

# DPF の圧力損失と空孔構造の数値シミュレーションによる検討 Numerical study on pressure drop and pore structure of DPF

○田島祐太, 名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻, 愛知県名古屋市千種区不老町  
山本和弘, 名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻, 愛知県名古屋市千種区不老町  
Yuta Tajima, Graduate School of Eng., Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya  
Kazuhiro Yamamoto, Graduate School of Eng., Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya

In this study, we simulated the flow and soot deposition in DPF. Several filters with different porosity were used. One was the reference whose inner structure was obtained by an X-ray CT technique. We conducted the numerical simulation of these filters, and evaluated the pressure drop across the filter (filter backpressure). Especially, we monitored the pressure drop due to the soot deposition by changing the porosity. Results show that, in the case of the filter with lower porosity of the front part, the time when the depth filtration to surface filtration occurs is shorter and the maximum rate of filter backpressure is larger, which is caused by the variation of the flow field. Moreover, it is found that the time when the rate of backpressure takes its maximum depends on the channel clogged lastly before the surface filtration.

## 1. はじめに

ディーゼル車は熱効率およびトルク性能がガソリンエンジンと比べて優れており, CO<sub>2</sub> の排出量を抑制できる機関と言える<sup>(1)(2)</sup>. しかし, その排気ガスには大気汚染の要因でもある窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) や発がん性を有するすすなどの粒子状物質 (PM, Particulate Matter) が含まれる. そのため, DPF (Diesel Particulate Filter) と呼ばれるセラミック製のフィルタを使用して粒子状物質の排出を抑制している<sup>(3)</sup>.

しかし, PM を捕集すると DPF の隔壁が目詰まりして, 背圧 (圧力損失) が上昇し, 燃費が悪化する<sup>(4)(5)</sup>. また, 今後より厳しくなる排ガス規制に対応するために, 継続的な DPF の性能向上が必須である<sup>(6)(7)</sup>. それには DPF 内部で起こる現象を解明する必要があるが, DPF は非常に微細な内部構造を有し, 内部の現象を実験で検討することが困難である.

そこで我々は, DPF 内の流れおよびすすの堆積と酸化の過程を数値シミュレーションにより模擬した<sup>(8)-(12)</sup>. 本研究では, DPF の空孔構造がすす捕集時の圧力損失に与える影響を検討するため, X 線 CT 法により実際の DPF の内部構造を取得したものを基準 (Reference) とし, 全体または前後の空隙率を変化させたフィルタの計 7 種類を用意した. 特に深層ろ過から表層ろ過へ移行する際の流れ場を調べ, 空孔構造がすす堆積時の圧損に与える影響を考察した.

## 2. 計算方法

数値解析には格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method, LBM) を用いた<sup>(8)-(12)</sup>. 本研究で対象とした 2 次元のフィルタ構造と計算領域を Fig.1 に示す. 座標系は, 排気ガスが DPF の隔壁を通過する方向 (主流方向) を X 軸とし, それに垂直な方向を Y 軸とした. 計算領域の大きさは 0.95 mm(X) × 0.99 mm(Y) である. 本計算に用いた格子は 2.5 μm の等間隔格子とし, 格子数は 380 (X) × 396 (Y) である. 計算領域の中央に 0.67 mm(X) × 0.99 mm (Y) のフィルタを配置して, フィルタの前後にそれぞれ 0.21 mm (85 格子) と 0.06 mm (25 格子) の助走区間を設けた.

解析に用いた 7 種類のフィルタの名称と空隙率を Table 1 に示す. 各フィルタの全体の空隙率を  $\epsilon_{ALL}$ , 前半の空隙率を  $\epsilon_F$ , 後半の空隙率を  $\epsilon_R$  とした. 基準としたフィルタである Reference を Filter 0 とし, それから全体の空隙率を増加させた Filter 1 は, 基材部分が痩せて (薄く) 見えることから Front & rear thin とした. 全体の空隙率を減少させた Filter 2 は, フィルタが逆に太って (厚く) なって見えることから Front & rear thick とした. また, 前半のみの空隙

率を増加させた Filter 3 を Front thin, 減少させた Filter 4 を Front thick とした. 一方, 後半の空隙率のみを増加させた Filter 5 を Rear thin, 減少させた Filter 6 を Rear thick とした.

次に, 境界条件について説明する. 温度 573K の排気ガスをフィルタ上流部から流速 3 cm/s で一様に流入させた. 出口では自由流出境界及び圧力を大気圧で一定とした. 計算領域の上下の境界は対称境界として Slip 境界を適用し, フィルタ基材表面では Non-Slip 境界を適用した. 一般にすす層の内部では, 透過率が隔壁を通過する排気ガスの流速, すず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, すず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<sup>(7)(13)</sup>. そこで本研究では, すず層の透過率を  $2.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2$  とした. 一方濃度場の境界条件は, 上下境界を流れと垂直方向の濃度勾配を 0, 入口境界ではすすの濃度を質量分率 0.1 で流入させ, 出口境界を流れ方向の濃度勾配を 0 とした. フィルタ基材表面では堆積割合 ( $P_D$ ) を 0.002<sup>(11)</sup> とし, この割合ですずが基材の表面に堆積する.

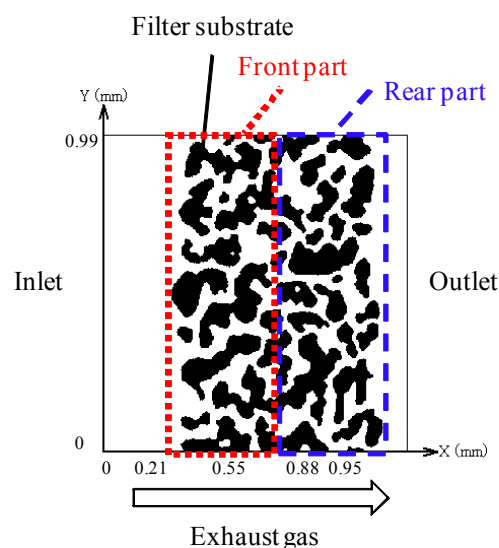


Fig. 1 Calculation domain and coordinate

Table 1 Porosity of each filter

Filter No.	Filter Name	Porosity $\epsilon_{ALL}$ ( $\epsilon_f, \epsilon_r$ )
0	Reference	0.45 (0.45, 0.45)
1	Front & rear thin	0.50 (0.50, 0.51)
2	Front & rear thick	0.39 (0.40, 0.39)
3	Front thin	0.48 (0.50, 0.45)
4	Front thick	0.42 (0.40, 0.45)
5	Rear thin	0.48 (0.45, 0.51)
6	Rear thick	0.42 (0.45, 0.39)

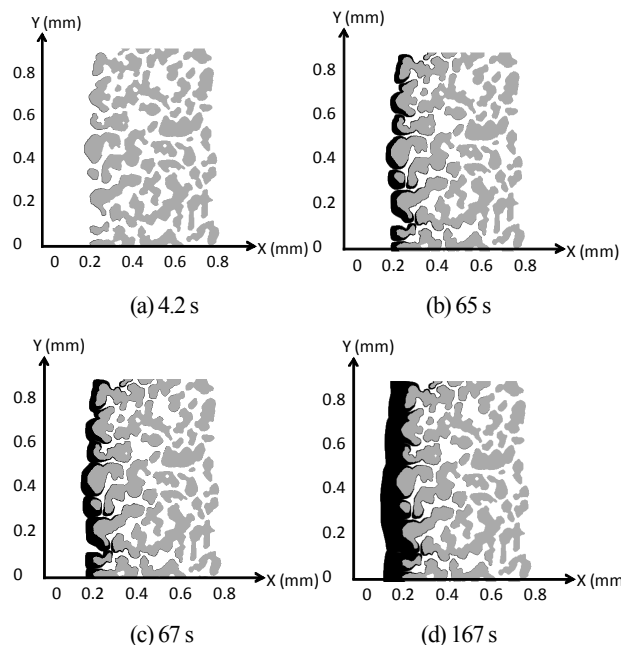


Fig. 2 Soot accumulation layer in case of filter 0

### 3. 計算結果および考察

#### 3. 1 すず堆積に伴う圧力損失と空隙率の関係

まず数値解析により得られたすず堆積の様子を Fig.2 に示す。堆積計算を開始して各時間経過した後のすず堆積領域を黒色、基材を灰色で示している。4.2 秒後のすず堆積領域を見ると、フィルタ上流部の表面上にすずが薄く堆積していることがわかる。その後、65 秒後の結果ではフィルタの内部にすずが堆積する過程（深層ろ過）が観察された。このときフィルタ前面部の空孔を塞ぐようにして堆積したすずがブリッジ状に形成されていることがわかった。これにより 67 秒後にはブリッジ状に堆積したすずがフィルタ前面部の孔を完全に塞いだ。そして十分に時間が経った 167 秒後では、フィルタ前面部にすずが層状に堆積しており、これ以降時間がたつにつれてすず層が厚くなる表層ろ過が確認できた。

次に、すず堆積に伴う圧力損失（圧損）の時間変化を Fig.3 に示す。前述のように、DPF には深層ろ過と表層ろ過の過程があることが知られており<sup>(7)(14)</sup>、圧損をそれらの過程と合わせて考察する。堆積初期では圧力損失の変化が小さい。これは薄く堆積したすずがフィルタ内部の流路を閉塞することに起因する。この過程が深層ろ過である。その後次第に圧力損失の変化が増大する。Fig.2 を見ると、フィルタ前面部の孔が閉塞し始める時刻と一致する。その後、表層ろ過に移行するが、このときの圧力の上昇率が一定となることがわかった。したがって、深層ろ過から表層ろ過へ遷移するときに大きな圧損の上昇が見られることがわかった。

遷移過程と空隙率の関係を検討するために、各フィルタのすず堆積に伴う各時刻の圧力損失の時間変化率を Fig.4 に示す。圧力損失の時間変化率が最大となる時の最大値とその時刻に着目すると、Filter 2,4, Filter 0,5,6 及び Filter 1,3 でそれぞれ似た傾向が見られることが分かる。基準（Reference）と比較し、前半の空隙率が小さい Filter 2,4 は圧力損失の時間変化率が最大となる時刻が早く、また最大値が大きくなった。一方、基準（Reference）と比較し、前半の空隙率が大きい Filter 1,3 は圧力損失の時間変化率が最大となる時刻が遅く、また最大値が小さくなることが分かった。これはフィルタ前半の空隙構造が圧力損失の時間変化に影響していることを示している。一方、Filter 0,5,6 は変化率がほぼ等しい。これは、フィルタ後半の空隙構造がすず堆積に伴う圧力損失の時間変化に与える影響が小さいことを示す。

これらの結果を整理するために、前半空隙率と圧力損失の時間変化率の最大値の関係を求めた結果を Fig.5、前半空隙率と圧力損失の時間変化率が最大となる時刻の関係を Fig.6 にそれぞれ示した。いずれも前半の空隙率と線形性が確認できる。すなわち DPF 隔壁前後の圧力損失の変化は、フィルタ前半部の空隙構造が支配的であることが分かった。ただし、表層ろ過に完全に移行した 150 秒後以降の圧力損失の時間変化率は空隙率に依らずほぼ等しい値となった。これは表層ろ過後の圧力損失の上昇が、フィルタの基材構造に依らずフィルタ表層に形成されるすず層の厚さの増加にのみ依存していることを示す。

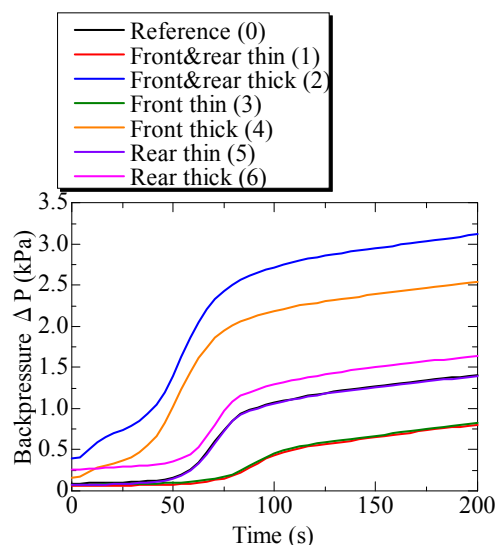


Fig. 3 Time variation of backpressure

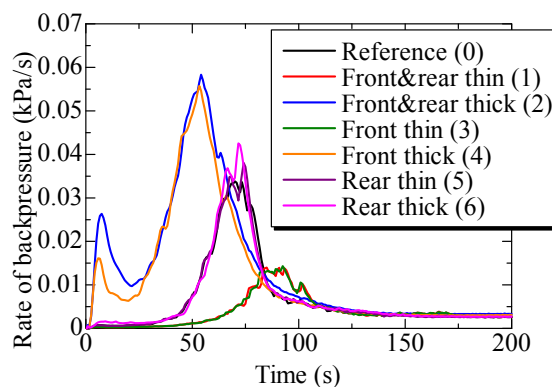


Fig.4 Rate of backpressure

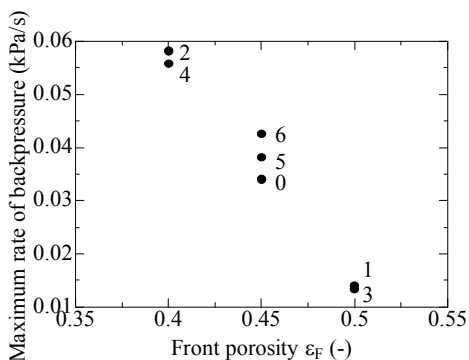


Fig.5 Relations of front porosity and the maximum rate of backpressure

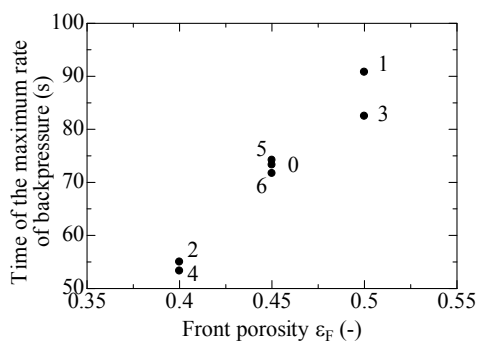


Fig.6 Relations of front porosity and time of the maximum rate of backpressure

### 3. 2 すず堆積に伴う流れ場の変化

すず堆積に伴う流れ場の変化について検討するため、Fig.7 に堆積初期の4.2秒後、初めに閉塞する流路が閉塞する直前の65秒後、圧力損失の変化が最大となり流路が完全に閉塞する直前の67秒後、および圧力損失の変化が一定となる167秒後の各時刻における Filter 0 (Reference) の流れ場における流線と透過速度の分布を示す。堆積初期と比較して閉塞直前の65秒後および67秒後における基材前方の流線が上部 (Y 軸正方向) に偏り、完全に表層ろ過へ移行した後は流れが一樣となっていることが分かった。透過速度の分布と比較すると、すずが堆積するにつれて透過速度の最大値が増大していくことが分かる。

次に、Fig.8 のように Reference の表層部に存在する8個の流路を上から順に流路1 (CH1) から流路8 (CH8) として、各流路における流量の時間変化を調べた。今回は2次元の計算なので、流量は単位長さ当たりの流量となる。ここで、各流路の各点における流速に格子幅を掛けて積算することで流量を算出した。その結果を Fig.9 に示す。これによると、時間が経過するにつれて流路1 (CH1) に流れが集中していき、流量が増加していることが分かる。

この流れ場の変化と圧損の変化の関係を調べるために、各流路が閉塞した時刻を求めた。その結果、CH2, CH5, CH6, CH4, CH3, CH7, CH8, CH1 の順に流路が閉塞することがわかった。したがって、CH1 は他の流路と比較して最も閉塞が遅いことが分かる。そこで、各フィルタの圧力損失の時間変化が最大となる時刻と CH1 の流量が最大となる時刻の関係を Fig.10 にそれぞれ示す。これによると、圧力損失の時間変化が最大となる時刻は各フィルタ前面部の流路において最も閉塞が遅い流路が閉塞する時刻とはほぼ一致していることが分かった。したがって、DPF を低圧損化させるためには、フィルタ前面部に存在する各流路の空孔構造を制御し、深層ろ過から表層ろ過へ移行するまでの時間を早める必要があることが示唆された。

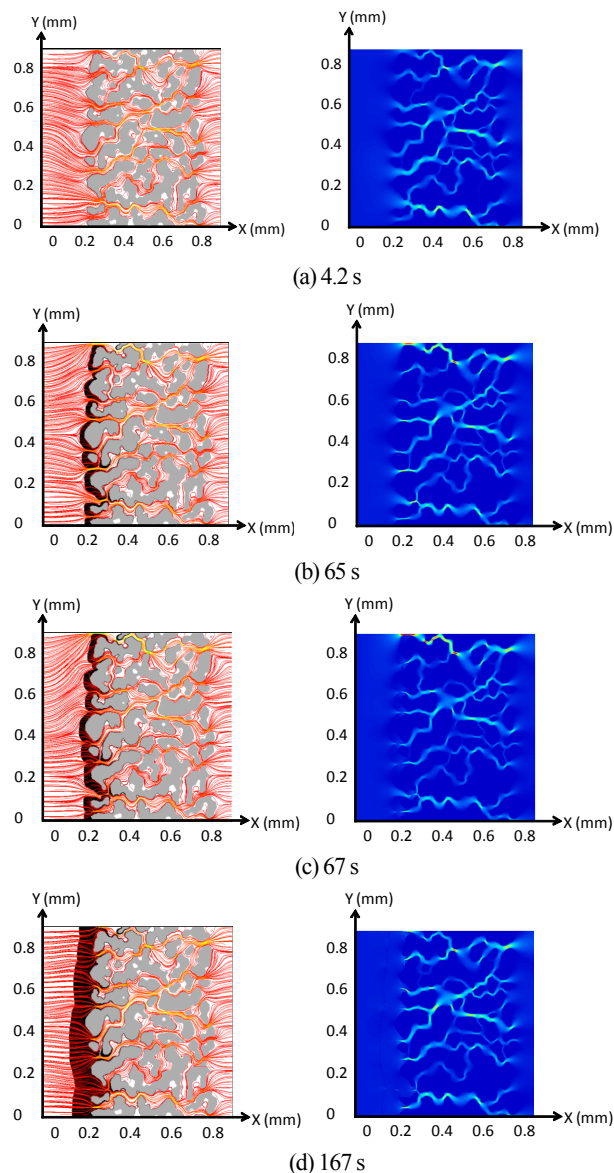


Fig.7 Time variation of flow field in case of filter 0; streamline (left) and filtration speed (right)

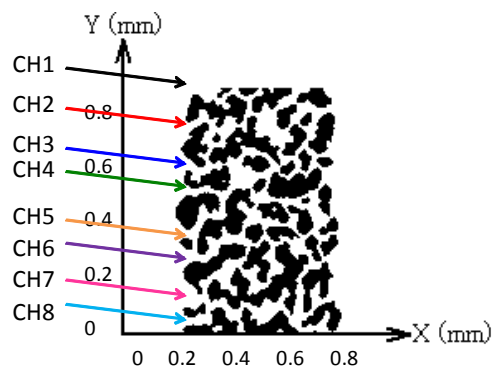


Fig.8 Definition of each channel in case of filter 0

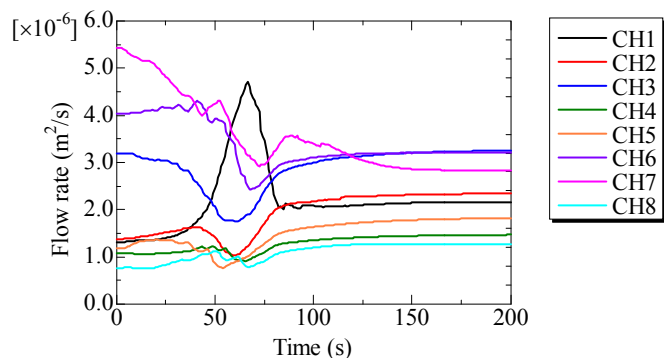


Fig.9 Time variation of flow rate along the flow direction of each channel in case of filter 0

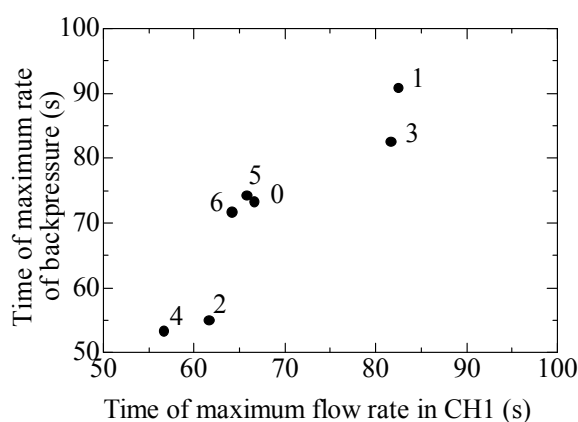


Fig.10 Relations of time about maximum rate of backpressure and flow rate in CH1

#### 4. まとめ

本研究では、DPFの空孔構造が圧損に与える影響を検討するため、すす堆積に伴い変化する流れ場を調べた。その結果、以下のことがわかった。

- (1) フィルタ前半の空隙率が小さいほど、圧損の時間変化率の最大値が大きくなり、圧損が最大となる時刻も早くなる。ただし、後半の空隙率が圧損の時間変化に与える影響は小さい。
- (2) 表層ろ過に移行後は、圧損の増加率が一定となるが、圧損はフィルタ表面に形成されるすす層の厚みに比例するため、これ以降の圧損の増加はフィルタの空孔構造に依存しない。
- (3) フィルタ内に形成される各流路がすすの堆積によって閉塞する時刻は内部の空孔の大きさに違いがあることから異なる。すなわち、フィルタが閉塞されるまでは、流れが時間により変化する。全ての流路が完全に閉塞する時刻は、圧損の時間変化率が最大となる時刻にほぼ一致する。

#### 謝辞

本研究の一部は、自動車用内燃機関技術研究組合(AICE)の支援を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- (1) S. K. Hidemitsu, H. "Computer Simulation Study on Filtration of Soot Particles in Diesel Particulate Filter," Computers & Mathematics with

Applications, vol. 55, 2008.

- (2) 久保, 蔵園, 林, 浅野, "DPFにおける粒子捕集メカニズム," 日本機械学会論文集(B編), Vol.72, No.721, (2006), pp.2103-2108.
- (3) 山田, "Diesel Particulate Filter および Urea-SCR システムを有するディーゼルエンジンからの粒子状物質排出実態," 自動車技術会論文集, (2014), pp.735-740.
- (4) Carlo, B. Silvana, I., Chiara, G., and Pierpaolo, N., "Detailed characterization of particulate emissions of an automotive catalyzed DPF using actual regeneration strategies," Experimental Thermal and Fluid Science Volume 39, (2012), pp.45-53
- (5) 横田, 小谷野, 浅海, 福岡, "DPFの大型ディーゼルトラックへの適用実験(1): DPFの耐久性の検討," 大気環境学会誌, Vol.34, No.4, (1999), pp.299-309.
- (6) K.Ogyu, T.Oya, and, K.Ohno, "Improving of Filtration and Regeneration Performance by the SiC-DPF with the Layer Coating of PM Oxidation Catalyst," SAE Paper 2008-01-0621, (2008), pp.317-322.
- (7) 大堀, 山本, 山下, 大道, "DPF内のすす堆積を考慮した流れの数値解析," 日本機械学会論文集(B編), Vol.75, No.750, (2009), pp.370-377.
- (8) K. Yamamoto, S. Satake, and H. Yamashita. "Microstructure and Particle-laden Flow in Diesel Particulate Filter, Int," J. Thermal Sciences (B), Vol.48, (2009), pp.303-307.
- (9) K. Yamamoto, M. Nakamura, H. Yane and H. Yamashita., "Simulation on Catalytic Reaction in Diesel Particulate Filter," Catalysis Today, Vol.153, (2010), pp.118-124.
- (10) K. Yamamoto, and M. Nakamura, "Simulation on Flow and Heat Transfer in Diesel Particulate Filter," ASME J. Heat Transfer, Vol.133, No.6, 060901, (2011).
- (11) K. Yamamoto, K. Yamauchi, N. Takada, M. Misawa, H. Furutani and O. Shinozaki, "Lattice Boltzmann Simulation on Continuously Regenerating Diesel Filter," Philosophical Transactions A (The Royal Society, London), Vol.369, (2011), pp.2584-2591.
- (12) K.Yamamoto, K.Yamauchi., "Numerical Simulation of Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter," Proc. Combust. Inst., Vol.34, (2013), pp.3083-3090.
- (13) A. G. Konstandopoulos, E. Skaperdas, "Microstructural Properties of Soot Deposits in Diesel Particulate Traps," SAE paper 2002-01-1015, (2002).
- (14) E. Wirojsakunchai, E. Schroeder, C. Kolodziej, D. E. Foster, N. Schmidt, T. Root, T. Kawai, T. Suga, T. Nevius., and T. Kusaka., "Detailed Diesel Exhaust Particulate Characterization and Real-Time DPF Filtration Efficiency Measurements during PM Filling Process," SAE paper 2007-01-0320, (2007).