

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—

住友化学株式会社

基礎化学品研究所

根本 明 欣
岩崎 健太郎
山西 修
土本 和也
魚江 康輔
當間 哲朗
吉野 朝

Development of Innovative Diesel Particulate Filters based on Aluminum Titanate: Design and Validation

Sumitomo Chemical Co., Ltd.

Basic Chemicals Research Laboratory

Akiyoshi NEMOTO
Kentarō IWASAKI
Osamu YAMANISHI
Kazuya TSUCHIMOTO
Kousuke UOE
Tetsuro TOMA
Hajime YOSHINO

Diesel particulate filters have contributed to decreasing particulate matter (PM) in the exhaust gas of diesel cars, and they have become standard diesel exhaust gas after-treatment devices. Silicon carbide (SiC) is currently used as a material in these filters due to its high thermal stability. Aluminum titanate (AT) is recognized as a candidate for the next generation of filters due to advantages not only in manufacturing cost but also in superior performance. We have developed an innovative AT filter, and in this paper we introduce its design concepts and validation results.

はじめに

地球温暖化進行の防止のため、二酸化炭素 (CO₂) の排出低減技術への注目度がますます高まってきており、自動車から排出されるCO₂の低減にも多くの関心が寄せられている。今後20年間自動車用のパワートレインとして、内燃機関は適切な選択肢で有り続けると考えられている。なかでもディーゼル自動車は、ガソリン自動車に比べ燃費が優れるなど、エコカーの一つと認識されている。一方、ディーゼルエンジンから排出されるガス中の粒子状物質 (PM)、窒素酸化物 (NO_x) の低減など、ディーゼル自動車の場合は環境対策が重要となる。環境対策に関して、ディーゼルエンジンの排ガス後処理システムに関する研究は、欧米を中心に従来から盛んに行われており、特にPM問題に関しては、ディーゼル・パーティキュレート・フィルタ (Diesel Particulate Filter; 以下“フィルタ”と呼ぶ) の採用により、一定の解決の目処を得ることができた。

Table 1 European regulations on diesel passenger cars

	Euro5	Euro6
Phase-in Dates	Sep 1, 2009	Sep 1, 2014
PM	5mg/km	4.5mg/km
NO _x	180mg/km	80mg/km

しかし、欧州排ガス規制に代表されるように、規制は年々厳しくなり (Table 1)²⁾、更なる高性能フィルタの開発が、今なお進められている。

フィルタ構造としては、セラミックスを用いたハニカム構造体の入口・出口を交互封じた、ハニカム壁面を濾過面とするウォールフロー型と呼ばれる構造のものが主に用いられている。ハニカム壁面自体は多孔構造を有し、排ガスがこの多孔層を通過する間に、排ガス中からPMが取り除かれる (Fig. 1)。しかし、PM捕集に伴う排気圧力損失の上昇や、フィルタ上の堆積

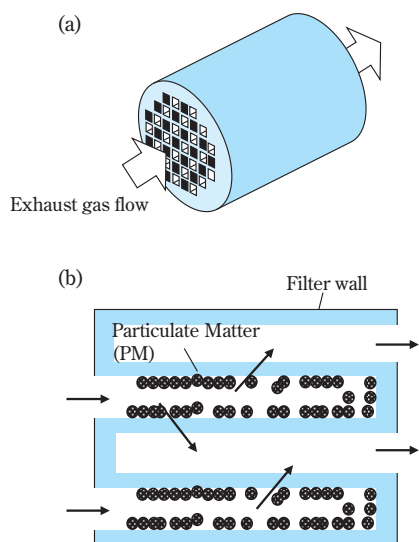


Fig. 1 (a) Diesel particulate filter and (b) PM filtration mechanism by “wall-through” structure observed from cross-section area.

PMを定期的に燃焼除去させるため、フィルタ装着により1~3%レベルの燃費悪化があるとされている³⁾。

現在のフィルタ材料としては、耐熱特性が優れた炭化珪素 (Silicon Carbide; SiC) が主に用いられている。SiCは熱膨張係数が大きいいため、SiCフィルタは特定寸法の角柱状の基本ユニットを張合せて作る「セグメント」方式を採用しており、接合層でフィルタ全体の熱膨張を吸収するしくみとなっている (Fig. 2 (a))。しかしながら、この「セグメント」方式は、「一体成型」方式のフィルタに比べて製造コストが高く、また材料ロスも多いため、フィルタ価格の高コスト化の一因となっている。また、接合層がPM除去フィルタとして機能しない“デッドス

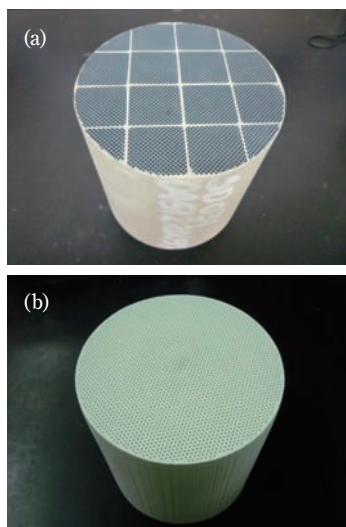


Fig. 2 Photos of basic filter structure (a) SiC (segment-binding structure) and (b) SC-AT (monolith structure).

ペース”となるなど、性能面でのデメリットもある。

我々は、高耐熱性、低熱膨張性を有するチタン酸アルミニウム (Aluminum titanate; AT) に着目し、一体成型が可能で (Fig. 2 (b))、かつ既存のフィルタ特性を凌ぐ次世代型フィルタの開発を行ってきた。今回は、我々が開発したフィルタの基本設計思想を説明するとともに、設計思想に基づいて作製したフィルタの特性評価を通して、製品設計の妥当性を検証・実証したので報告する。

フィルタ製品開発の進め方

当社におけるフィルタ製品開発の進め方を説明する。

フィルタ自体は既に他社品が市場を形成しており、当社はフィルタに関しては、いわば“後発”メーカーとなる。我々は、Euro6規制の運用開始時期 (2014年) での市場参入を目標に、現状のフィルタより低コストかつ高機能なフィルタを、短期間に開発するということを大前提に、自動車業界の品質マネジメントシステム国際規格 (ISO/TS16949) に則った、量産対応での品質面等も考慮して製品開発を進めている。

以下、市場調査、顧客情報から集約された代表的なフィルタの要求特性を以下に記載する。

- ① 圧力損失特性
- ② PM捕集特性
- ③ 耐熱特性
- ④ 耐熱衝撃特性
- ⑤ 機械強度特性 (初期、繰返し)
- ⑥ 耐アッシュ特性 (物理的堆積量、基材との反応性)

顧客により個々の要求レベルは異なるが、今回は市場フィルタと性能を比較することで、製品設計の妥当性を検証した。

フィルタ基本設計思想

フィルタの設計は、以下の要素からなる。

- ① 材料設計：フィルタ材料の設計。フィルタの耐熱・耐熱衝撃特性や機械強度特性、耐アッシュ特性 (基材との反応性) に影響する。
- ② 細孔構造設計：濾過面として用いる隔壁の細孔特性設計。フィルタ基本特性となる圧力損失特性やPM捕集特性に影響する。
- ③ セル構造設計：ハニカムのセル構造 (形状) 設計。圧力損失特性や耐熱衝撃特性、耐アッシュ特性 (物理的堆積量) に影響する。
- ④ マクロ設計：フィルタの寸法や形状など。顧客がキャニング性や搭載性を考慮し指定する。

この中で、①~③の項目について、各設計思想の概要を以下に示す。

1. 材料設計

自動車排ガスラインに配置される部材は、種々の過酷な条件に曝される。例えば、エンジン運転状態の急激な変動による過酷な熱履歴、エンジンや路面からの振動、燃料やオイルなどを発生源とする反応性の高い化学成分（アッシュ）との接触などである。

中でも、フィルタは内部に捕集したPMを、一定期間堆積後に燃焼・除去（以下、「再生」と呼ぶ）する必要がある、その際発生する燃焼熱により、フィルタは他の部材以上に過酷な熱履歴にさらされることになる。フィルタ再生は、通常はコントロールされた比較的マイルドな条件で行われるが、まれにこの制御がきかない条件（我々は“ワーストケース・リジェネレーション”と呼んでいる）で再生される。このとき、再生PM量が多いほど燃焼は過酷になるので、実車においては“ワーストケース・リジェネレーション”が起きてもフィルタが損傷しないように、再生開始タイミングが設定されている。この再生開始タイミングは、本稿の後半でも述べる「煤堆積限界（Soot Mass Limit; SML）」試験で得られるSML値から決定される。この値が大きいほど多量のPMを一度に燃焼除去できるので、再生回数を減らすことができ、燃費悪化の改善が可能となる。

SMLに影響する因子としては、耐熱衝撃パラメータTSP (Thermal shock parameter) 及び基材の熱容量が挙げられる。

TSPは、以下に示すような材料物性の相関式として簡易的に計算することができる⁴⁾。この中で、MOR/eModは、それぞれの値が一般に連動して変動し、MOR/eModはほぼ一定値となるので、TSPを上げるためには、CTE (Coefficient of thermal expansion、熱膨張係数) を低減させることが最も有効と考えられている。

$$TSP = MOR / (CTE \times eMod) \quad (1)$$

TSP ; Thermal shock parameter

MOR; Bending strength

eMod; Young modulus

CTE ; Coefficient of thermal expansion

また、SMLに間接的に寄与する材料物性として、フィルタの“熱容量”がある。これは、フィルタ再生の際発生する熱により、フィルタ自体が昇温されるが、

“熱容量”が大きいほど再生時の昇温挙動が“マイルド”になる（＝急激な温度変化小）。セラミックスの場合、同体積で比較した場合、“物質密度が大きい”ことが“熱容量が大きい”とも言い換えることができる。

Table 2に既存フィルタ材料であるSiC、コージエライト (2Al₂O₃・2MgO・5SiO₂)、および我々が開発したチタン酸アルミニウム（以下、「SC-AT」と呼ぶ）の材料物性を示した。SC-ATは、CTEが小さく、かつ熱容量が大きいので、SML特性が良いものと期待でき、フィルタ材料としては既存材料より適したものと考えられる。

しかし、チタン酸アルミニウム (AT) は一般に1000～1200℃の温度では準安定相領域に位置するため、チタニアとアルミナに分解すると言われている。この温度域はPM再生時に到達する領域であり、ATをフィルタ材料とする際、最大の問題と考えられていた。我々はこの点にも着目し、この温度領域でも熱分解を抑制できるAT材料を開発した⁵⁾。

2. 細孔構造設計

フィルタの隔壁はミクロンオーダーの微細な孔を持つ“多孔構造”を有しており、その構造（孔の大きさや分布）はPM捕集特性（＝捕集効率）や圧力損失特性に大きく影響する。すなわち、PMを効率よく捕集するためには気孔率や細孔径は小さい方が良く、一方圧力損失を小さくする（＝効率よくガスを流す）ためには、気孔率や細孔径は大きい方が良く、両特性の兼ね合いから、最適な細孔構造を決定する。

我々は、最適な細孔構造を実現すべく、市場品 (Serial) フィルタをベースに、PM捕集特性や圧力損失特性を指標とした細孔構造の最適化を小実験スケールにて実施した (Fig. 3)。Fig. 3には、それぞれの細孔特性（気孔率、平均細孔径）を併記し、PM捕集特性効率、圧力損失特性をSerial (A)の値で規格化して示した。なお、Serial (A)、Serial (B)、Serial (C)とは、市場から入手したフィルタであり、中でもSerial (A)は、現状の世界市場で最も使用されていると考えられる材料系のフィルタである。

Serial (A)は隔壁に比較的小さい細孔（低気孔率、平均細孔径小）を有しているため、極めて高いPM捕集効率を示す。一方、Serial (B)およびSerial (C)は、比較的大きい細孔（高気孔率、平均細孔径大）を有し、Serial

Table 2 Comparison for material properties and effect on Soot mass limit

Substrate material	SC-AT	SiC	Cordierite	Effect on Soot mass limit
Theoretical density [g/cc]	3.7	3.2	2.6	High
Heat Capacity [J/L・K]	2000	1900	1300	High
CTE/ $\times 10^{-6}$ [1/K]	1	4	< 1	High
Thermal Conductivity [W/m・K]	2	50	2	Low

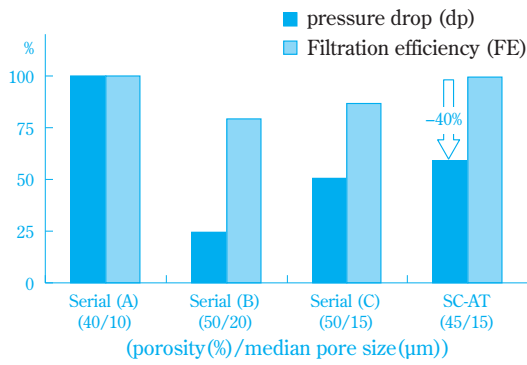


Fig. 3 Filter performance on pressure drop (dp) and filtration efficiency (FE) for Serial filter and SC-AT under simulated experimental. dp and FE shows relative percentage for Serial (A).

(A)に比べて圧力損失が低いが、PM捕集効率が悪い。圧力損失と捕集性能の両特性をバランスよく実現するため、SC-ATの細孔構造を検討・改良し、高捕集効率、低圧力損失を実現できる細孔構造を見出した。

3. セル構造設計

フィルタのセル構造は非常に重要な設計要素の一つである (Fig. 4にフィルタ入口側から見たセル構造の実物の一例を示した。またFig. 5に代表的なセル構造例をイメージにて示すが、詳細は後述する。)

その理由としては、一つはセル構造が濾過面積に影響を与え、その結果フィルタの圧力損失特性に大きく影響するためである。もう一つは耐アッシュ特性のうち、物理的なアッシュの堆積容量 (アッシュキャパシティ) に大きく影響するためである。

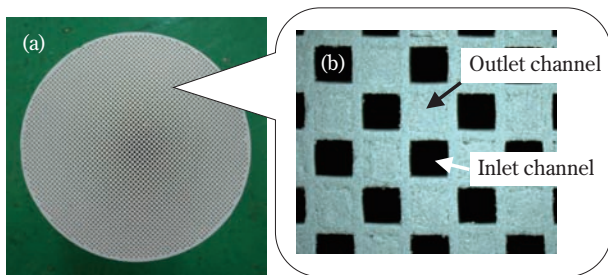


Fig. 4 Photos in Cell geometry on filter structure (a) Inlet face on filter (b) An example of square (SQ) cell geometry.

(1) セル構造の圧力損失特性への寄与

フィルタの圧力損失特性は、以下の3つの状態で議論する必要がある。

- ① ベア (無触媒化状態)
- ② コーティング (触媒化状態)
- ③ ライフエンド (アッシュ堆積状態)

今回は、市場品フィルタ (触媒化品) と比較するために、②コーティング状態にてフィルタの圧力損失特性を比較検討した。(実車ででの使用時の初期状態に相当。)

フィルタの圧力損失特性に関しては、以下の (2) 式のように、各成分に分解して表すことができる⁶⁾。PM堆積後においては、流入ガスがPM堆積層を通過する抵抗分の圧力損失 (dp4) が最も高い寄与率を示す。さらに、“dp4”は (3) 式で表され、PM堆積層高 (w) に大きく支配される^{1),3)}。フィルタの濾過面積の増大にて、同量のPM堆積条件下では“w”の低下を実現でき、その結果フィルタの圧力損失特性が改善できるものと期待できる。

$$dp = dp1 + dp2 + dp3 + dp4 + dp5 + dp6 \quad (2)$$

- dp1,6; expansion/reduction resistance inside the exhaust pipe
- dp2,5; inlet- and outlet- channel through resistance
- dp3 ; wall material through resistance
- dp4 ; soot layer material through resistance

$$dp4 = \mu us w/k0 \quad (3)$$

- k0 ; constant for soot material
- μ ; gas viscosity
- us ; gas velocity
- w ; thickness of soot layer on the wall

(2) セル構造のアッシュキャパシティへの寄与

排ガスに含まれる固体成分には、PM以外に、燃料や潤滑油から混入する無機成分、さらにはシリンジの摩擦によって混入される金属成分などが含まれ、これらは総称してアッシュ (灰分) 成分と呼ばれる。アッシュ成分はフィルタ内部に徐々に蓄積し、フィルタの有効

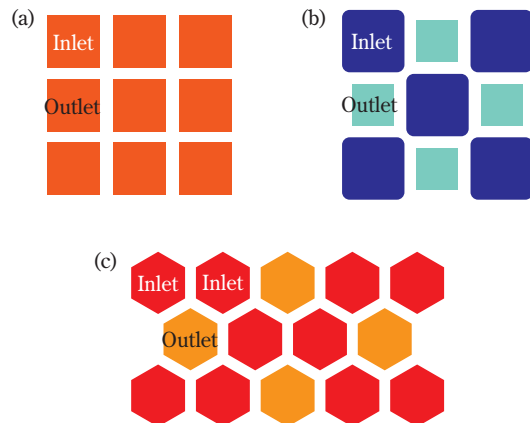


Fig. 5 Variety in cell geometry. (a) Square design (SQ), (b) Octo-square design (OS), and (c) Hexahex design (HEX). Cell geometry consists of inlet and outlet channels.

濾過面積の低下を引き起こし、圧力損失の増加にもつながる。

その解決策として、入口側セルのサイズを出口側セルよりも大きくした非対称構造が他社から提案されている（例えば、OSセル構造（Octo-square）⁷⁾、ACTセル（Asymmetric Cell Technology）構造など）⁸⁾（Fig. 5 (b) にOSセル構造例）。OSセル構造は、従来の標準セル構造（Square; SQ, Fig. 5 (a)）に比べて、開口面積率（Open Frontal Area; OFA）が大きいいため、フィルタ内部に堆積できるアッシュ量（Ash capacity）を増大させることができ、具体的にはフィルタの使用寿命を30%程度上げることができると言われている。

(3) HEXセル構造の優位性

OSセル構造は、入口セル（Inlet）チャンネルと出口セル（Outlet）チャンネルの総断面積にアンバランスが生じるため、一方のチャンネルでガス流速が極端に速くなり、その結果ハニカム内のチャンネル抵抗が大きくなり、フィルタの圧力損失が高くなるというデメリットも併せ持つ（(2) 式の“dp5”成分に相当）。

一方、我々が採用した非対称型の六角セル構造（Hexahex; HEX）（Fig. 5 (c)）は、水力直径が大きいチャンネル（通常は出口側）1個に対して、水力直径が小さいチャンネル（通常は入口側）複数個（通常は2～3個）を基本単位としており、入口セル（Inlet）チャンネルと出口セル（Outlet）チャンネルの総断面積を同レベルにすることもできるため、OSセル構造での問題であったチャンネル抵抗の増大を抑制することができる⁹⁾。

また、後述するように、HEXセル構造の有効濾過面積はOSセル構造と比べても大きいため、PM堆積後の圧力損失を低くすることができるものと期待できる（有

効濾過面積増大により、(3) 式のPM堆積層高（w）を低減することができるため）。

以上のように、我々が採用したHEXセル構造は、圧力損失の低減と、アッシュキャパシティーの増大を同時に実現することが可能である。

特性評価

1. フィルタ諸元比較

材料設計、細孔設計およびセル構造設計で検討・開発した要素を組み合わせ、実寸大（φ5.66inch×6.0inchL）のフィルタを作製し、フィルタ性能評価を実施して、上述の設計思想の妥当性検証を行った。

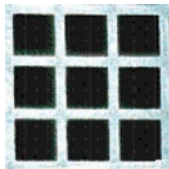
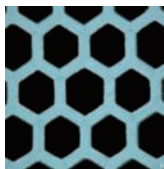
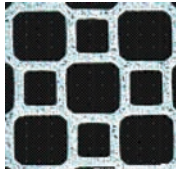
SC-ATとして、2種類のセル構造（SQ、HEX）のフィルタを作製した。フィルタの触媒化は、市場品フィルタに施されている処方にて、外部委託で実施した。また、市場のSiC（OS）フィルタ（現Euro 5対応車載品）（Fig. 3のSerial (A)に相当）を比較材とした。

最初に、各フィルタ諸元をTable 3に示した。特にSC-AT（HEX）において、高OFAとともに、高濾過面積が達成されていることが分かる。また、SC-AT（HEX）は各セルチャンネルの水力直径（Hydraulic diameter）も入口セル（Inlet）、出口セル（Outlet）でほぼ同じであり、アッシュキャパシティー特性とともに、低圧力損失特性も期待できる。

2. 圧力損失特性

Fig. 6にPM堆積時の圧力損失特性の測定結果を示した。初期PM堆積領域（PM堆積量が1g/L未満）以降のPM堆積モードがケーキ濾過領域と考えられており、この領域ではPM堆積量に対して直線的な圧力損失の上

Table 3 Filter specification of validated filter samples

Filter	SC-AT		SiC
	Square (SQ)	Hexahex (HEX)	Octo-square (OS)
Cell geometry			
Weight [g L ⁻¹]	800	800	700
Hydraulic diameter IN/OUT [mm]	1.2/1.2	1.2/1.3	1.5/0.9
Cell density [cpsi]	300	350	300
Wall thickness [mil]	12	11	11
Segment binding area [%]	–	–	5
Open frontal area [%]	33	41	44**
Filtration area [m ² L ⁻¹]	1.0	1.3	1.0**

** Including frontal area loss by segment binding layer.

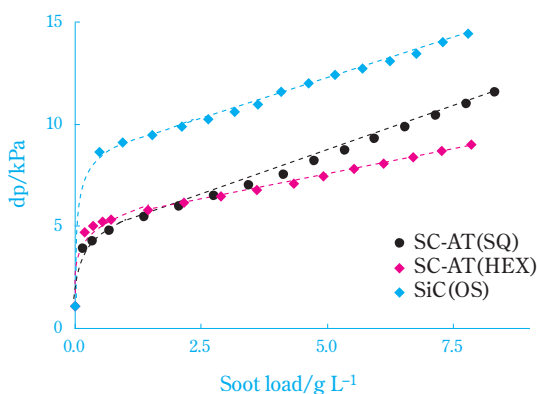


Fig. 6 Soot-load dependence on changes in pressure drop under cold flow bench. Filter dimension for all samples ; 5.66" in diameter and 6" in length with cylindrical shape.

昇が観測された。高濾過面積が実現できるSC-AT (HEX) にてこの傾きが小さく、HEXセル構造の圧力損失特性に対する優位性を確認できた。

なお、初期PM堆積領域は、トランジェント領域と呼ばれ、PMが隔壁細孔内に侵入し、堆積されるものと考えられている。細孔が比較的小さい(=低気孔率、平均細孔径小) SiC (OS) は、細孔内チャンネルがPMにより閉塞されやすい結果、急激に圧力損失が上昇したのと考えられた。SC-ATの気孔特性も、圧力損失特性には有利に働いていることが確認された。

3. PM捕集効率

PM捕集効率測定は、PM発生装置 (REXS, Matter Engineering AG製)、粒子カウンタ (EEPS3090, TSI製) を用いて行った。なお、測定レンジの個数検出範囲に入るように、分取ガスは希釈器 (MD19-1i, Matter Engineering AG製) にて希釈し、粒子カウンタに導入した。

PM捕集効率は、PMを含むガスをフィルタに流し始めたタイミングを $t=0s$ として、以下の式にて求めた。

$$\text{PM捕集効率 (\%)} = 100 (1 - N_{600s}/N_0) \quad (4)$$

N_0 : 装置からの発生PM個数濃度 (個/cm³)

N_{600s} : 600s後のフィルタ通過PM個数濃度 (個/cm³)

Fig. 7にPM捕集効率を算出するに当たってのPM個数濃度の経時変化を示した。いずれのフィルタにおいても、各PM粒子径でPM個数濃度が経時的に低減しており、PMがフィルタで効率よく捕集されていた。(4)式に従い、PM捕集効率を計算すると、SC-AT (HEX) で96%、SiC (OS) で94%であり、SC-AT (HEX) はSiC (OS) と同等以上のPM捕集性能を有することが示された。

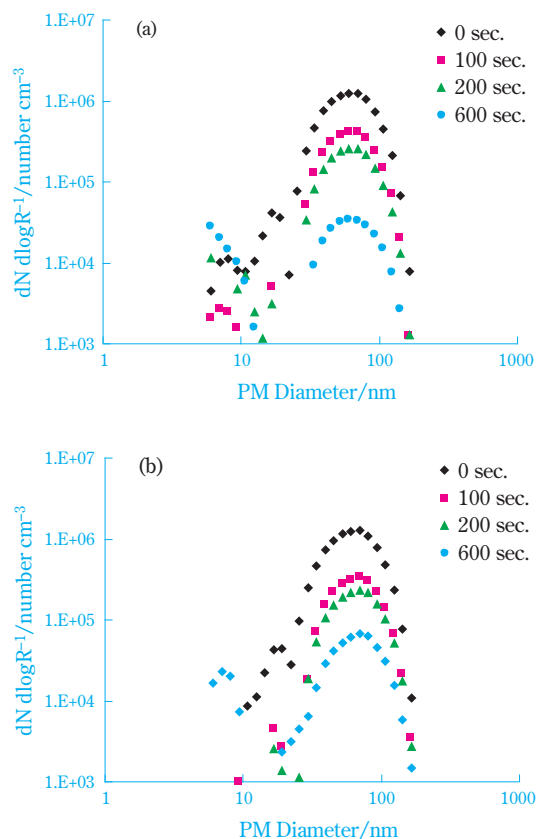


Fig. 7 Changes in PM number distribution on downstream filter. (a) SC-AT(HEX) and (b) SiC(OS).

4. SML (Soot Mass Limit) 試験

欧州評価メーカーのエンジンベンチを用い、フィルタの耐熱衝撃性となるSML試験を実施した。フィルタ再生に当たっては、以下の通りワーストケース・リジェネレーションと呼ばれるDrop-to-Idle (以下“DTI”と呼ぶ) モードにて実施した。

(1) 使用設備

エンジンは2.0L-class DI engine (最大出力110kW、最大トルク330Nm、Common Rail式燃料噴射システム方式) を使用した。フィルタの上流にDOC (Diesel Oxidation Catalyst) を配置した。また、測定にあたり、Fig. 8に示すように、フィルタ内部に熱電対 (K-type) をフィルタ下流側から挿入し、フィルタ再生時の温度挙動をモニターした。なお、Fig. 8にはSML試験フロー、および代表的な熱電対位置での温度上昇挙動も示した。

(2) 試験条件 (DTI)

最初に所定量のPMをフィルタに堆積した。PM堆積量は一旦フィルタをキャニングケースごと取り外して重量を測定することで確認した。再度キャニングケースをエンジンベンチにセット後、所定モードにてエンジンを運転し、Post injection (PIJ) にてフィルタ上流

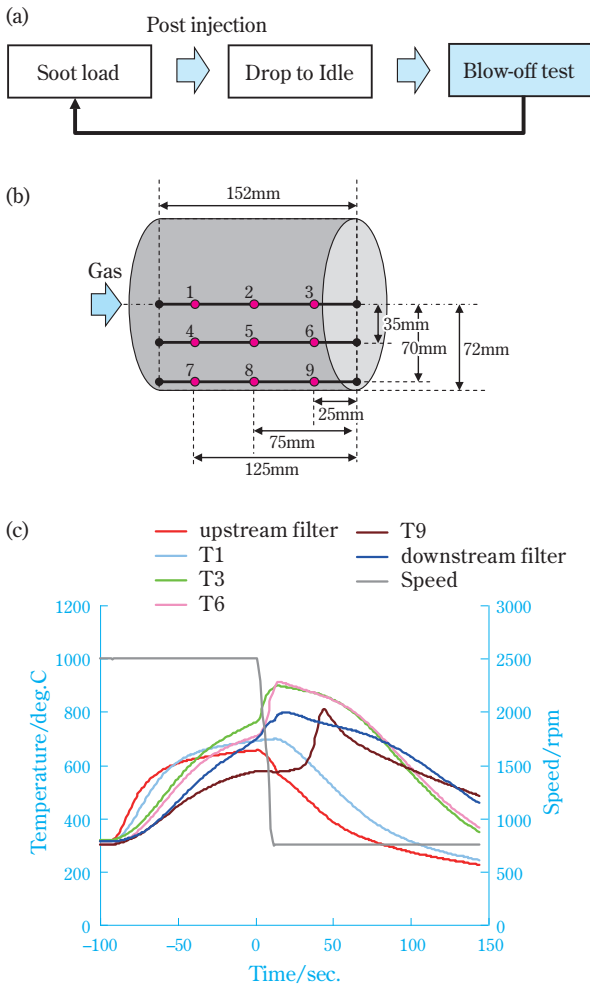


Fig. 8 Image of SML test and an example of temperature behavior. (a) SML test procedure, (b) thermocouple position inside filter under SML test, and (c) an example of changes in engine rotation and temperature at individual position. 0 sec. in time on Fig.8 (c) indicates a start of DTI mode.

Table 4 Condition of SML test (Post injection (PIJ) and Idle)

Engine condition	Speed	Gas flow rate	O ₂ concentration
PIJ	2,500 rpm	230kg/h	8%
Idle	750 rpm	50kg/h	19%

側のガス温度が630℃になるように昇温した。その後、フィルタ前後での圧力損失差圧の低下 (=PM燃焼開始) を検出後、エンジンをIdle状態に落とした。この時のPIJとIdleのエンジン運転条件等をTable 4に示した。

DTIがワーストケース・リジェネレーションと呼ばれるのは、Table 4に示すように、Idleへの移行によりガス量が急激に低下しPM燃焼時の除熱が効かなくなり、更に酸素濃度の上昇も重なって、PM燃焼の暴走反応が起きるためとされている。

SML試験におけるPM堆積量は、8g/L (または10g/L) を初期条件とし、以下に示す検査に合格した場合は、更に2g/L PM堆積量を上げて同様のSML試験を実施した。

(3) Blow-off test

SML試験後は、Blow-off testと呼ばれるPM漏れ試験 (フィルタ上流側からPMを含むガスを流し、フィルタ下流側のガス中に含まれるPM量を検出) を実施し、PM燃焼時の熱衝撃によるフィルタの損傷の有無を判定した。Fig. 9中に示すBlow-off test時のSmoke limitについては、これ以上の数値を示すとフィルタに損傷が発生したと判断できる評価機関の経験的な数値である。

(4) SML試験結果

SML試験を、SiC (OS)、SC-AT (HEX) でそれぞれ実施し、各PM堆積量でのSML試験後のBlow-off testの結果をFig. 9に示した。SC-AT (HEX) はSiC (OS) と比べて、優れた耐熱衝撃特性を示すことが示された。各条件での再生効率 (どれだけ効率良くPMが燃焼除去できたか) を、PM堆積量に対してプロットした。Fig. 10に示すように、SC-AT (HEX) は市場品フィルタと比べても同等以上のPM再生効率であることがわ

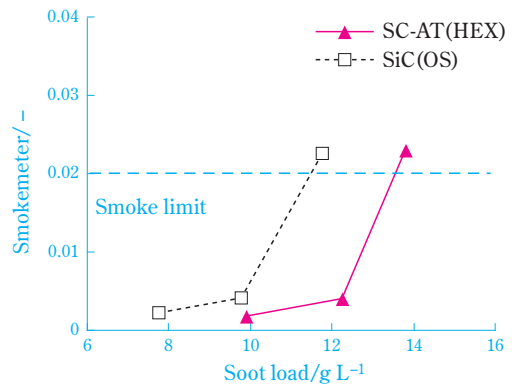


Fig. 9 Blow-off test result after SML test as a function of loaded soot amount of filter.

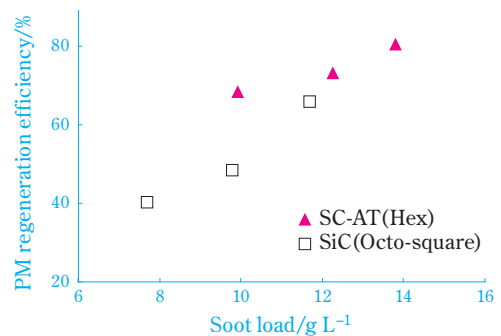


Fig. 10 PM regeneration efficiency as a function of loaded-soot amount on filter.

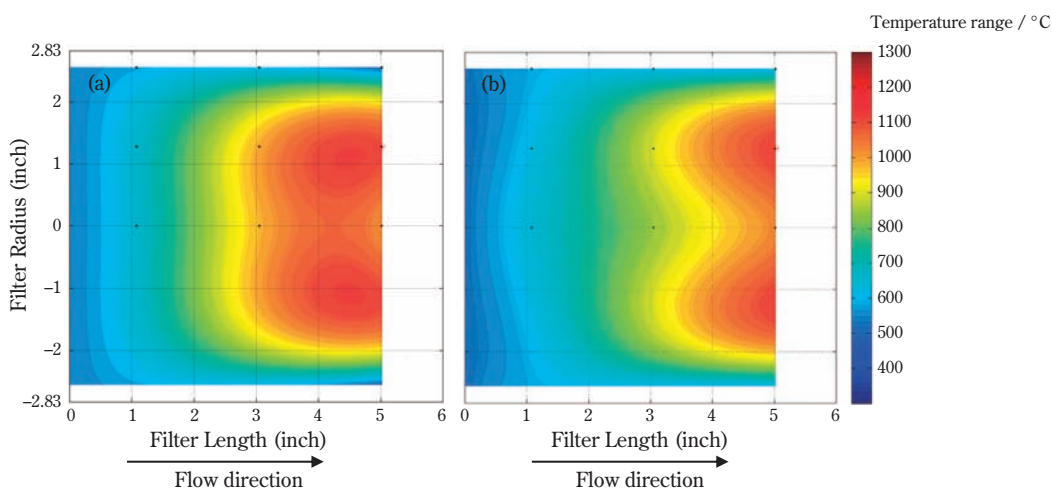


Fig. 11 Temperature distribution inside filter (5.66" diam. and 6" length) at maximum temperature on (a) SC-AT (HEX) and (b) SiC (OS). Loaded PM inside filter is 12g/L. Exhaust gas flows from left side to right side in the figure.

かった。また、フィルタ内部温度のマッピング（熱電対温度データを元に、熱電対間領域の温度を計算にて推定し、フィルタ内部全体の温度分布を予測したもの）をFig. 11に示した（同図でLengthが5inch以上の領域は、発熱に伴う急激な温度変化が考えられ、計算にて予測することが困難であった）。PMは630°C付近から燃焼すると言われており、この温度以上の領域が広いSC-AT (HEX) は、フィルタ内で広くPM燃焼が進行していることが予測された。

また、別途、同一AT材でセル構造の影響を調べたところ、同一PM堆積条件でのSML試験でフィルタ内部の最高温度はSQ構造に比べてHEX構造の方が低く、HEX構造によりPM燃焼時の昇温は抑えられていることも確認された（＝マイルド再生）。

SC-AT (HEX) はPM燃焼がマイルドかつ広範囲で実現できたため、耐熱衝撃性の向上および再生効率の向上が達成できたと考えている。

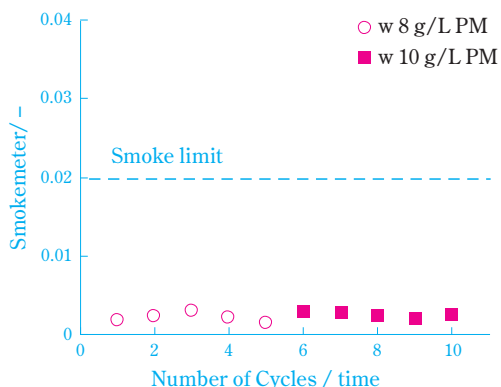


Fig. 12 Blow-off test results for SC-AT (SQ) after Cyclic regeneration with 8 and 10 g/L in soot-loading.

現在、SC-AT (HEX) によるマイルド再生の原因については調査中である。

(5) 繰り返し再生の影響

DTIモードにて、SC-AT (SQ) (本試験は、セル形状はSQで実施) の繰り返し再生試験を行った。PM堆積量は8g/L×5回、10g/L×5回で実施した。Fig. 12のBlow-off testの結果に示されるように、Smokemeterは低いまま一定しており、繰り返し再生によっても、フィルタの損傷は発生していないことが示された。実用上の繰り返し再生においても、問題ないことが予測された。

おわりに

本稿では、フィルタの設計思想、および設計思想に基づいて作製したフィルタの評価を通じた製品設計の妥当性検証を紹介した。

開発フィルタは、市場品フィルタに比べても低圧力損失、高PM捕集、高耐熱衝撃特性を示すことができ、製品設計の妥当性を実証することができた。これも優れた材料設計（低熱膨張性・高耐熱特性を有するチタン酸アルミニウムの開発）と気孔設計（造孔材や作製条件を最適化することで実現）、更にはインテリジェント・セルデザイン（高濾過面積、フィルタ再生時の昇温マイルド化を達成できるHEX構造の採用）を組み合わせることによって、実現できたものと考えている。

製品設計妥当性検証に関しては、今回は初期特性と呼ばれる項目のみの紹介であったが、実際のディーゼル自動車に搭載されるためには、燃料や環境から混入する反応性の高い蓄積性無機成分の影響（アッシュ成分）や、機械振動の影響、更には長期的かつ総合的な耐久特性の実証が要望される。これら特性の評価に関

しては、外部評価機関の協力のもと、試験を進めているところである。

また、法的規制の強化もあり、ガソリン自動車用GPF (Gasoline Particulate Filter)¹⁰⁾ (Euro6での排出PMの数量規制に対応) の開発、NOx規制強化の対策の1つであるSCR (Selective Catalytic Reaction)¹¹⁾とディーゼル・パーティキュレート・フィルタとの一体化など、本稿で紹介したフィルタ技術を応用した新分野への展開・開発も進められている。

我々は開発したフィルタを早期に市場投入するために各種評価を進めるとともに、今回構築したフィルタの設計・評価・解析という一連の技術をブラッシュアップして、新規製品の開発を進めていく。

引用文献

- 1) K. Ohno, K. Shimato, N. Taoka, H. Santae, T. Nomiya, T. Komori and O. Salvat, *SAE Technical Paper*, 2000-01-0185 (2000).
- 2) T. V. Johnson, *SAE Technical Paper*, 2008-01-0069 (2008).
- 3) 大野 一茂、2006年早稲田大学博士論文。
- 4) R. S. Ingram-Ogunwumi, Q. Dong, T. A. Murrin, R. Y. Bhargava, J. L. Warkins and A. K. Heibel, *SAE Technical Paper*, 2007-01-0656 (2007).
- 5) 福田 勉, 福田 匡洋, 福田 匡晃, 特開2004-026508 (2004).
- 6) A. G. Konstandopoulos, *SAE Technical Paper*, 2003-01-0846 (2003).
- 7) K. Ogyu, K. Ohno, S. Hong and T. Komori, *SAE Technical Paper*, 2004-01-0949 (2004).
- 8) D. M. Young, D. L. Hickman, G. Bhatia and N. Gunasekaran, *SAE Technical Paper*, 2004-01-0948 (2004).
- 9) ROBERT BOSCH GMBH, 特表2009-537741 (2009).
- 10) C. Saito, T. Nakatani, Y. Miyairi, K. Yuuki, M. Makino, H. Kurachi, W. Heuss, T. Kuki, Y. Furuta, P. Kattouah and C-D. Vogt, *SAE Technical Paper*, 2011-01-0814 (2011).
- 11) M. Naseri, S. Chatterjee, M. Castagnola, H.Y. Chen, J. Fedeyko, H. Hess and J. Li, *SAE Technical Paper*, 2011-01-1312 (2011).

PROFILE



根本 明欣
Akiyoshi NEMOTO

住友化学株式会社
基礎化学品研究所
主席研究員



魚江 康輔
Kousuke UOE

住友化学株式会社
基礎化学品研究所
主席研究員
博士（工学）



岩崎 健太郎
Kentaro IWASAKI

住友化学株式会社
基礎化学品研究所
主任研究員
博士（地球環境科学）



當間 哲朗
Tetsuro TOMA

住友化学株式会社
基礎化学品研究所
主任研究員
博士（工学）



山西 修
Osamu YAMANISHI

住友化学株式会社
基礎化学品研究所
上席研究員



吉野 朝
Hajime YOSHINO

住友化学株式会社
基礎化学品研究所
研究員



土本 和也
Kazuya TSUCHIMOTO

住友化学株式会社
基礎化学品研究所
主席研究員