

# LII 法によるディーゼル微粒子の計測と DPF の評価

近藤真一<sup>\*1</sup>, 山本和弘<sup>\*2</sup>, 常吉孝治<sup>\*2,3</sup>

## Measurement of Diesel Exhaust Particles by LII and Evaluation of DPF

Shinichi KONDO<sup>\*1</sup>, Kazuhiro YAMAMOTO<sup>\*2</sup>, Koji TSUNEYOSHI<sup>\*2,3</sup>

<sup>\*4</sup> Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

In this study, we measured PM concentration in diesel exhaust gas by laser-induced incandescence (LII). To evaluate the diesel particulate filter (DPF), the measurement was conducted at the point right after DPF exit. Four filters of different porosity and wall thickness were tested. In addition, EEPS system was used to examine the particle number concentration and calibrate LII signals. Based on the time-variation of PM concentration, an initial PM filtration efficiency and soot cake formation in DPF were discussed. The LII technique can be potentially applied to find the location of PM leakage through the filter and evaluate the after-treatment system.

Key Words : Diesel Engine, Solid Combustion, Combustion Products, Ceramics, LII

### 1. 緒 論

近年、地球温暖化や大気汚染などのさまざまな環境問題が起こっている。地球温暖化の原因となっている二酸化炭素の排出量を削減するため、世界中でさまざまな取り組みが為されているが、その中でも自動車から排出される二酸化炭素は全体の中で大きな比率を占めており、二酸化炭素の排出量が少ない自動車の開発が急務となっている。

ディーゼル機関は熱効率が高く CO<sub>2</sub> の排出が少ないという利点があるが、一方で人体や環境に悪影響を及ぼす PM (Particulate Matter, 粒子状物質) が多く排出される<sup>(1)</sup>。特に、100nm より小さいナノ粒子は、肺胞への沈着率が高く、肺胞を通して直接血液やリンパ液に混じることで発癌作用やアレルギー反応を助長させる恐れがあると考えられているため、問題になっている<sup>(2)</sup>。そのため自動車メーカーを中心に、ディーゼル機関から排出される PM を低減させるための技術開発が盛んに行われている。PM 排出量の規制は将来さらに厳しくなることが予想される。このためには、エンジン内の燃焼状態を改善するだけでなく、排気ガスを後処理するシステムが不可欠であり、PM を捕集するフィルタ (Diesel Particulate Filter, DPF) が開発された<sup>(1)(4)</sup>。

DPF 内で捕集した PM によって PM ケーキ層が形成されることで、捕集率が向上することが報告されている<sup>(3)</sup>。PM ケーキ層が形成されている高捕集モードでは、PM の捕集率が非常に高くなる。これに関して 2 つの問題がある。1 つ目は、PM の堆積によって生じる DPF の目詰まりで、それによって背圧が上昇し、熱効率の低下やエンジンの故障などが起こる可能性がある<sup>(4)</sup>。2 つ目は、PM ケーキ層が形成されるまでの間に生じる PM 漏れの問題である。PM ケーキ層が形成されると DPF の PM 捕集率が非常に高くなることは既に述べたが、PM ケーキ層が形成されるにはある程度の時間が必要であり、その間の PM 捕集率は十分ではない。この DPF 使用初期における PM の漏れを減らすためには、PM ケーキ層の形成過程を詳細に調べて DPF の性能を評価する必要がある。そのためには、排気ガス中の PM 濃度を正確に評価することが非常に重要である。

\* 原稿受付 2012 年 月 日

<sup>\*1</sup> 名古屋大学大学院 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

<sup>\*2</sup> 正員, 名古屋大学大学院工学研究科

<sup>\*3</sup> 株式会社 TYK (〒507-8607 岐阜県多治見市大畑町 3-1)

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

そこで我々は、レーザ誘起赤熱法（LII 法, Laser Induced Incandescence）に着目した<sup>(5)-(12)</sup>。LII 法では、レーザを用いるため高い時間・空間分解能で計測を行うことができる。また、非接触測定であるため測定場への影響も小さい。SMPS（Scanning Mobility Particle Sizer）などを用いたサンプリング計測は点計測であるのに対し、LII 法はレーザシートを用いた 2 次元計測が可能であるため、PM の瞬時の 2 次元分布を得ることができる。これまでに我々の研究グループでは、実車の排気ガスを LII 法で計測している<sup>(6)</sup>。そこで本研究では、エンジンベンチ<sup>(13)</sup>を用いて、実際のディーゼル機関から排出される PM の濃度や粒径を測定し、DPF の性能評価を試みた。

## 2. 実験装置及び実験方法

### 2・1 測定系

すす濃度の測定は、レーザ誘起赤熱法（LII）を用いて行った<sup>(6)</sup>。光源には Continuum 製 Inlite II-10 を用いた。その概略図を図 1 に示す。今回用いたレーザの特長としては、レーザヘッドが 84mm(H)×94mm(W)×323mm(L)と小型であり、電源部を入れた重さも 35kg 程度であるため持ち運びが十分可能である。ただし、LII 計測に用いた波長 532nm の第 2 高調波の最大出力が 125mJ/pulse であり、レーザシートで計測するには出力が不十分であった。そこで実際の計測では、レーザをシート状にはせずビーム（ビーム径 2mm）のまま用いた。本計測では、DPF 出口から 10 mm 下流の位置にレーザを照射しており、この位置が PM 濃度を計測する位置である。

LII 信号の検出には、イメージンテンシファイア付き CCD カメラ（浜松ホトニクス社製 C8484-05C）を用いた。図 1 に示したように、レーザビームの進行方向に対して垂直方向から LII 信号の画像を取得し、記録した画像データを解析した。CCD カメラの pixel 数は 1024×1024 であり、カメラと計測位置との距離を 150mm とした。その際の画像の大きさは 30mm×30mm であった。LII 法では、レーザが照射された領域でのみ PM 濃度の計測が可能であるため、実際に PM が計測される範囲は 30mm×2mm（2mm はビーム径）となる。また自発光等のノイズを除去するため、カメラのレンズ（ニコン社製可視光レンズ）にバンドパスフィルタ（透過中心波長 450nm, 半値幅 40nm）を取り付けた。また、画像を計測するゲート幅を 50ns に設定した。

LII 信号は粒子の体積濃度に比例することがわかっている<sup>(6)</sup>。そこで、粒子カウンター（EEPS）を用いて排ガス中の粒子濃度を測定し、LII 信号の校正を行った。EEPS 使用時の排ガスの流れと各機器の設置方法を図 2 に示す。DPF 上流には酸化触媒である DOC（ACR 株式会社製 ACR EXCAT C15）を配置している。EEPS はサンプリング計測であるが、粒径や数密度の測定が可能である。用いた機器は、TSI 社製の Model 3090 であり、各粒径ごとの濃度を 0.1 秒の時間分解能で全粒径同時に計測が可能である。採取した排ガスを希釈装置にて 350°C に加熱されたエアにより希釈して計測を行った。

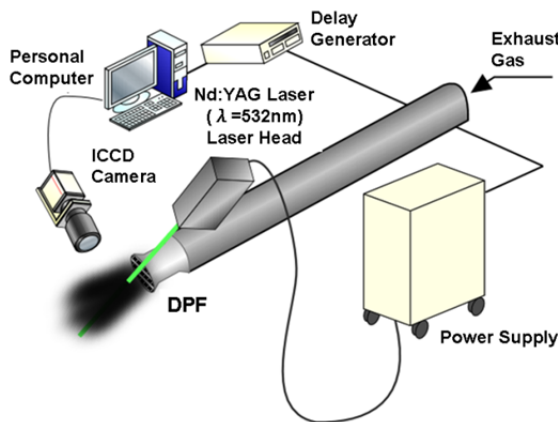


Fig. 1 Experimental setup for LII system

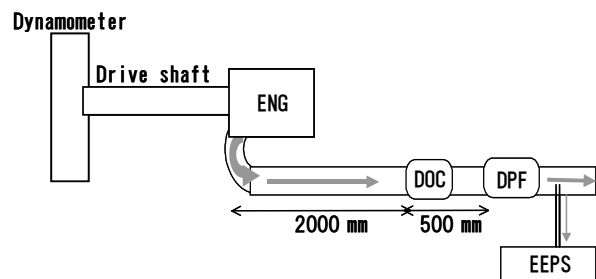


Fig. 2 Engine test bench

## 2・2 フィルタの特性

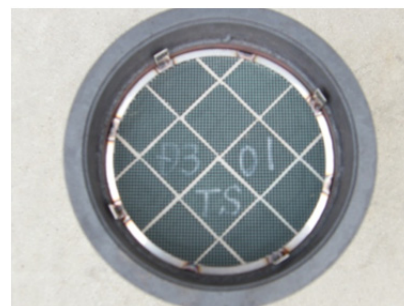
本実験では4種類のDPFを用いた。それぞれFilter 1～Filter 4とし、その特性を表1に示す。またフィルタを撮影した写真を図3に示す。すべて交互目封じ型のDPFであり、直径は200 mm、担体はSiCである。それぞれの特徴を説明する。Filter 1は気孔率が使用したフィルタのうち最小で、隔壁厚さは最大である。Filter 2とFilter 3を比較すると、気孔率、隔壁厚さともにFilter 2の方が小さい。またDPFの性能評価を行うため、フィルタの一部に亀裂の入ったFilter 4でも計測を行った。

Table 1 Specifications of DPF

	Porosity (%)	Wall thickness (mm)	Cell concentration (cps)	Crack
Filter 1	42	0.52	100	×
Filter 2	47	0.25	300	×
Filter 3	58	0.37	225	×
Filter 4	42	0.25	300	○



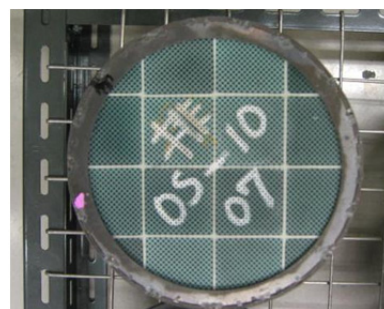
(a) Filter 1



(b) Filter 2



(c) Filter 3



(d) Filter 4

Fig. 3 Pictures of SiC-DPF

### 2・3 試験方法

今回はエンジン始動時の PM 濃度の挙動や PM ケーキ層が形成されるまでの PM 漏れを計測した。本実験で使用したエンジンの諸元を表 2 に示す。また、実験時のエンジンの運転方法を表 3 に示す。まず、未使用のフィルタを使用し、エンジン停止の状態から運転後の PM 濃度の時間変化を計測した。LII の計測を開始して 10 秒後にエンジンを始動させ、10 秒間アイドルリング運転を行った後、180 秒間負荷運転を行った。その後再び 30 秒間アイドルリング運転を行い、エンジンを停止させた。エンジン停止後、20 秒間は LII の計測を続けた。ここでアイドルリング運転は回転数 750 rpm、負荷 0 Nm であり、負荷運転は回転数 1400 rpm、負荷 190 Nm とした。

LII 画像は 1 秒間に 2 枚撮影した。したがって、表 3 に示した 250 秒間の計測では 500 枚の画像が得られることになる。既に説明したように、取得した画像の大きさはすべて 30 mm×30 mm であるが、3.2 節におけるフィルタ通過後の PM の漏れを詳細に調べた実験では、DPF 通過後の PM 濃度の空間分布を詳細に調べるため、亀裂の入った Filter 4 については計測の範囲を 96 mm×96 mm とした。

Table 2 Engine specifications

Model	NISSAN QD32 OHV diesel
Type	4 stroke
Cylinders	4, in-line
Valve mechanism	swirl chamber
Displacement	3.153 L
Rated Power	72 kW @3600 rpm
Peak Torque	216 Nm @2000 rpm
EGR System	none
Turbocharger	none (NA)

Table 3 Operating condition of the engine

Time (s)	Operating condition
0~10	Stop
10~20	Idling (750rpm-0Nm)
20~200	High-load operation (1400rpm-190Nm)
200~230	Idling (750rpm-0Nm)
230~250	Stop

## 3. 実験結果および考察

### 3・1 排ガス中の PM 濃度の時間変化

Filter 1~Filter 3 において得られた PM 体積分率の時間変化を図 4 に示す。エンジン始動時は、PM の排出量が多いため瞬間的に 20ppb 以上の高い PM 濃度が計測されているが、どのフィルタでも時間の経過とともに PM 濃度は 100 分の 1 以下に低下した。これは DPF 内に PM ケーキ層が形成され、捕集率が高くなったことに対応するものと思われる<sup>(3)(13)</sup>。Filter 1 に関しては計測開始後約 50 秒で体積分率がほぼゼロのレベルまで減少しており、他の 2 つのフィルタと比べると 4 分の 1 程度の時間でほぼ 100% の捕集率になっていることが分かった。これは Filter 1 の気孔率が 3 つのフィルタの中で最も小さく、隔壁厚さも最大であるため高い捕集性能を持つことに起因していると思われる。また Filter 1 はエンジン始動時の PM 濃度も Filter 2 および Filter 3 の半分程度であった。一方、Filter 2 と Filter 3 を比較すると、PM 濃度は全体的に Filter 2 の方が高い値を示した。すなわち、Filter 2 の方が PM の漏れが大きいことを示している。Filter 2 は Filter 3 よりも気孔率が小さいため、PM の漏れが小さくなると予想されたが、逆の結果となった。両者の隔壁厚さを比べると、Filter 3 の隔壁厚さが 0.37mm であるのに対し Filter 2 は 0.25mm である。したがって、フィルタの捕集性能は気孔率の大小だけでは単純に決まらず、隔壁厚さによっても捕集率が変化することが今回の計測で確認できた。

また隔壁に亀裂の入った Filter 4 を使用した場合の PM 体積分率の時間変化を図 5 に示す。Filter 4 を使用した場合も亀裂のないフィルタの場合と同様に、時間が経過するにつれて PM 濃度が減少することが分かる。おそらくフィルタに亀裂が入っている場合でも、PM を捕集していくと PM ケーキ層が形成され、フィルタの捕集性能が向上したためであると思われる。ただし、比較的仕様の近い Filter 1 の結果と比較すると、PM の濃度が 100 倍以上になっており、PM 漏れが非常に大きいことがわかる。したがって、PM ケーキ層が形成されても、フィルタの

内部に亀裂がある場合は、PM 粒子を含む排気ガスがその亀裂を選択的に通過してしまうため、PM の漏れが大きく捕集が不十分であることがわかった。

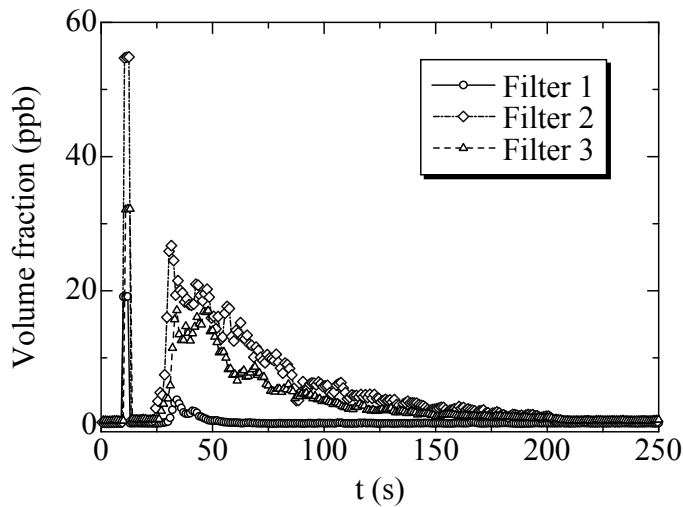


Fig. 4 Time variation of PM volume fraction

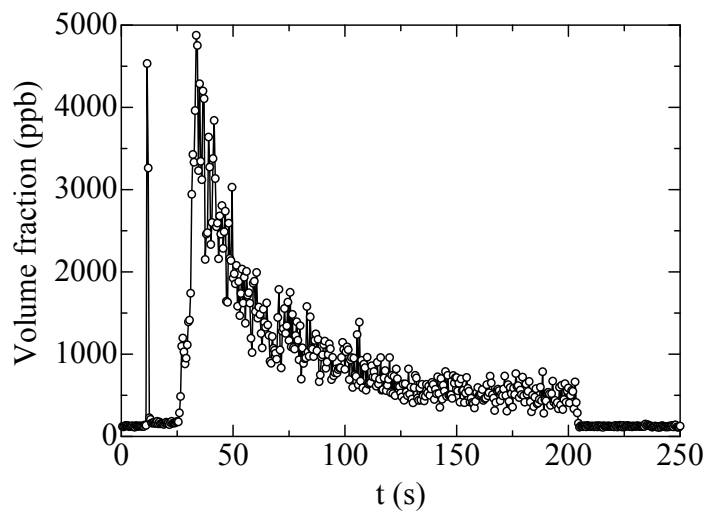


Fig. 5 Time-variation of PM volume fraction in Filter 4

### 3・2 フィルタ通過後の PM 濃度の空間分布

次に Filter 4 を使用して、DPF 通過後の PM 濃度の空間分布を調べた。この際、Filter 4 を取り付ける角度を変えてレーザの入射角を変えた 2 通りの計測を行った。それぞれ Case 1、Case 2 とする。LII の計測を行った際の Case 1 と Case 2 のレーザの入射方向を示した写真を図 6 に示す。このとき、Case 1 と Case 2 のレーザが成す角度（交差角）は  $50^\circ$  であった。ただし Case 2 の計測は、Case 1 の計測の後に同じフィルタを用いて行った。

この測定で得られた PM 濃度の空間分布を図 7 に示す。計測した時間内における PM の排出量を検討するため、表 3 で示した時刻 10 秒から 230 秒までの時間平均値を求めて図示した。既に説明したように、フィルタ通過後の PM の漏れを詳細に調べるため、計測の範囲を  $96\text{ mm} \times 96\text{ mm}$  としている。比較のため、同じ位置で計測した Filter 1 の結果も示す。このときの測定範囲は  $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$  である。Filter 1 を通過する前の PM 濃度は中心の値が外側に比べてやや高いが、フィルタ通過後の PM 濃度は一様であり、値は比較的小さい。一方、同時刻の Filter 4 の PM 濃度は Filter 1 に比べて非常に高く、PM 漏れが大きいことがわかる。局所的にはその値が  $1000\text{ ppb}$  以上となっており、図 4 で計測した初期 PM 漏れの 50 倍以上の値となった。また、PM 濃度の空間分布を調べると、Case

1の計測位置では  $r = -40$  mm と 20 mm 付近に明らかに PM 濃度が局所的に高い部分が観察された。これはおそらく、フィルタの亀裂がこの付近に存在し、PM の漏れが大きくなっていることに対応しているものと思われる。また、Case 2 の計測位置では  $r=10$  mm 付近において局所的に PM 濃度が上昇する部分が観察された。その位置は Case 1 とは異なっているが、Case 2 では Case 1 と異なる半径方向分布を計測しているためである。ただし、排出濃度が Case 1 より小さくなっている。Case 2 の計測は、Case 1 で 250 秒間の計測を行った後に同じフィルタで行ったため、フィルタの内部に PM の堆積層が既にできており、PM の漏れが小さくなったためであると思われる。

各時刻における PM 排出量を検討するため、Filter 4 を用いた Case 1 と Case 2 の、計測開始後 50, 100, 200 秒後の PM 濃度の空間分布の時間変化を調べた。その結果を図 8 に示す。いずれの場合も、時間が経過するにつれ PM 濃度が全体的に減少していくが、高い PM 濃度が検出される位置はどの時刻でもほとんど同じであった。このことから、DPF の亀裂から PM が漏れて、局所的に PM 濃度が高くなったことが確認できた。

以上の結果より、亀裂の入ったフィルタを使用したときの PM 濃度の空間分布には、局所的に PM 濃度が高くなる領域がみられ、これはフィルタの亀裂の影響であることが分かった。したがって、LII 法によりフィルタ通過後の PM 濃度を計測することで、フィルタ全体の性能評価だけでなく、亀裂の有無やその位置の特定が可能であることが示唆された。

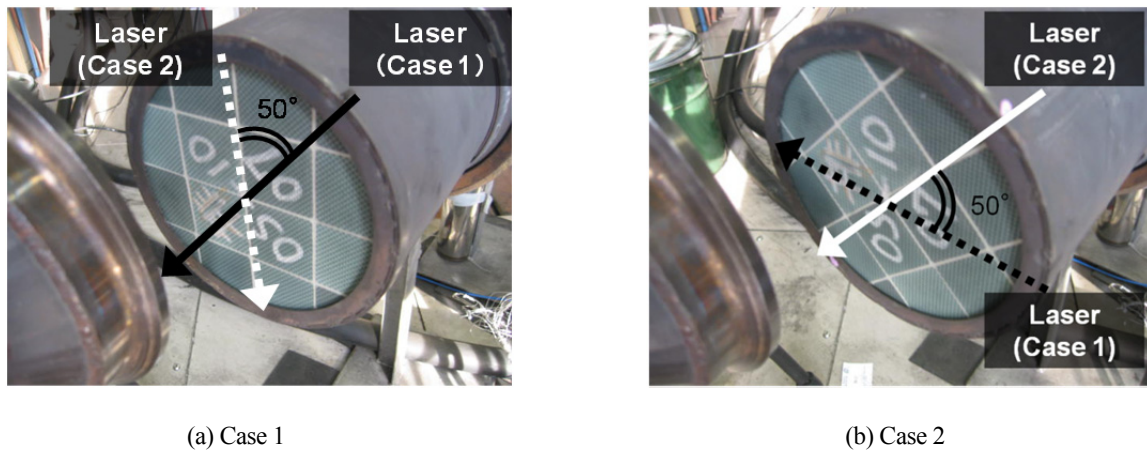


Fig. 6 LII setup and laser beam in Filter 4

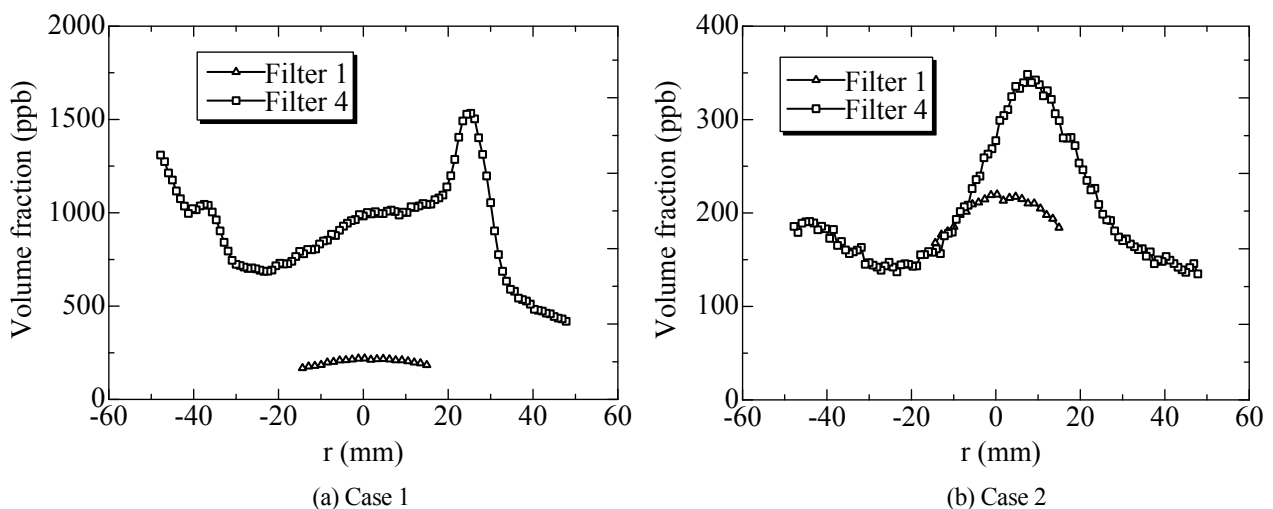


Fig. 7 Spatial distribution of PM volume fraction

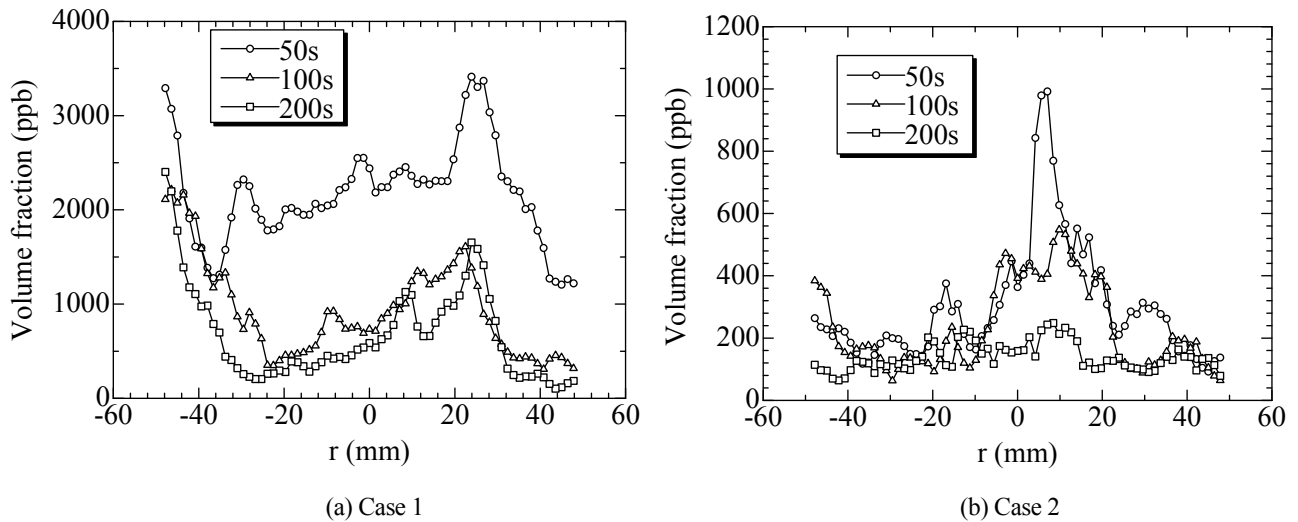


Fig. 8 Time-variation of spatial distribution of PM volume fraction

#### 4. 結 論

エンジンベンチを用いてディーゼル排気ガス中のPM濃度をLII法によって計測し、DPFの性能評価を行った。DPFによるPM捕集の時間変化を調べ、DPF使用初期におけるPM漏れや亀裂のあるDPFを使用したときのフィルタの性能について検討した。これにより、以下のような結論が得られた。

1. エンジン始動時はPMの排出量が多いため、20ppb以上の高いPM濃度が計測される。DPF内部にPMケーキ層が形成されてDPFのPM捕集性能が大幅に向上すると、どのフィルタでも時間の経過とともにPM濃度は100分の1以下にまで低下する。
2. DPF通過後のPMの体積分率がほぼゼロで捕集率もほぼ100%になる時間は、今回使用したフィルタの間で4倍程度の差が見られた。気孔率が小さく隔壁厚さが大きいほど、より短い時間でPMケーキ層が形成され、DPF使用初期のPM漏れが小さくなる。
3. 隔壁に亀裂の入ったフィルタを使用した場合、時間が経過するにつれてPM濃度は減少するが、亀裂がないフィルタを用いた場合と比較するとPMの漏れが非常に大きい。その値は、計測開始後の時刻10秒から230秒の時間平均で1000ppb以上の値が計測され、初期PM漏れの50倍以上の値となった。フィルタの内部に亀裂がある場合は、PMケーキ層が形成されても、PM粒子を含む排気ガスが亀裂のある隔壁部分を選択的に通過してしまうため、PMの捕集が不十分となる。
4. DPF通過後のPM濃度の空間分布を調べたところ、亀裂が存在する部分で局所的にPM濃度は高い値を示す。時間的にその位置が変化しないことから、フィルタ通過後のPM濃度を計測することで、亀裂の有無やその位置の特定が可能であることが示唆された。

#### 文 献

- (1) 齊藤敬三, “ディーゼル粒子フィルターの最近の動向”, エアロゾル研究, Vol. 24, No. 1, (2009), pp. 18-23.
- (2) 岩井和郎, 内山巖雄, “ディーゼル車排出粒子による人肺癌リスク試算〈予測〉”, 大気環境学会誌, Vol. 35, No. 4, (2000), pp. 229-241.
- (3) 関口謙一郎, 大坪靖彦, 岡崎俊二, 諏訪部博久, 徳留修, 山根英也, 石澤俊崇, “ディーゼル車排ガス浄化用セラミックフィルターの開発”, 日立金属技報, Vol. 21, (2005), pp. 65-72.

- (4) 横田久司, 小谷野真司, 浅海靖男, 福岡三郎, “DPF の大型ディーゼルトラックへの適用実験 (2) -排出ガスへの影響”, 大気環境学会誌, Vol. 34, No. 4, (1999), pp. 310-320.
- (5) 山本和弘, 藤掛文裕, 田谷幸洋, 林直樹, 山下博史, 可計重英, “LII 法によるすす計測とディーゼル排気ガスへの適用”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 74, No. 738, (2008), pp. 244-250.
- (6) Melton, L. A., “Soot Diagnostics Based on Laser Heating”, *Applied Optics*, Vol.23, No. 13, (1984), pp. 2201-2208.
- (7) 佐藤桂司, 林田和宏, 天谷賢児, 新井雅隆, “火炎中に生成される多環芳香族炭化水素のレーザ計測 (第 1 報, 時間分解計測によるレーザ誘起蛍光と赤熱発光の分離)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 70, No. 692, (2004), pp. 221-227.
- (8) Dasch, C., “Continuous-Wave Probe Laser Investigation of Laser Vaporization of Small Soot Particles in a Flame”, *Applied Optics*, Vol.23, No. 13, (1984), pp. 2209-2215.
- (9) Ni, T., Pinson, J. A. and Santro, R. J., “Two-Dimensional Imaging of Soot Volume Fraction by the Use of Laser-Induced Incandescence”, *Applied Optics*, Vol.34, No.30 (1995), pp. 7083-7091.
- (10) 稲垣和久, 三浦晋平, 中北清己, 渡部哲, “LII 法によるすす濃度定量測定法の開発 (第 1 報, LII の基本特性および信号減衰補正法の評価) ”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.63, No.615, (1997), pp. 316-323.
- (11) Shaddix, C. R. and Smyth, K. C., “Laser-Induced Incandescence Measurements of Soot Production in Steady and Flickering Methane, Propane, and Ethylene Diffusion Flames”, *Combustion and Flame*, Vol.107, No. 4, (1996), pp. 418-452.
- (12) Park, J., Ryoo, H. C., Chun, H. S., Song, S., Hahn, J. W. and Chun, K. M., “A Study on Time-Resolved Laser Induced Incandescence Analysis Method for the Measurement of Primary Particle Size in Diesel Exhaust”, *JSME International Journal*, Vol. 49, No. 4, (2006), pp. 1351-1357.
- (13) Tsuneyoshi, K., Takagi, O., Yamamoto, K., “Effects of Washcoat on Initial PM Filtration Efficiency and Pressure Drop in SiC DPF”, *SAE Technical Paper*, Vol. 01, No. 0817, (2011), pp.297-305.