

SiC ディーゼル微粒子フィルタの耐久性^{*}

常吉 孝治^{1) 3)} 山本 和弘²⁾

Durability of SiC Diesel Particulate Filter

Koji Tsuneyoshi Kazuhiro Yamamoto

The durability of hexagonal cell and square cell SiC diesel particulate filters (DPFs) were evaluated in the mechanical strength test and the drop to idle test (DTIT test). Results show that the b-axis and c-axis mechanical strengths of the hexagonal cell DPF are almost equal, and the values of Young's modulus of hexagonal cell DPF are lower compared with those of the square cell DPF. In addition, if the same soot amount is burned in drop to idle test, the difference between minimum and maximum temperatures inside hexagonal cell DPF is smaller than that of square cell DPF.

KEY WORDS : Heat engine, Particulate filter, Evaluation, Cell structure, Durability (A1)

1. 緒 論

ディーゼルエンジンはガソリンエンジンと比較して燃費に優れ CO₂ 排出量が少ないという特徴を持つが、ススなどの粒子状物質 (particulate matter; PM) が発生しやすいという問題がある。この PM の発生を抑制するために、排気ガスを高温にして PM を完全燃焼させようとした場合、より多くの NO_x が発生するという問題がある。排気ガスに含まれる PM や NO_x は大気汚染や健康被害の原因になるため、ディーゼルエンジンの克服すべき最大の課題でもある。

日本におけるディーゼル排気ガス中の PM 重量排出規制値は、現在のポスト新長期規制ではヨーロッパと同レベルの 5 mg/km 以下という厳しい規制が課され、今後のさらなる環境対策として粒子個数規制が導入されつつある⁽¹⁾⁽²⁾。ディーゼル微粒子除去フィルタ (diesel particulate filter; DPF) はこのような厳しい PM 規制に対する重要な後処理技術の一つである。

現在市販されている DPF の多くは多孔質セラミックから成るウォールフローDPF であり、厚さ 1 mm 以下の非常に薄い隔壁によって仕切られたセルと呼ばれる多数の流路を持つ構造体である。DPF 入り側から流入した排気ガスは、セルが入り側と出側で交互に目封じされているために多孔質隔壁を通り抜けて出側へと排出される。この際に排気ガス中の PM が隔壁にて捕集される⁽³⁾⁽⁴⁾。すなわち、隔壁一枚一枚が

フィルタの役割をし、多数の流路を備えることにより広いフィルタ面積を確保している。

DPF のセル構造は、製造面から通常四角形のもので使用されるが、スス堆積時やススの燃え残りである Ash 堆積時の圧力損失の増加⁽⁵⁾⁽⁶⁾を抑制するため、様々な構造のセルが考案されている。近年の製造技術の進歩によりこのような特殊構造のセルが実用化されるようになってきた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。我々の研究グループでも比表面積を大きく取れる六角セル構造に着目し、捕集性能や圧力損失の評価などを行った⁽⁹⁾。その結果、捕集初期には入り側から出側へと抜けるフィルタ隔壁上のみスス堆積層が形成され、スス堆積量が増加するにつれて入り側同士のセル隔壁上にもスス堆積層が形成されることを確認した。これにより、スス堆積層を薄くすることができ、スス堆積圧力損失を低減できることを明らかにした。

一方、DPF 内部にススが堆積すると、ススが自発的かつ急激に燃焼する異常燃焼が起こることが報告されている⁽¹⁰⁾。この場合、DPF の温度はススの急激な燃焼により極めて高温になる恐れがあり、想定外の急激な温度変化や DPF 内部の温度差により DPF が損傷を受けることが考えられる。このような熱的負荷により DPF 内部にクラックが発生するとクラック発生箇所からスス漏れが発生し、DPF にとって最も重要である捕集性能が低下する⁽¹¹⁾。したがって、DPF に予期せぬ再生が起こった場合の知見は非常に重要である。

*2013年3月7日受理。

1) (株)TYK 環境材料研究所 (507-8607 岐阜県多治見市大畑町 3-1) (E-mail:ku.tsuneyoshi@tyk.jp)

2)・3) 名古屋大学大学院工学研究科 (464-8603 名古屋市千種区不老町)

そこで本研究では、六角セル構造を持つ DPF の耐久性に着目し、従来の四角セル DPF と比較して評価した。具体的には、曲げ強度試験と圧縮強度試験によって機械的強度およびヤング率を測定した。また、DPF 内部に堆積したススが急激に燃焼する異常燃焼モード試験 (drop to idle test; DTIT⁽¹²⁾⁽¹³⁾) を行った。これにより、スス燃焼時の耐熱衝撃性についてセル構造による違いを検討した。

2. 実験装置及び実験方法

2.1. DPF

実験には 2 つの SiC - DPF を用いた。表 1 にサンプルの仕様を示し、外観及びセル拡大像を図 1 に示す。サンプル HEX は六角形のセルであり、サンプル SQ は従来の四角形のセルである。HEX は出側セルの周囲を入り側セルが囲うように配置されており、入り側セル同士が隣接する箇所がある。また、入り側の開口率が 46.2 % であり、出側開口率の 22.6 % よりも大きい。これに対し従来の四角セルのサンプルは、入り側と出側を交互に目封じするよう配置しているため、開口率は入り側と出側共に 34.2 % である。どちらのサンプルも入り側と出側の開口率を足しても 100 % にならないのは、フィルタユニットを連結する接着層の部分と隔壁部分が存在するためである。なお、いずれのサンプルにも触媒は担持していない。気孔構造を水銀ポロシメーター (MICROMERITICS 製 AutoPore IV 9500) を用いて計測したところ、表 1 に示すように気孔率と平均細孔径はどちらのサンプルもほぼ同じ値であった。

2.2. 曲げ強度試験

異なるセル構造を持つ DPF の耐久性を調べるため、機械的強度の評価として曲げ強度試験を行った⁽¹⁴⁾。測定には電子式万能試験機 (米倉製作所製 CATY) およびデータロガー (Agilent 製 34970A) を用いた。図 2 に曲げ強度試験におけるサンプル切り出しと試験時の模式図を示す。試験サンプルは、断面が一辺 15 mm の正方形で長さ 50 mm の試験片をフィルタユニットの流路方向に沿って切り出した。DPF の隔壁は流路方向に沿って伸びているため、どの方向に力が掛かるかによって大きく強度が異なる。そこで、フィルタユニットの外壁や隔壁に対して平行・直角になるよう切り出したサンプル (b 軸強度) と 45° 傾けて切り出したサンプル (c 軸強度) を、六角セル DPF と四角セル DPF からそれぞれ 4 つ切り出して用意した (Sample 1~4)。試験条件は、万能試験機を用いて支点間距離 40 mm、速度 1 mm / min の条件にて 3 点曲げ試験によって行った。

図 3 に曲げ強度試験時のサンプルのたわみと破断の模式図を示す。曲げ強度測定時に 2 点で支えられた材料が中央部上からの加重を受けた場合、実際には加重点の断面において材料上部には圧縮応力が働き、材料下部には引っ張り応力が働

Table 1 Sample specifications.

Sample	HEX	SQ
Substrate	SiC	
Size (mm)	Φ144× L153	
Cell Geometry	Hexagon	Square
Cell Density (cps)	300	
Wall Thickness (mm)	0.25	
Open Frontal Area (%)	46.2	34.2
Open Rear Area (%)	22.6	34.2
Porosity (%)	46.3	46.5
Median Pore Diameter (μm)	16.5	17.1
Washcoat	uncoated	
Pt Loading	none	

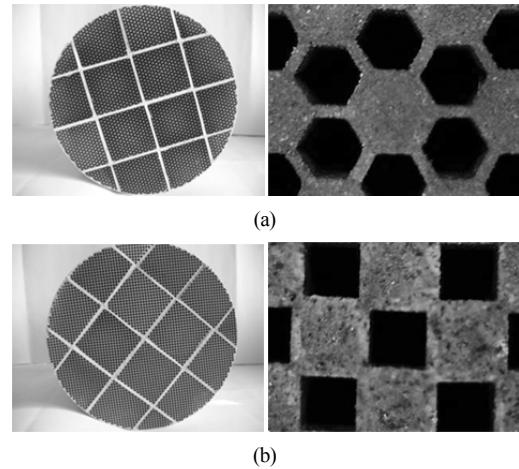


Fig.1 Appearance and cell designs of (a) hexagon cell DPF, (b) square cell DPF.

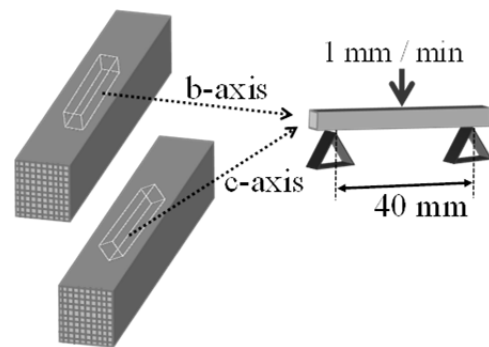


Fig.2 Schematic of bending strength test.

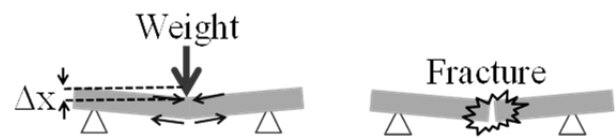


Fig.3 Schematic of fracture mode by bending strength test.

く⁽¹⁵⁾。一般にセラミックは圧縮よりも引っ張りに弱いため、曲げ強度試験時の破断強度とは引っ張り応力の限界値を測定していることになる。セラミック角柱の曲げ強度試験における破断強度 δ_{bend} (応力) は以下の式(1)によって与えられ、単位は MPa で表記される⁽¹⁵⁾。

$$\delta_{bend} = \frac{3 W_{bend} L}{2 r h^2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 W_{bend} は破断時の加重 (N) , L は支点間距離 (40 mm) , r は材料の断面幅 (15 mm) , h は材料の断面高さ (15 mm) であり、試験時の破断加重 W_{bend} から式(1)により破断強度 δ_{bend} を算出した。

また、DPF の耐久性を考える上で、単純な機械的強度に加えてヤング率 (構造物の剛性を示す値) についても把握しておく必要がある。そこで、曲げ強度試験を行ったデータから、それぞれのヤング率を算出した。曲げ試験におけるヤング率 E_{bend} は式(2)によって表される⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

$$E_{bend} = \frac{\Delta W_{bend} L^3}{4 r h^3 \Delta x_{bend}} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 ΔW_{bend} は破断前の一定区間での加重増加分を示し、 Δx_{bend} は図 3 に示したように加重増加分 ΔW_{bend} によるサンプルのひずみ量 (加重変位) を表す。

2.3. 圧縮強度試験

曲げ強度試験と同様に機械的強度を測定するため、圧縮強度試験も行った⁽¹⁶⁾。図 4 に圧縮強度試験のサンプル切り出しと加重の模式図を示す。DPF 流路方向を a 軸、フィルタユニットの外壁およびフィルタ隔壁に直交する方向を b 軸、フィルタユニットの外壁に対し 45° の角度を c 軸として、これらの異なる 3 方向からの強度試験を行った。試験サンプルは六角セル DPF と四角セル DPF からそれぞれ 15 mm³ の立方体を切り出したものを 4 つずつ用意した (Sample 1~4)。試験条件は圧縮速度 1 mm / min とし、曲げ強度試験と同様に電子式万能試験機とデータロガーを用いて測定した。圧縮強度 δ_{press} は、破断加重 W_{press} (N) をサンプル断面積 S (15×15 mm²) で割った値の応力として次式で表わされる⁽¹⁶⁾。

$$\delta_{press} = \frac{W_{press}}{S} \dots \dots \dots (3)$$

また、圧縮強度試験においても、強度試験によって得られた結果からヤング率を算出した。圧縮強度試験におけるヤング率 E_{press} は単位変位あたりの応力として次式で表される⁽¹⁶⁾。

$$E_{press} = \frac{\Delta \delta_{press}}{\left(\frac{\Delta x_{press}}{x} \right)} \dots \dots \dots (4)$$

x はサンプルの初期長さ (15 mm) である。圧縮強度測定試験時の加重増加分 ΔW_{press} に対してのサンプルのひずみ量 Δx_{press} を測定し、これをサンプルの初期長さ x で割ったものが単位長さ当たりの変位 (単位変位) であり、加重増加分 ΔW_{press} を加重面積 S で割ったものが応力増加分 $\Delta \delta_{press}$ である。これらの値から式 (4) を用いてヤング率 E_{press} が求められる。

2.4. 異常燃焼モード試験

堆積させたススを異常燃焼させる実験はエンジンベンチにて行った⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁹⁾⁽¹¹⁾。スス発生源として日産キャラバン QD32 エンジン (ディーゼル、排気量 3.153L、排出ガス長期規制-1997 年規制適合) を用いた。各機器の接続状態を図 5 に示す。エンジンを渦電流式動力計 (東京プラント製、ED-150) に接続して負荷をかけることにより運転条件を設定した。エンジンベンチの DPF 上流には酸化触媒である DOC (diesel oxidation catalyst, ACR 製 ACR EXCAT) を配置している。試験時は図 6 に示すように 12 本の熱電対 (ch1-12) を DPF 出側から DPF 内部に挿入した。

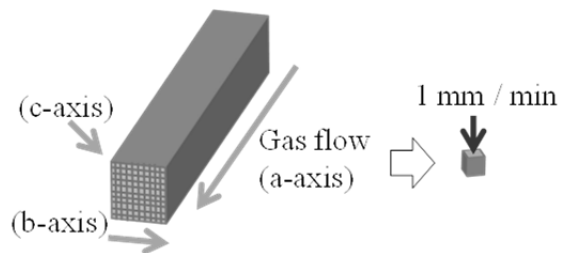


Fig.4 Schematic of compressive strength test.

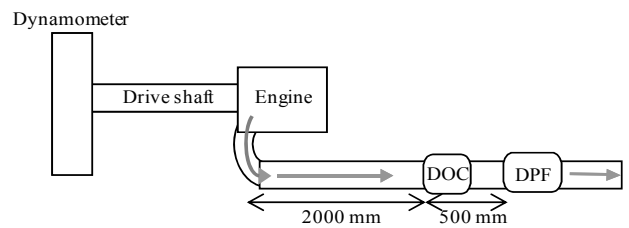


Fig.5 Experimental setup.

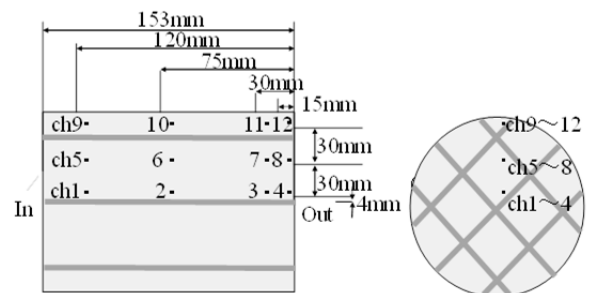


Fig.6 Positions of twelve thermocouples.

まず、回転数 1400 rpm、負荷 190 N・m の条件で予めスを堆積させた DPF を用意した。DPF を排気系に接続し、3000 rpm-フルスロットルで DPF を排気ガスの熱で昇温させ、内部温度(ch7)が 680 °C に達したところで速やかにアイドリング状態(750 rpm, 0 N・m)に移行させる。フルスロットル状態では酸素濃度が約 2 %と低いためススはほとんど燃焼しないが、アイドリング状態で酸素を多く含んだ排気ガス(酸素濃度 19 %)が送られることで、DPF 内部のススが急激に燃焼する。ススがある程度燃焼した後は、アイドリング状態の排気ガスにより徐々に冷却される。スス燃焼量は DPF の重量変化に基づいて算出した。試験は 6 g/L と 8 g/L のススを堆積させたサンプルでそれぞれ行った。

3. 実験結果及び考察

3.1. 強度試験結果

曲げ強度試験の結果を表 2 に、圧縮強度試験の結果を表 3 にそれぞれ示す。表 2 から、六角セル DPF (HEX) の曲げ強度は b 軸、c 軸ともに殆ど差が無いのに対し、四角セル DPF (SQ) は b 軸強度が c 軸強度の 2 倍程度と高い数値を示した。ただし c 軸で両サンプルの曲げ強度を比較すると、ほぼ同等であった。表 3 から、圧縮強度については a 軸の圧縮強度が六角セル DPF と四角セル DPF 共に非常に高い数値を示した。また、曲げ強度と同様に六角セル DPF の圧縮強度は b 軸、c 軸ともに殆ど差が無いのに対し、四角セル DPF では b 軸の圧縮強度が a 軸と c 軸圧縮強度の中間程度と、六角セル DPF の b 軸圧縮強度よりも高い数値を示した。ただし、c 軸の圧縮強度を両サンプルを比較すると、殆ど差がなかった。

これらの結果から、単純な機械的強度試験においては六角セル構造と四角セル構造では特に b 軸の強度は四角セル構造の方が高く、a 軸や c 軸の強度は b 軸と比べてセル構造による差が小さいということがわかった。四角セルの場合、b 軸

方向の試験では加重方向に対して直線的にセル壁が直立した形になり、構造上最大限に強度を発揮できる方向であると思われる。同様に圧縮強度の a 軸方向では、六角セルと四角セルいずれの場合でも加重方向に対して直線的にセル壁が直立した形になるため、最大限に強度が発揮できる方向であるといえる。

一方、b 軸と c 軸方向に着目すると、c 軸に対して b 軸の強度差がある四角セル構造は弱い c 軸方向に応力集中が起こり易い。そのため、再生時などの熱衝撃時には DPF のハニカム構造体の弱い部分、すなわちセルを斜めに横断する形で c 軸方向にクラックが発生しやすい。これに対し、六角セル構造では b 軸と c 軸強度に差が無いため応力を分散することができる。その結果、四角セル構造よりも六角セル構造の方が熱衝撃などの応力に対して優れた構造であることがわかった。

ヤング率について曲げ強度試験の結果から算出した値を表 4 に、圧縮強度試験の結果から算出した値を表 5 にそれぞれ示す。ヤング率は構造物の剛性を示す値であり、これが小さいほど柔軟な素材であるといえる。表 4 から、六角セル DPF の曲げ強度試験でのヤング率は b 軸、c 軸ともに四角セル DPF の値よりも小さいことがわかる。また、四角セル DPF の曲げ強度のヤング率は b 軸、c 軸に大きな差があるのに対し、六角セル DPF の曲げ強度でのヤング率は四角セルほど大きな差が無い。このため、発生する応力に対して b 軸か c 軸のどちらかに負担が掛かることなく柔軟に対応できると思われる。一方、表 5 から、圧縮強度試験でのヤング率は四角セル DPF では c 軸がもっとも小さい値を示し柔軟であるといえるが c 軸に対して b 軸のヤング率が 2 倍以上大きい。これに対し、六角セル DPF の圧縮強度ヤング率は b 軸、c 軸がほぼ同等の値であり、発生する応力を分散して柔軟に対応できると考えられる。

Table 2 Value of bending strength on each sample.

sample	HEX		SQ	
	b-axis	c-axis	b-axis	c-axis
1	11.60	12.75	20.31	11.76
2	10.96	13.55	22.53	12.21
3	10.19	10.38	15.65	10.80
4	12.06	10.37	23.21	10.21
average	11.20	11.76	20.42	11.25

(MPa)

Table 3 Value of compressive strength on each sample.

sample	HEX			SQ		
	a-axis	b-axis	c-axis	a-axis	b-axis	c-axis
1	15.03	0.96	0.86	19.86	9.44	0.86
2	14.98	0.73	0.78	18.38	6.25	0.79
3	14.24	0.69	0.67	18.51	7.49	0.68
4	16.42	0.87	0.90	18.21	8.34	0.83
average	15.17	0.81	0.80	18.74	7.88	0.79

(MPa)

Table 4 Young's modulus by bending strength test.

sample	HEX		SQ	
	b-axis	c-axis	b-axis	c-axis
1	190.94	118.26	664.37	574.24
2	183.51	137.52	1581.68	724.76
3	214.56	192.03	840.56	652.49
4	146.01	138.45	639.93	405.56
average	183.76	146.56	931.63	589.26

(MPa)

Table 5 Young's modulus by compressive strength test.

sample	HEX			SQ		
	a-axis	b-axis	c-axis	a-axis	b-axis	c-axis
1	221.81	96.32	107.80	363.51	212.99	66.08
2	351.15	89.38	71.87	314.50	144.60	52.64
3	351.93	109.76	108.45	367.27	126.65	91.47
4	311.41	73.70	86.24	283.55	134.26	59.87
average	309.08	92.29	93.59	332.21	154.62	67.51

(MPa)

3.2. 異常燃焼モード試験

各サンプルの異常燃焼モード試験時の最高温度到達時の内部温度分布を比較した結果を図 7 に示す。左側が入り側、右側が出側であり、軸対称を仮定してサンプル全体の温度分布を示した。いずれのサンプルでも温度が最も高くなる測定位置は出側中間部分(ch 8)であることがわかる。図 1 に示したように内側に配置された 4 つのフィルタユニットには排気ガスが通りやすいため、アイドリングに移行した際の酸素の供給も行われやすい。したがって、ススの燃焼も容易になり最高温度を示したものと思われる。ただし最も温度が上昇する位置は、ch 1 ~ 4 の DPF の中央部ではなく若干外側に外れた位置であることがわかった。DPF 中央部にはフィルタユニットを接合する接着層が存在し、ススの堆積およびガスの流れがあまり無いためであると思われる。このため、内側フィルタユニットと外側フィルタユニットを接合する接着層付近に大きな温度差が発生しやすい。アイドリング状態はフルスロットル高回転の昇温時と比較して、流量が極端に少ない。外側のフィルタユニットはアイドリング状態に移行した際の排気ガスの流れが悪く、酸素の供給が少ないためにススの燃焼が抑制される。そのため、アイドリング状態移行後も外側のフィルタユニットでは急激なススの燃焼は起こりにくく、温度も中心部ほど上昇しない。また、通常 DPF 再生試験の際と同様、DPF 外側は外部への熱損失があることも要因と考えられる。このような異常燃焼時の内部温度差によりサンプルは不均一な熱膨張を起こし、発生する熱応力はクラック発生の原因となる。

スス燃焼量に対する最大温度差（各サンプル内の測定した 12 点のうち最高温度と最低温度の差が最も大きい瞬間の温度差）を調べた。その関係を図 8 に示す。いずれのサンプルでも燃焼したスス量が増加するとサンプル内部の温度差が上昇した。また、同じスス燃焼量であれば六角セル DPF 内部の温度差が四角セル DPF よりも低くなる。別の言い方をすると、DPF 内部の温度差が同じ場合、六角セル DPF の方がより多くのススを燃焼させることができる。

強度試験とヤング率の算出結果および異常燃焼モード試験の結果から、セル構造が耐熱衝撃性に及ぼす影響について考察する。セラミックにおいて、温度差や急激な温度変化に対する耐熱衝撃抵抗係数 R は以下の式(5)によって与えられる(14)(17)(18)。

$$R = \frac{\sigma_f (1 - \mu)}{E \alpha} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 σ_f は発生する応力に対する機械的強度、 μ は熱膨張時の縦横比（ポアソン比）、 E はヤング率、 α は熱膨張係数である。機械的強度が大きい素材であれば、式(5)の分子が大きな値になり耐熱衝撃性が高くなる。また、ヤング率が小さく、熱膨張係数が小さいほど式(5)の分母が小さくなり耐熱衝

撃性が高くなる。セル構造による耐熱衝撃性への寄与を考えれば、機械的強度とヤング率の違いによって差が出る。機械的強度では b 軸方向において四角セル DPF が優れた結果となったが、同じく径方向での c 軸方向では殆ど差が無く、実質的にはどちらのセル構造も同等であると言える（表 2、表 3）。しかしながら、ヤング率で比較すれば明らかに六角セル DPF の方が小さく柔軟な構造である（表 4、表 5）。さらに、同じスス燃焼量であれば六角セル DPF の最高温度差が四角セル DPF よりも低くなる（図 8）。これらのことから、六角セル DPF の方が異常燃焼を起こした場合でも熱的な負担が小さく、耐熱衝撃性が優れていることがわかった。

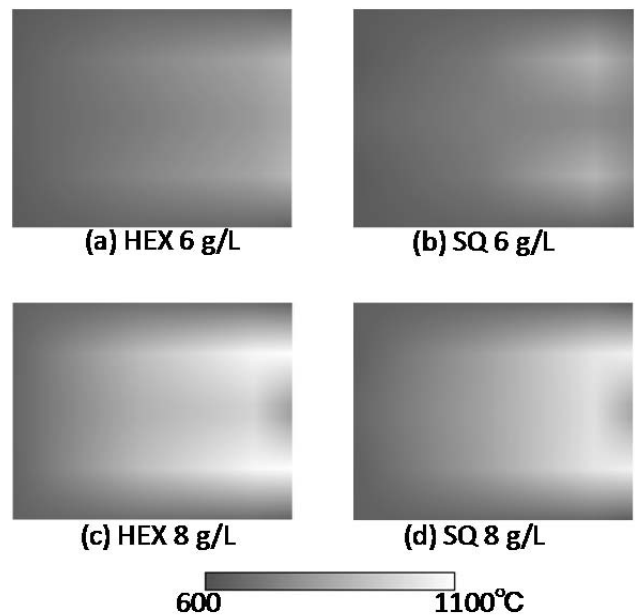


Fig.7 Comparison of temperature distribution on each sample at the time of maximum temperature in drop-to-idle test

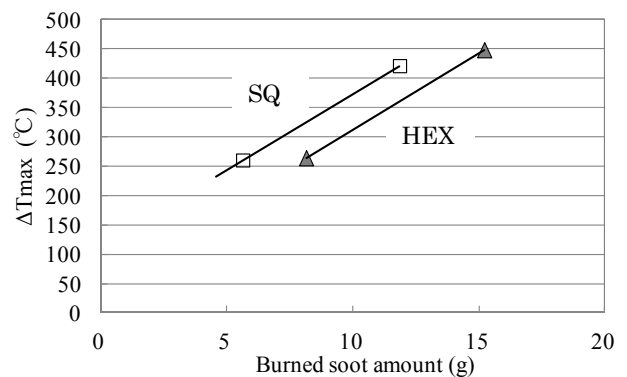


Fig.8 Difference between minimum and maximum temperatures inside DPF at different burned soot amount.

4. 結 論

セル構造が DPF の耐久性に及ぼす影響を調べるため、六角セル構造を持つ DPF と従来の四角セル DPF を使用し、機械的強度および異常燃焼モード時の内部温度について比較した。その結果、以下のことがわかった。

(1) 曲げ強度と圧縮強度について、b 軸の強度は六角セル DPF よりも四角セル DPF の方が高いが、a 軸や c 軸の強度はセル構造が違ってても殆ど差が無い。四角セル DPF は b 軸と c 軸の強度に差があるが、六角セル DPF では大きな差が無い。

(2) 六角セル DPF の方が四角セル DPF よりもヤング率が小さく、発生する応力に対して柔軟な構造を持っている。

(3) いずれのサンプルでも燃焼したスス量が増加するとサンプル内部の温度差が上昇し、同じスス燃焼量であれば六角セル DPF の温度差が四角セル DPF よりも低くなる。

(4) 機械的強度、ヤング率、温度差の関係から、六角セル DPF の方が四角セル DPF よりも耐熱衝撃抵抗係数が高い。これにより、異常燃焼を起こした場合でも六角セル DPF の方が熱的な負担が小さく、耐熱衝撃性に優れている。

参 考 文 献

- (1) 吉原洋一, 自動車と法規, 自動車技術, vol. 65, p. 8-17 (2011).
- (2) 瀬古俊之, 日米欧などにみる排出ガス規制の現状と今後, 日本自動車工業会 JAMAGAZINE, vol. 42, No. 502 (2008).
- (3) 常吉孝治, 高木修, 山本和弘, DPF の初期 PM 捕集性能と表面粗度の影響, 日本機械学会論文集 (B 編) vol. 76, No. 767, p. 1110-1117 (2010).
- (4) 常吉孝治, 高木修, 山本和弘, SiC-Diesel Particulate Filter のウオッシュコート処理による初期 PM 捕集性能への影響, 自動車技術会論文集, Vol. 41, No. 6, p. 1365-1370 (2011).
- (5) Liati, A. et al., Investigation of diesel ash particulate matter: A scanning electron microscope and transmission electron microscope study. Atmospheric Environment 49, p. 391-402 (2012).
- (6) Victor, W. et al., Characteristics and Effects of Ash Accumulation on Diesel Particulate Filter Performance: Rapidly Aged and Field Aged Results, SAE Technical Paper 2009-01-1086 (2009).
- (7) Ogyu, K. et al., Ash Storage Capacity Enhancement of Diesel Particulate Filter, SAE Technical Paper 2004-01-0949 (2004).
- (8) Ogyu, K. et al., Improving of the Filtration and Regeneration Performance by the SiC-DPF with the Layer Coating of PM Oxidation Catalyst, SAE Technical Paper

2008-01-0621 (2008).

- (9) Tsuneyoshi, K., Yamamoto, K., A study on the cell structure and the performances of wall-flow diesel particulate filter, Energy 48, p. 492-499, (2012).
- (10) Koltsakis, GC., Stamatelos, AM., Catalytic automotive exhaust aftertreatment, Progress in Energy and Combustion Science 23, p. 1-39 (1997).
- (11) 近藤真一, 山本和弘, 常吉孝治, LII 法によるディーゼル微粒子の計測と DPF の評価, 日本機械学会論文集 (B 編) 第 78 巻 789 号, p. 1143-1150 (2012).
- (12) Boger, T. et al., Oxide based particulate filters for light-duty diesel applications - impact of the filter length on the regeneration and pressure drop behavior. SAE Technical Paper 2008-01-0485 (2008).
- (13) Boger, T. et al., Next generation aluminum titanate filter for light duty diesel applications. SAE Technical Paper 2011-01-0816 (2011).
- (14) 橋本八郎, 中山淳, 機械的性質とその評価方法, セラミックスの機械的性質, 社団法人日本セラミックス協会, p. 59-71 (1979).
- (15) 松本慎也, 図解入門よくわかる構造力学の基本, 株式会社秀和システム, p. 122-126 (2003).
- (16) 奥津敏, 楽しく学ぶ構造力学, 株式会社彰国社, p. 43-54 (1989).
- (17) Kingery, WD., Bowen, HK., Uhlman, DR., セラミックス材料科学入門 応用編, 株式会社内田老鶴圃, p. 793-800 (1981).
- (18) 井関孝善, 耐熱衝撃性, 耐火物手帳' 99 耐火物技術協会, p. 79-81 (1999).