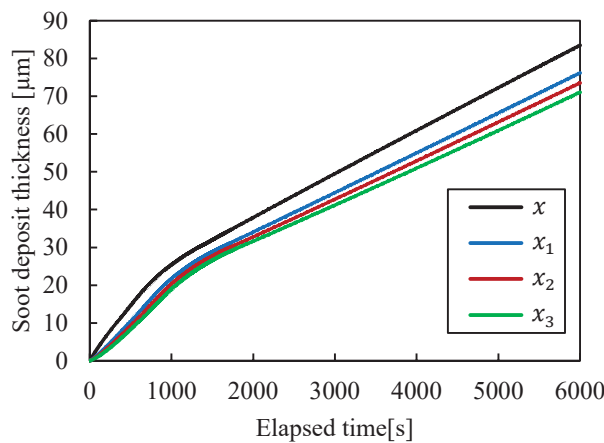


Fig.8 Increase in soot (PM) deposit thickness x (Inlet/Outlet wall flow), x_1, x_2, x_3 (Inlet/Outlet wall bypass flows) with elapsed time. The surface pore filtration completes at the elapsed time of about 1300 s in the case of Inlet/Outlet wall flow, while about 1600, 1700, 1800 s in the cases of Inlet/Outlet wall bypass flows. The difference of elapsed time for completion leads to temporarily overshooting and undershooting superficial velocities in Fig.7.

図9は、窒素ガス中に導入するPM濃度とInlet/Outlet壁に対する空塔速度が、実験と同じ条件の下で計算された圧力損失の上昇過程を、経過時間を横軸として示している。ここで、ケーキ層堆積時の圧力損失が時間と共に増加するグラフの傾きから、PMの透過係数 k_{soot} が求められている。その値は $1.42 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ である。

一方、過去の文献(Konstandopoulos and Skaperdas, 2002)からPMの透過係数 k_{soot} は、以下の関係式で表現される。

$$k_{\text{soot}} = f(\varepsilon) \times d_{\text{primary}}^2 \times SCF \quad (13)$$

$$Kn = \frac{2\lambda}{d_{\text{primary}}} \quad (\text{クヌッセン数}) \quad (14)$$

$$SCF = 1 + Kn(1.257 + 0.4e^{-1.1/Kn}) \quad (15)$$

$$\lambda = v \sqrt{\frac{\pi M_w}{2RT}} \quad (\text{窒素の平均自由行程}) \quad (16)$$

$$f(\varepsilon) = \frac{2}{9} \frac{2 - \frac{9}{5}(1-\varepsilon)^{\frac{1}{3}} - \varepsilon - \frac{1}{5}(1-\varepsilon)^2}{1-\varepsilon} \quad (17)$$

ここで、 d_{primary} はスス (PM) の 1 次粒子の直径 (22 nm)、 M_w は窒素の分子量 (28 g/mol)、 v は窒素の動粘性係数、 R は気体定数、 T は気体温度 (300 K)、 ε はスス (PM) の空隙率である。これらの関係式に、実験から得られたスス (PM) の透過係数 $k_{\text{soot}} = 1.42 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ を代入すると、その空隙率は 0.96 と見積もれる。さらに実験条件から、物質移動に関するペクレ数 Pe_{mass} (流れによる物質移動/拡散係数) が 0.26 となる。物質移動のペクレ数 Pe_{mass} が 10^{-1} オーダーのとき、スス (PM) の空隙率は 0.95~0.98 と予測できる(Maedler et al, 2006) ことから、ここで得られたスス (PM) の透過係数 k_{soot} の値は、公表されている値からは大きくずれていないと考えられる。

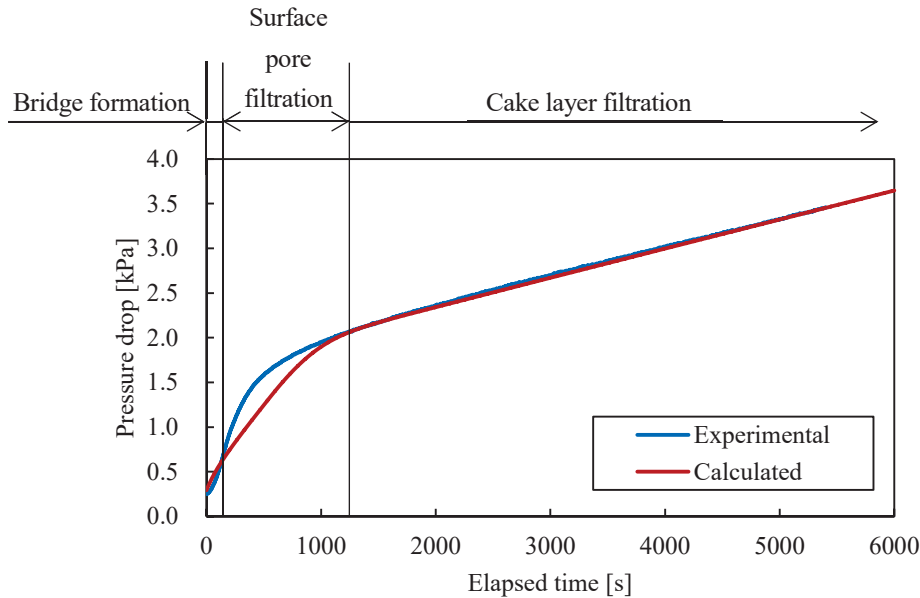


Fig.9 Increase in pressure drop during trapping process with elapsed time. The permeability of soot layer was estimated from fitting of pressure drop increase in cake layer filtration. The calculated pressure drop increase in surface pore filtration is lower than experimental one because in experiment, transition from surface pore filtration to cake layer filtration in bypass flow will be faster than that of Inlet/Outlet wall flow since the superficial flow velocity of bypass flow is very low at the beginning of trapping process.

図 9 において、ケーキ層堆積時 (経過時間で概ね 1000~6000 秒に該当) における実験結果と数値計算結果から、フィッティングにより PM の透過係数 k_{soot} を求め、それを使って、捕集開始時からの圧力損失の上昇過程を計算している。この場合、HEX DPF においては、図 7 に示したように Inlet/Outlet 流れに比べて、Inlet/Inlet バイパス流れの捕集開始時の速度は極めて小さい。これにより、計算ではいずれも深さ $30\mu\text{m}$ から一定密度のスス (PM) が堆積していると仮定しているが、実際には、讃井ら(Sanui and Hanamura, 2015) (Sanui and Hanamura, 2016)によれば、スス堆積開始深さは流速に依らないものの、ススによる架橋形成(Bridge formation)が完結する深さは流速により大きく左右されることになる。したがって、HEX DPF のバイパス流においては、表面空孔捕集からケーキ層捕集への遷移が、Inlet/Outlet 流れに比べて早い可能性がある。これが実験と計算における、表面空孔捕集時の圧力損失上昇の差になっていると考えられる。

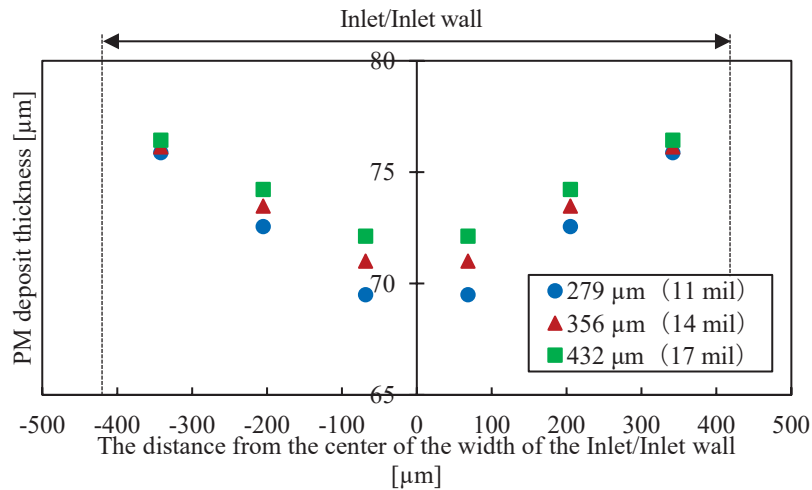


Fig. 10 Calculated distributions of soot (PM) deposit thickness on the Inlet/Inlet wall for each wall thickness. Those results are for the elapsed time of 6000 s from the beginning of trapping. As the wall thickness increases (plots: blue→red→green), the difference of soot (PM) deposit thickness becomes smaller.

図 10 は、Inlet/Inlet 壁面中心線からの距離に対するスス (PM) 堆積厚さ分布の数値計算結果を示す。これは、六角形の一辺の長さである壁幅を一定として、壁厚さを 279 μm (11mil), 356 μm (14mil), 432 μm (17mil) と変化させたときの比較である。この計算結果は、実験開始から 6000 秒経過した後のスス堆積を比較している。このときの流量および PM 濃度は一定である。図 10 より、Inlet/Inlet 壁のスス堆積量は、中心から Outlet 流路に近いその両端部に向かって少なくなることがわかる。これは、Inlet/Inlet 壁表面に平行に流れるバイパス流の圧力勾配が、流入位置が中心部に近づくほど緩やかになるため、その流量が減少することによる。また、壁幅中央 (中心線) からの距離に対する PM 堆積厚さ分布の傾きは、壁厚さが増す (プロット: 青→赤→緑) につれて、緩和されることがわかる。これは、壁厚の増大に伴いバイパス流の圧力勾配の差が小さくなることによると考えられる。

図 11 にスス堆積実験の可視化観察結果を示す。各画像は、図 6 に示したように、Outlet 流路に近い上下両端の Area 1, 中心部が Area 3 である。経過時間 3 min の画像から、中心部の Area 3 に比べて、両端の Area 1 の方が斑状の黒い領域が多いことがわかる。従来の研究から、これらの斑状の黒い領域は、表面空孔にススが捕集された

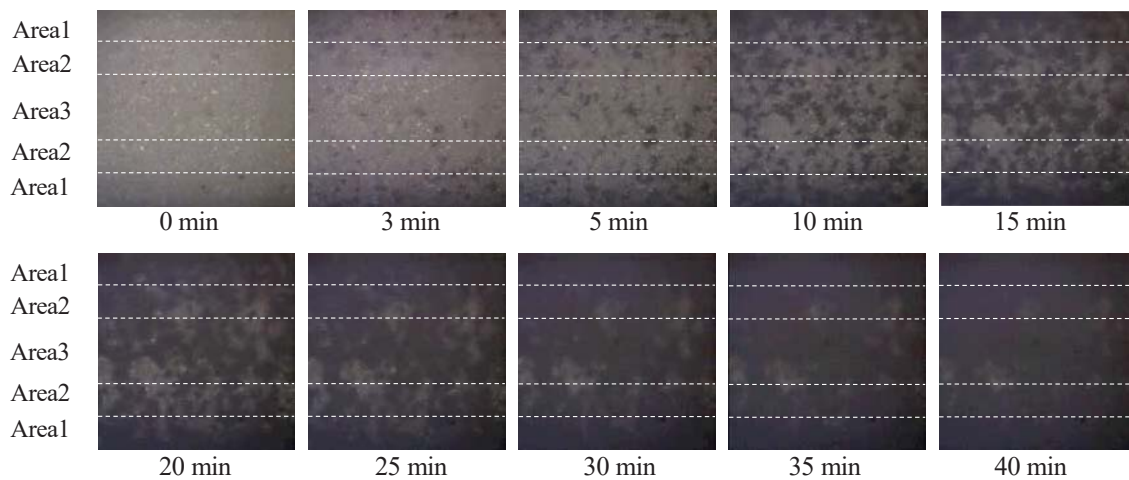


Fig.11 Snapshots of the PM deposition process on the inner surface of the Inlet/Inlet wall. Each snapshot consists of five narrow areas; Area1, Area2, Area3, and shuttle-labeling Area2, Area1, from the top in order near the Outlet channel at the upper side, to the bottom in order close to the Outlet channel at the lower side. At the elapsed time of 3 minutes, more dark pores can be observed in the Area 1 compared with Area 2 and 3. As time passed, the differences of darkness and number of dark pores among Area's are not so clear.

状態であると考えられる。すなわち、図 8 の数値計算により示されたように、Inlet/Inlet 壁表面においては、表面空孔深さに等しいスス堆積厚さ $30\mu\text{m}$ に達するまでの経過時間は、両端に比べて中心部が長いことを示している。さらに経過時間 15min においては、それほど大きな差ではないが、Area 1 は、Area 2 と Area 3 に比べて色が黒く、より早い経過時間において表面空孔を満たしていることがわかる。なお正面画像からは、図 10 に示したようなケーキ層の厚さ分布を読み取ることは難しい。

図 12 に、表面を覆うスス堆積量の差を、各エリアの画像の平均輝度値（数値 0～1）を用いて数値化した結果を示す。いずれの経過時間においても、Area 1、Area 2、Area 3 の順に輝度が高く、Outlet 流路から離れ、中心部に近づくほどスス堆積量が少ないことを示している。すなわち、中心部は両端に比べてススが堆積する速度が小さい（遅い）ことを示しており、図 8 の計算結果と定性的に一致している。

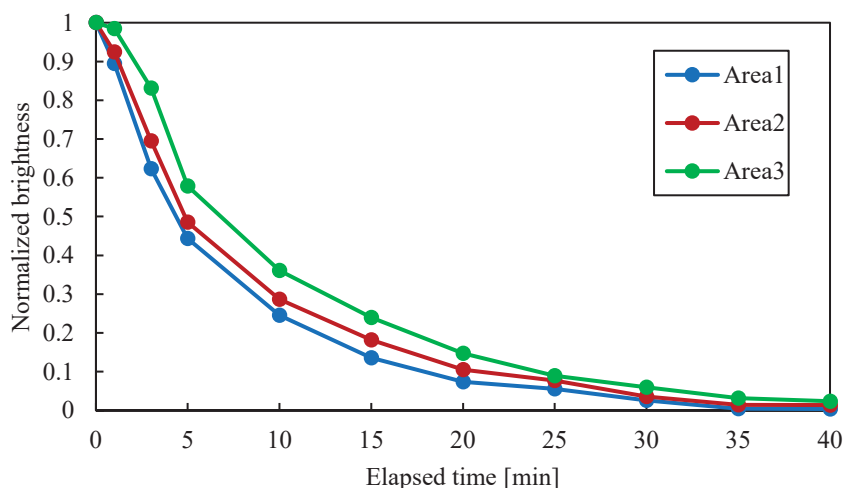


Fig.12 Changes of the normalized brightness averaging for each area on the inner surface of the Inlet/Inlet wall. The brightness on the inner surface of the Inlet/Inlet wall without PM is defined as “1”, and the brightness on the cake layer over the Inlet/Inlet wall is defined as “0” after 90 minutes passed. The brightness becomes lower in order close to the Outlet channel (Area1, Area2, Area3). The nearer to the Outlet channel is the area, the faster is the completion of surface pore filtration though the difference is very small.

5. 結 論

本論文では HEX DPF に特徴的な、Inlet 流路が隣り合う Inlet/Inlet 壁面に沿う流れであるバイパス流が、Inlet/Outlet 壁流れに及ぼす影響、およびそれらの壁面に堆積するスス (PM) 厚さとその分布に及ぼす影響を明らかにするため、簡易な数値計算および可視化実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) Inlet/Inlet 壁において、作動ガスの流入位置が Outlet 流路に近いほど、バイパス流量が大きく、これに比例して Inlet/Inlet 壁面に堆積するスス量も多く、同壁面中心に近づくに従いバイパス流量も堆積スス量も少なくなる。
- (2) 表面空孔捕集において、Inlet/Outlet 壁流れの速度は、スス堆積による圧力損失上昇に伴い、スス導入開始直後から経過時間とともに急激に低下し、逆に、流量配分されたバイパス流れの速度は、急激に上昇する。
- (3) 表面空孔捕集過程は、Inlet/Outlet 壁が先に完了し、その後、Inlet/Inlet 壁の Outlet 流路に近い位置から順に完了する。さらに、表面空孔の空隙率分布と、この表面空孔捕集が完了する時間差により、一旦速度が増大あるいは減少する過程が、わずかに見受けられる。
- (4) ケーキ層捕集に移行すると、Inlet/Outlet 壁流れと Inlet/Inlet 壁流れの速度は、等しい速度に漸近する。このとき、Inlet/Inlet 壁には、(1)のスス堆積厚さ分布が残る。
- (5) 壁厚の増大とともに、幾何学的にバイパス流れにおける圧力勾配の差が小さくなるため、スス堆積厚さ分布は緩和される。

文 献

- 林田和宏, 宇野昌行, 石谷博美, ディーゼル機関の運転条件がすす粒のナノ構造と酸化反応性に及ぼす影響, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.79, No.806 (2013), pp.2228-2238.
- Konstandopoulos, A. G. and Skaperdas, E., Microstructural properties of soot deposits in diesel particulate traps, SAE (2002), paper 2002-01-1015.
- Maedler, L., Anshuman, A. L. and Sheldon, K. F., One-step aerosol synthesis of nanoparticle agglomerate films: simulation of film porosity and thickness, *Nanotechnology* Vol.17 (2006), pp.4783-4795.
- 中村真季, 花村克悟, 渋田匠, 吉野朝, 岩崎健太郎, 六角セル構造ディーゼル微粒子フィルターの壁面に沿うバイパス流によるスス堆積と酸化過程, 自動車技術会 2015 秋季大会学術講演会予稿集 (2015a), S221, pp.313-318.
- 中村真季, 花村克悟, 渋田匠, 吉野朝, 岩崎健太郎, 六角形状セル構造ディーゼル微粒子フィルター (HEX DPF) によるスス堆積の数値シミュレーション, 日本自動車技術会論文集, Vol.46, No.2 (2015b), pp.313-317.
- Nakamura, M., Hanamura, K., Shibuta, T., Iwasaki, K. and Yoshino, H., Flow analysis during soot trapping on aluminum titanate ceramics filter with hexagonal cell geometry, *International Journal of Automotive Engineering*, Vol.6 (2015c), 31-37.
- 根本明欣, 岩崎健太郎, 山西修, 土本和也, 魚江康輔, 當間哲郎, 吉野朝, チタン酸アルミニウム製ディーゼル・パーティキュレート・フィルタの開発—製品設計・特性評価—, 住友化学, 2011-II (2011), pp.4-13.
- 斉藤敬三, ディーゼル粒子フィルタの最近の動向, *Eurozoru Kenkyu*, Vol.24, No.1 (2009), pp.18-23.
- 坂間理, 中川順達, 渋田匠, 花村克悟, 六角形状セル構造ディーゼル微粒子フィルターInlet/Inlet 壁面におけるスス堆積に及ぼすバイパス流の影響, 日本機械学会第 27 回内燃機関シンポジウム講演論文集 No. 16-30 (2016), paper 94.
- Sanui, R. and Hanamura, K., Scanning electron microscopic visualization of transition from surface pore filtration to cake filtration inside diesel particulate filter walls, *Journal of Microscopy* (2015), doi:10.4271/2015-01-1018.
- Sanui, R. and Hanamura, K., Scanning electron microscopic visualization of bridge formation inside the porous channels of diesel particulate filters, *Journal of Fuel & Lubricant* (2016), doi: 10.4271/2016-01-9079.
- Shibuta, T., Isawaki, K., Hanamura, K. and Yoshino, H., Characterization of advanced aluminum titanate ceramic filter having hexagonal cell geometry, *International Journal of Automotive Engineering*, Vol.5 (2014), pp.109-113.

References

- Hayashida, K., Uno, M. and Ishitani, H., Influence of the working conditions on the nano-structure and oxidational activity of soot particulate, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineering, Series B*, Vol.79, No.806 (2013), pp.2228-2238 (in Japanese).
- Konstandopoulos, A. G. and Skaperdas, E., Microstructural properties of soot deposits in diesel particulate traps, SAE (2002), paper 2002-01-1015.
- Maedler, L., Anshuman, A. L. and Sheldon, K. F., One-step aerosol synthesis of nanoparticle agglomerate films: simulation of film porosity and thickness, *Nanotechnology* Vol.17 (2006), pp.4783-4795.
- Nakamura, M., Hanamura, K., Shibuta, T., Yoshino, H. and Iwasaki, K., Soot trapping and oxidation process by bypass flows along the walls of hexagonal diesel particulate filters, *Preprints of the 2015 Autumn Technical Meeting of the Society of Automotive Engineers of Japan*, S221 (2015a), pp.313-318 (in Japanese).
- Nakamura, M., Hanamura, K., Shibuta, T., Yoshino, H. and Iwasaki, K., Numerical simulation of soot trapping by diesel particulate filters with hexagonal cell geometry (HEX DPF), *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.46, No.2 (2015b), pp.313-317 (in Japanese).
- Nakamura, M., Hanamura, K., Shibuta, T., Iwasaki, K. and Yoshino, H., Flow analysis during soot trapping on aluminum titanate ceramics filter with hexagonal cell geometry, *International Journal of Automotive Engineering*, Vol.6 (2015c), 31-37.
- Nemoto, A., Isawaki, K., Yamanishi, O., Domoto, K., Uoe, K., Toma, T. and Yoshino, H., Development of innovative diesel particulate filters based on aluminum titanate: design and validation, *Sumitomo Kagaku*, 2011-II (2011), pp.4-13 (in Japanese).
- Saito, K., Recent trend of diesel particulate filter, *Eurozoru Kenkyu*, Vol.24, No.1 (2009), pp.18-23 (in Japanese).
- Sakama, S., Nakagawa, M., Shibuta, T. and Hanamura, K., Trapping process on inlet/inlet walls in hexagonal diesel particulate

filters, Preprint of the Japan Society of Mechanical Engineering for the 27th Internal Combustion Engines Symposium. No. 16-30 (2016), paper 94 (in Japanese).

Sanui, R. and Hanamura, K., Scanning electron microscopic visualization of transition from surface pore filtration to cake filtration inside diesel particulate filter walls, *Journal of Microscopy* (2015), doi:10.4271/2015-01-1018.

Sanui, R. and Hanamura, K., Scanning electron microscopic visualization of bridge formation inside the porous channels of diesel particulate filters, *Journal of Fuel & Lubricant* (2016), doi: 10.4271/2016-01-9079.

Shibuta, T., Isawaki, K., Hanamura, K. and Yoshino, H., Characterization of advanced aluminum titanate ceramic filter having hexagonal cell geometry, *International Journal of Automotive Engineering*, Vol.5 (2014), pp.109-113.