

ディーゼル排出ガス浄化用セラキャット®フィルタの開発

Development of CERACAT® Filter for Diesel Particulate Reduction Systems

関口謙一郎* *Kenichiro Sekiguchi*
 大坪靖彦** *Yasuhiko Ohtsubo*
 岡崎俊二** *Syunji Okazaki*
 諏訪部博久*** *Hirohisa Suwabe*
 徳留修*** *Osamu Tokudome*
 山根英也*** *Hideya Yamane*
 石澤俊崇*** *Toshitaka Ishizawa*

超低PM大型商用車用セラミックフィルタとして、高気孔率大型一体成形構造のコーディエライト質フィルタ“セラキャット®フィルタ”を開発した。セラキャット®フィルタはフィルタ材細孔構造の最適化を図ることにより、高い煤捕集率と低い圧力損失の両立を実現し、2005年排出ガス規制のPM値（車両総重量3.5t超：PM排出量0.027g/kWh）を達成する超低PM排出ディーゼル適合大型商用車の開発に大きく貢献している。

Hitachi Metals has developed a large monolithic high porous cordierite filter. The microstructure of the porous wall of the newly developed CERACAT® filter has been optimized to obtain good performance, and the filter provides low pressure drop and high soot filtration efficiency. These have a trade-off relationship for heavy duty diesel. The CERACAT® filter makes a great contribution to the development of ultra-low PM heavy duty diesel to meet the 2005 PM standard level (GVW>3.5t : 0.027g/kWh) in Japan.

① 緒言

世界的にディーゼル車に対するPM（Particulate Matter：粒子状物質）およびNO_x（窒素酸化物）の低減を目的とした排出ガス規制が強化されている^{1),2)}。図1に日本、米国および欧州におけるディーゼル重量車のPM排出規制を示す。図1に破線で示すように、国内においても自工会の自主規制ではあるが、新短期排出ガス規制に対しPM排出量を85%低減（ ），あるいは75%低減（ ）した超低PM排出ガス車をすでに開発し、販売している。特に レベルは、2005年10月より実施される新長期排出ガス規制のPM値（0.027g/kWh）レベルであり、評価モードが異なるもの

の、現時点では世界で最も厳しいものである。

ディーゼル車の特長の1つは、ガソリン車に比べて低燃費であることであり、省エネルギーおよびCO₂排出低減に対する有効な手段である。したがって、ディーゼル排出ガス浄化用フィルタとしては、高い煤捕集率（煤はディーゼル排出ガス中のPMの主成分）と燃費性能を悪化させない低い圧力損失を両立するものが望まれている。

セラキャット®フィルタ（図2）は、商用車用超低PM後処理システムDPR（Diesel Particulate active Reduction system）^{3),4)}用として開発したウォールフロータイプのハニカムフィルタ（図3）であり、特に大型商用車への適用を念頭に材料開発および性能評価を行っ

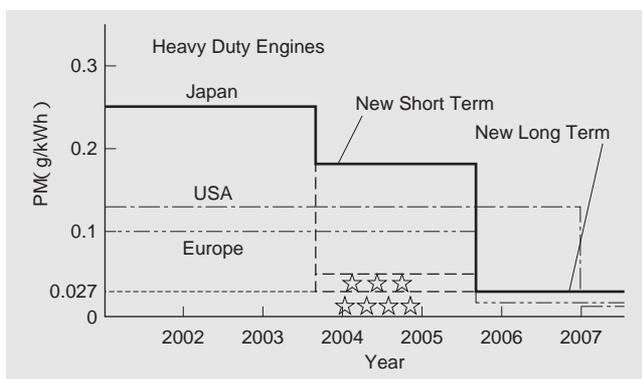


図1 ディーゼル重量車のPM排出規制
 Fig. 1 PM emission regulations for heavy duty diesel.



図2 セラキャット®フィルタ外観
 Fig. 2 Appearance of CERACAT® filter.

* 日立金属株式会社 素材研究所 博士（工学）

** 日立金属株式会社 九州工場

*** 日立金属株式会社 素材研究所

* Casting Technology Research Laboratory, Hitachi Metals, Ltd.

** Kyusyu Works, Hitachi Metals, Ltd.

*** Casting Technology Research Laboratory, Hitachi Metals, Ltd.

てきた。材料開発においては、大型一体成形構造（直径266.7mm，長さ304.8mm）を前提に，コーディエライト（ $5\text{SiO}_2 \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{MgO}$ ）を主成分とするフィルタ材細孔構造の最適化を図っている。これにより，大型商用車用の排出ガス浄化用フィルタとして，高い煤捕集率と低い圧力損失の両立を実現し，PM排出量 0.027g/kWh を達成する超低PM排出ディーゼル適合（ ）大型商用車の開発に大きく貢献している^{5), 6)}。

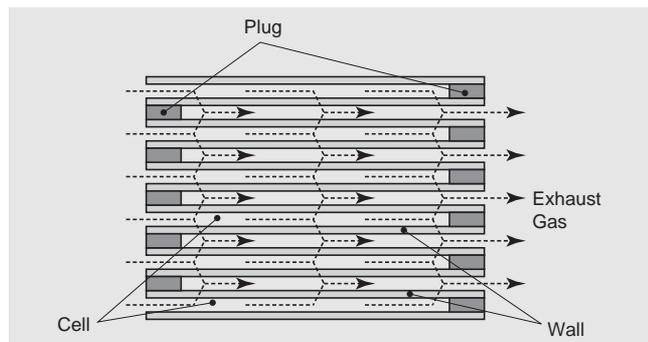


図3 ウォールフロータイプハニカムフィルタ
Fig. 3 Honeycomb wall-flow filter.

図4に，超低PM後処理システムが実現すべき性能と，それを実現するために必要な排出ガス浄化用フィルタの性能（フィルタへの要求性能）を示す。浄化性能に対応して煤捕集性能，触媒担持性能およびフィルタ再生性能が，燃費性能に対応して低圧力損失（低初期圧力損失，低煤捕集圧力損失，低Ash堆積圧力損失）およびフィルタ再生性能が，そして耐久性能に対応して耐熱性，化学的安定性，熱的・機械的強度（耐熱衝撃強度，静強度，機械的疲労強度，熱疲労強度）が要求される。図4に示すすべての要求性能を実現できることが理想ではある

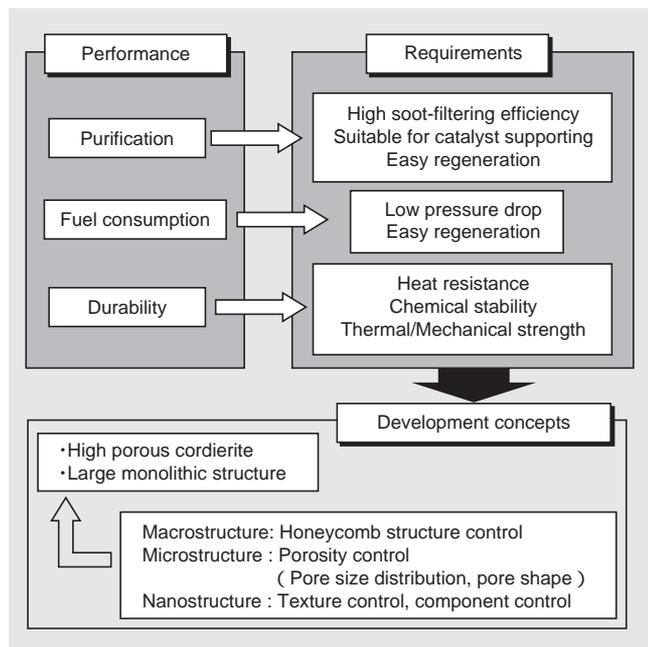


図4 要求性能と開発コンセプト
Fig. 4 Required performance and development concepts.

が，各種制約条件のもと，同図に示すように，本開発においては高気孔率コーディエライト質の大型一体成形構造を基本に，フィルタのマクロ構造（ハニカム構造）の調整，ミクロ構造の調整（細孔制御），さらには組織や成分といったナノ構造の調整を行うことにより，より多くの要求性能実現に取り組んでいる。本報告では，ミクロ構造の調整とフィルタ性能との関係を中心に報告する。

ディーゼル排出ガス浄化用フィルタとして，乗用車用を中心にSiC（炭化ケイ素）製フィルタの開発および搭載も精力的に進められている^{7)~11)}。しかしながら，大型商用車用の排出ガス浄化用フィルタにおいては，低コストでなおかつ大型一体成形構造化が可能であるコーディエライト製フィルタの市場ニーズがきわめて高い。特に燃費性能に直結する圧損性能の観点から，大型一体成形構造は有利である。なお，コーディエライトはSiCに比べて耐熱温度が低い，が，コモンレール式燃料噴射システムのマルチ噴射機能を有効に用いることにより，煤の異常燃焼を回避可能であり，採用の障害とはならないと考えている。

② 材料開発

表1に，本開発において検討したフィルタ材のハニカム構造と材料特性を示す。レトロフィット用（既販車後付け用）に開発したフィルタ材Aに対し，大型一体成形構造を前提としながらも，高気孔率化したフィルタ材B～Eの検討を行った。図5に，ハニカム構造と材料特性に対する調整の考え方を示す。

2.1 ハニカム構造

フィルタ材B～Eのハニカムを構成するセル構造は，フィルタ材Aの17mil/100cpsおよび12mil/200cpsに比べ，フィルタ表面積を若干増やすことを目的に，12mil/260cpsに設定している。セル壁厚は，高気孔率化によるフィルタ効果低下の懸念と，壁内触媒担持面積確保の観点から，フィルタ材Aのセル壁厚に対して変更していない。セル密度は，壁内触媒担持面積確保と初期圧力損失（煤堆積前の圧力損失）を決める重要な因子である。また，これらはトレードオフの関係にあり，最適解である260cpsを採用している。

2.2 材料特性

超低PM後処理システム用のフィルタとして，煤捕集率95mass%以上かつフィルタ材Aに対して50%以上の圧力損失（初期圧力損失および煤捕集圧力損失）低減の実現を開発目標とした。フィルタ材B～Eの検討にあつ

表1 ハニカム構造と材料特性

Table 1 Honeycomb structures and material properties.

| Filter Material | Porosity (%) | Mean Pore Size (μm) | Pore Volume (× 10 ⁻³ m ³ /kg) | | Honeycomb Structure (mil ² /cps ²) |
|-----------------|--------------|---------------------|---|-------|---|
| | | | Total | >40μm | |
| A | 53 | 8 | 0.44 | 0.01 | 17/100 |
| B | 62 | 16 | 0.65 | 0.08 | 12/200 |
| C | 62 | 19 | 0.65 | 0.08 | 12/260 |
| D | 63 | 21.5 | 0.68 | 0.15 | |
| E | 65 | 23 | 0.74 | 0.15 | |

*1 mil = 1/1000inch = 0.0254mm, *2 cps = cell/square inch

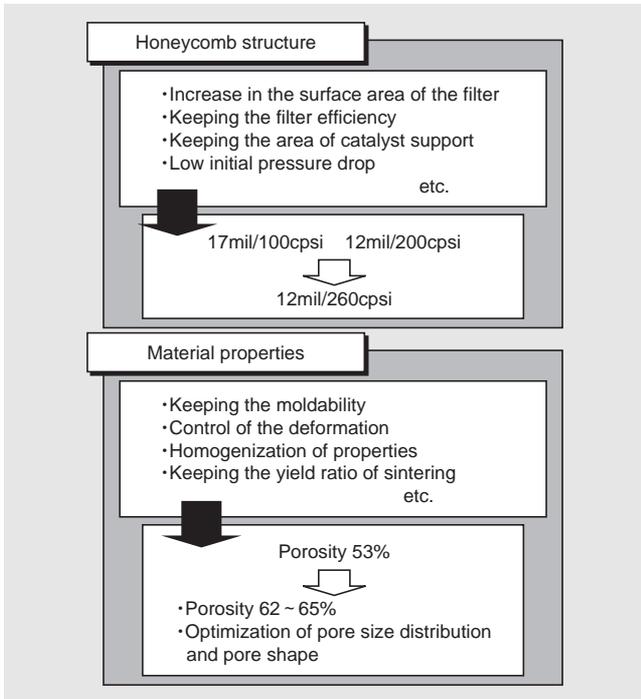


図5 ハニカム構造と材料特性に対する考え方
Fig. 5 Concepts of honeycomb structure and material properties.

ては、高気孔率化のみでなく、細孔構造の最適化により、トレードオフ関係にある高捕集率と低圧力損失の両立を目指している。

本開発では、大型一体成形構造を前提に材料開発をスタートしているため、フィルタ材の成形性、製造過程での変形、特性均一化、焼成歩留りなどを考慮し、表1に示すように、気孔率は62~65%としている。フィルタ材B~Eの相違は、細孔径分布を変化させることにより得ている。図6に各フィルタ材の細孔径分布を示す。なお、図6の細孔径分布は水銀圧入法による差分圧入容積

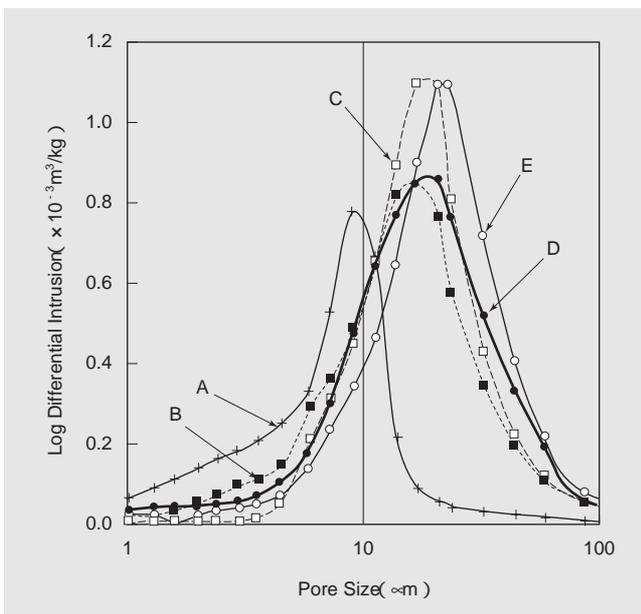


図6 細孔径分布
Fig. 6 Pore size distributions.

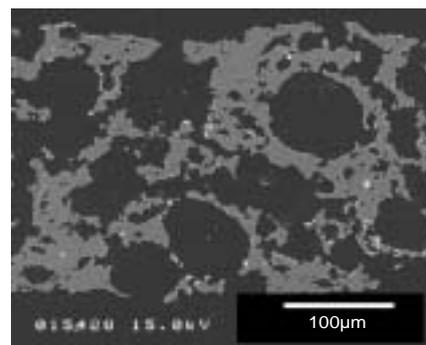
図で示している。

フィルタ材Bは、フィルタ材Aの気孔率の20%増しを目標としたものである。フィルタ材Cは、フィルタ材Bに対して気孔率を変えずに平均細孔径を大きくしたものであり、触媒担持による微細孔の埋まりを考慮して、微細孔を減らして平均細孔径を大きくしている。フィルタ材Dもフィルタ材Cと同様に、フィルタ材Bに対して気孔率を変えずに平均細孔径を大きくしているが、40μmよりも大きな細孔を増やすことにより、平均細孔径を大きくしている。フィルタ材Eは、フィルタ材CとDに対する試みを同時に実施したものである。

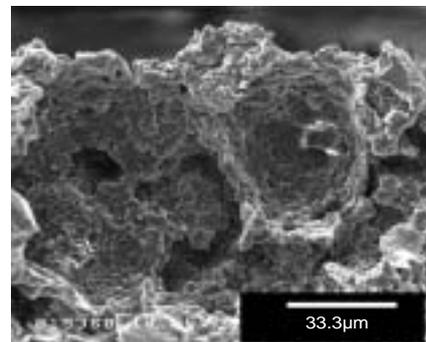
2.3 細孔形状

細孔制御の一環として、細孔形状についても検討している。細孔形状の一例として、図7にフィルタ材Dのセル壁断面および同表面近傍の細孔形状のSEM (Scanning Electron Microscope: 走査型電子顕微鏡) による観察の一例を示す。図7より細孔構造が球形であることがわかる。本開発フィルタでは高気孔率化を指向しているため、強度特性は低下する方向に向かう。そこで、キャニング時に必要となる静的強度および使用過程での熱的・機械的疲労強度を少しでも改善させるために、細孔形状を球形としている。

また、図7からわかるように、セル壁表面で細孔がほぼまった形(以降「インクボトル形状」と呼ぶ)とすることにより、セル壁に煤のケーキ層が生成しやすく、早期に煤のケーキ層による微小粒子捕捉効果が発現されることを期待している。すなわち、細孔形状の調整により、高気孔率化による煤捕集率低下を少しでも抑えることができることを期待している。



Typical porous wall structure



Typical pore shapes around porous wall surface

図7 SEM観察による細孔形状の一例(フィルタ材D)
Fig. 7 SEM micrograph of typical pore shapes with porous wall structure(Filter material D).

③ フィルタ材の評価

3.1 評価方法

3.1.1 性能評価

図8に圧力損失評価システムの概要を示す。同システムはプロアによる吸引式であり、テストスタンドと制御コンピュータから構成されている。制御コンピュータには空気流量の自動制御、空気流量安定の自動判断機能および圧力損失測定値のリアルタイム補正機能を持たせている。

圧力損失値は、実製品サイズ（大型商用車用：直径266.7mm、長さ304.8mm）のフィルタを測定用ケースにキャニングし、測定した圧力損失値から測定用ケースのみの圧力損失値を差し引くことにより算出している。なお煤捕集圧力損失値は、一定空気流量（10Nm³/min）の制御下において煤供給器により平均粒子径42nmのC粒子を一定速度で供給し、圧力損失の経時変化を測定することにより得ている。煤堆積量はフィルタ単位容積（L）あたりにおける質量（g）で表現している。

煤捕集率は、フィルタが捕集した煤の質量とアブソリュートフィルタの増加質量から求められる。

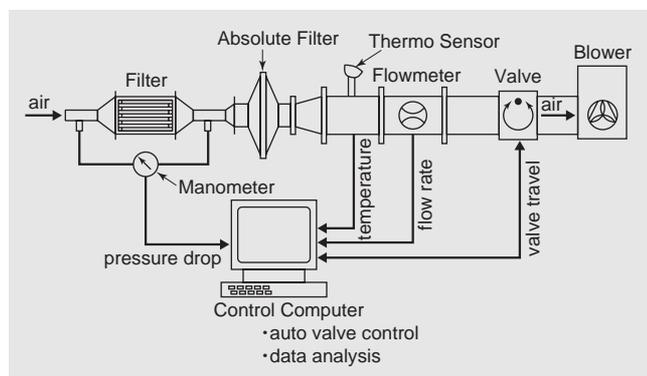


図8 圧力損失評価システム概要

Fig. 8 Schematic diagram of pressure drop evaluation system.

3.1.2 強度評価

静的強度の評価として、JASO M505-87に準じ、圧縮破壊強度およびアイソスタティック（静水圧）破壊強度の評価を実施している。本報告では実体サイズで評価を行うアイソスタティック強度について報告する。

熱的強度の評価として、排気シミュレータ（図9）を用いた各種評価を実施している。排気シミュレータは、排気系部品における評価試験の簡便・迅速化および低コスト化を実現するために、日立金属が独自に開発した排気系部品評価システムであり^{12)~14)}、LPGを燃料としている。LPGは燃焼室内にてコンプレッサより供給された空気と混合される。排出ガスの制御温度は、燃焼室に供給されるLPG量の調整により行われ、排出ガスの流量制御は燃焼室への供給空気量の調整により行われる。制御可能な排出ガス温度は約530~1,500Kであり、PID制御により急速な昇温からきわめて緩やかな昇温まで実現可能である。

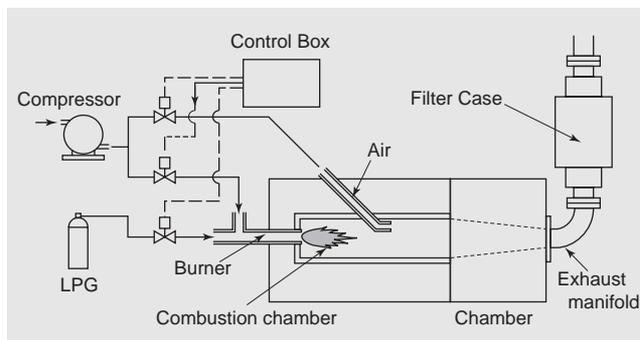


図9 排気シミュレータ概要

Fig. 9 Schematic diagram of exhaust system simulator.

本報告では、フィルタのヒートサイクル耐久性能の確認に排気シミュレータを用いた例について報告する。ヒートサイクル試験は、フィルタケース入口ガス温度を制御することにより加熱・冷却を繰り返し実施するものである。図10に排気シミュレータによるヒートサイクル試験の状況を示す。なお、本フィルタ開発において、熱衝撃評価試験や溶損限界評価試験などにも排気シミュレータを用いている。

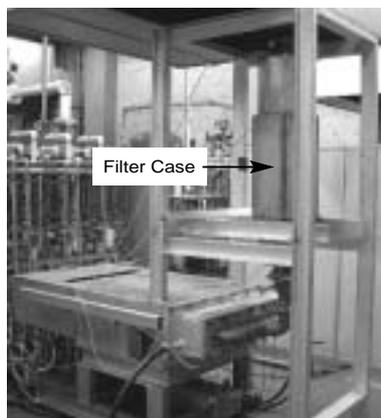


図10 ヒートサイクル試験状況

Fig. 10 Photograph of heat cycle test with Exhaust System Simulator.

3.2 圧力損失

3.2.1 初期圧力損失

図11に初期圧力損失評価結果を示す。初期圧力損失にはセル壁厚とセル密度の調整が最も効果的であるが、細孔径分布の調整も効果を発揮し、フィルタ材A（17mil/100cps）の初期圧力損失に比べ、フィルタ材DおよびEの初期圧力損失は約50%と大幅に低減できていることがわかる。なお、フィルタ材Bを基準とした細孔径分布の調整による初期圧力損失改善幅は、最大で約30%となっている。

3.2.2 煤捕集圧力損失

図12に煤捕集圧力損失評価結果を示す。図12はフィルタ材Dの初期圧力損失値を基準として煤捕集圧力損失を相対値で表したものである。フィルタ材Aに比べ、フィルタ材B~Eは煤捕集による圧力損失変動が小さく、

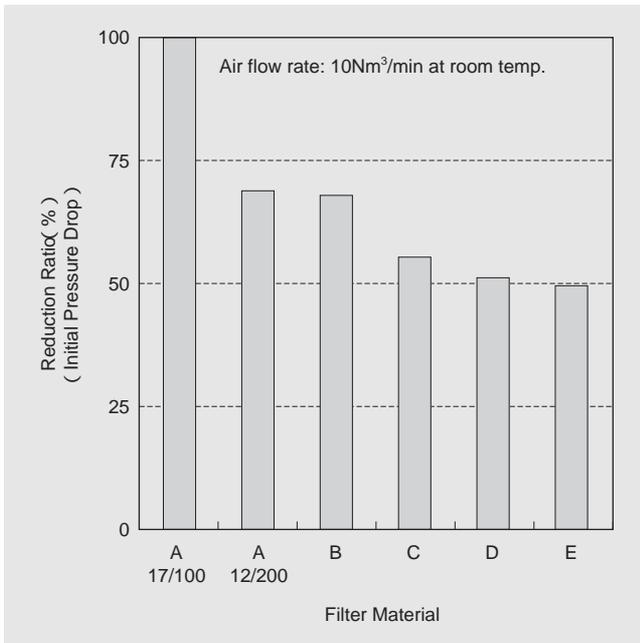


図11 初期圧力損失の比率
Fig. 11 Reduction ratio of initial pressure drops.

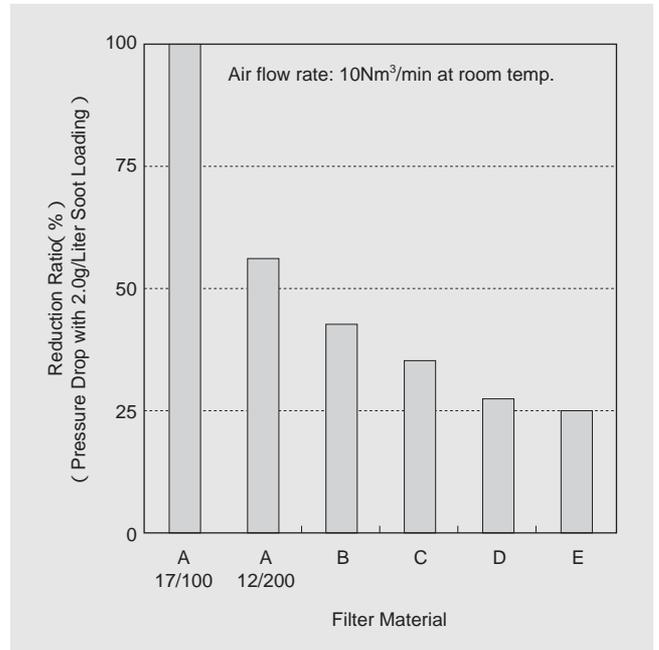


図13 2.0g/L煤捕集後における圧力損失の比率
Fig. 13 Reduction ratio of pressure drop with 2.0g/L soot loading.

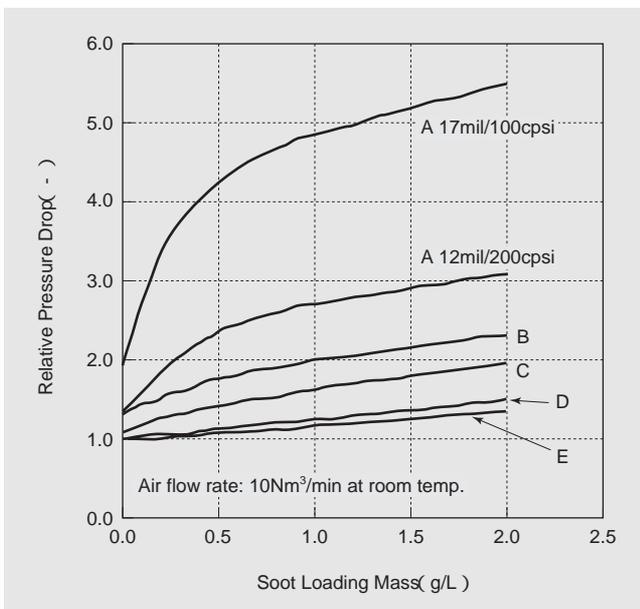


図12 煤捕集圧力損失
Fig. 12 Pressure drop due to soot loading.

特にフィルタ材DおよびEは同変動がきわめて小さくなっていることがわかる。

図13に2.0g/L煤捕集後における圧力損失評価結果を示す。フィルタ材A (17mil/100cps) の圧力損失に比べ、フィルタ材DおよびEの同圧力損失は、約25%と飛躍的に低減できていることがわかる。なお、フィルタ材Bを基準とした細孔径分布の調整による2.0g/L煤捕集後の圧力損失改善幅は、最大で約40%となっている。

3.3 煤捕集率

浄化性能の一指標である煤捕集率について報告する。

図14は一例としてフィルタ材Dの煤捕集量と煤捕集率の関係を示したものである。高気孔率化しているにもかかわらず、非常に優れた煤捕集性能を有していることがわかる。

表2にフィルタ材AからEの煤捕集率測定結果を示す。すべてにおいて95mass%を十分上回っており、超低PM後処理システム用のフィルタ開発目標を満足している。量産フィルタ材の選定にあたっては、量産時の特性バラツキ幅などを考慮に入れ、圧力損失性能が最も優れたフィルタ材Eとほぼ同性能であるフィルタ材Dを採用している。

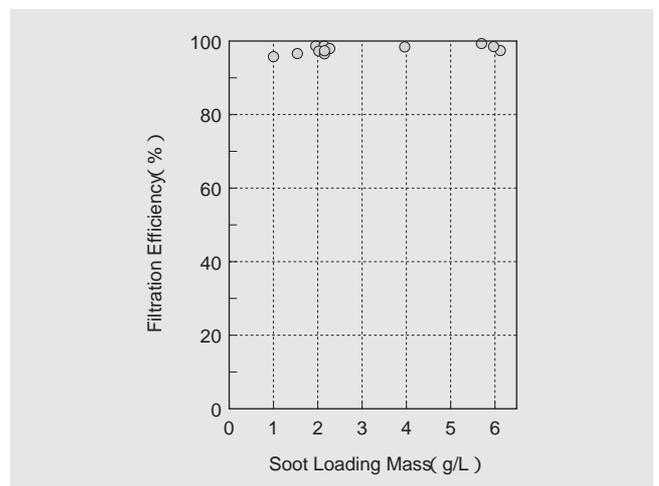


図14 煤捕集量と煤捕集率の関係 (フィルタ材D)
Fig. 14 Relationship between filtration efficiency and soot loading mass (Filter material D).

表2 煤捕集率

Table 2 Filtration efficiencies.

| Filter Material | Filtration Efficiency |
|-----------------|-----------------------|
| A | More than 99mass% |
| B | 99mass% |
| C | 99mass% |
| D | 98mass% |
| E | 97mass% |

3.4 強度

3.4.1 アイソスタティック強度

図15に、フィルタ材D（大型商用車用実製品サイズ：直径266.7mm，長さ304.8mm）のアイソスタティック強度をワイブル分布で示す。1.0MPaにて破壊する確率は約0.006%と見積もることができる。なお、触媒を担持することにより、アイソスタティック強度はさらに向上することが確認されており、フィルタ装着（キャニング）に必要な強度を有している。

3.4.2 ヒートサイクル強度

排気シミュレータによるヒートサイクル試験条件の一例を図16に示す。実機での条件を想定した種々のヒートサイクル試験条件下において評価試験を実施しており、必要なヒートサイクル強度を有していることを確認している。なお、現状において、本ヒートサイクル試験では振動を加味した耐久性を確認することができないため、最終的には実機での耐久試験で耐久性を確認している。

④ ミクロ構造と煤捕集メカニズム

フィルタ材Dの開発により、超低PM後処理システム用のフィルタ開発目標、すなわち高い煤捕集率と低い圧力損失の両立を実現している。一般に、両者にはトレードオフの関係があるため、低い圧力損失を維持しつつ高い煤捕集率を実現できている理由について考察してみる。

4.1 観察方法

2.3に述べたように、本フィルタ材の開発にあたり、セル壁表面の細孔をインクボトル形状とすることによって、煤捕集開始後の早期段階において、セル壁表面に煤のケーキ層を生成させることを狙っている。そこで、ミクロ構造と煤捕集メカニズムの関係を考察するため、次のような観察を実施している。

フィルタ材Dの試験片（直径143.8mm，長さ152.4mmのフィルタ）を測定用ケースにキャニングし、図8に示した圧力損失評価システムに取り付ける。その後、一定空気量（7.5Nm³/min）の制御下において煤供給器により平均粒子径42nmのC粒子（煤）を0.1g/L，0.25g/L，0.5g/Lおよび2.0g/Lの堆積量狙いで供給することにより、煤が堆積した4種類のフィルタを用意する。その後、フィルタ出口側の半径方向中心部からSEM観察用の試料を切り出し、排出ガス流入側セル壁表面に対して45度傾いた方向からSEM観察を行う。また、煤堆積量0.5g/Lおよび2.0g/Lの試料については、セル壁を破断した後、破断面における煤堆積状況をSEM観察により確認する。

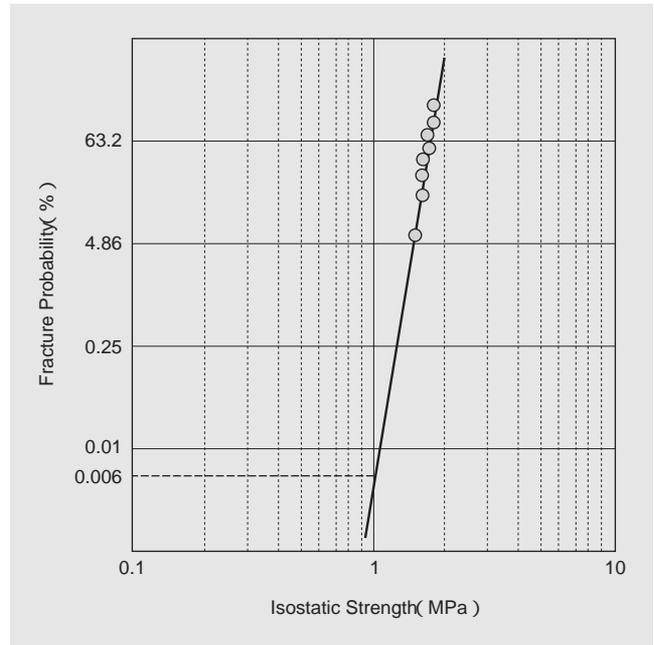


図15 アイソスタティック強度

Fig. 15 Isostatic strength (Filter material D).

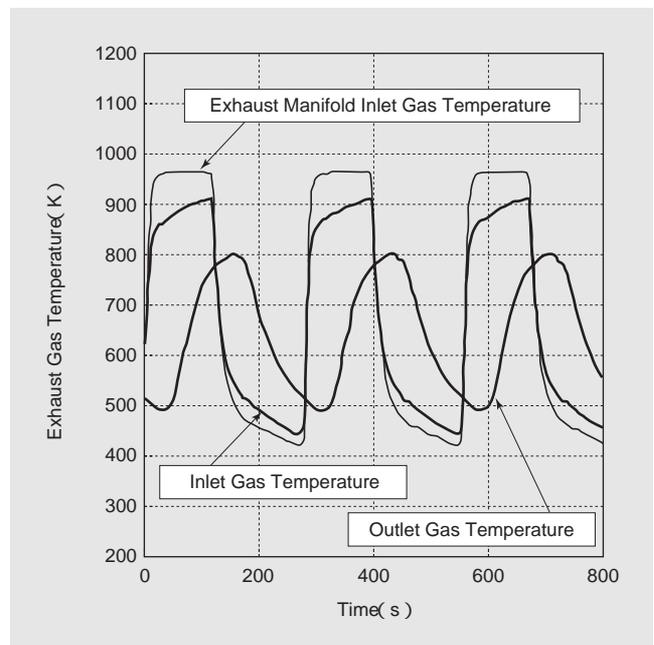


図16 排気シミュレータによるヒートサイクル試験条件の一例

Fig. 16 Example of heat cycle condition with Exhaust System Simulator.

4.2 観察結果および考察

図17に排出ガス流入側セル壁表面の煤堆積状況を示す。なお、煤を含んだ空気は、図17に示すように紙面下方から上方に流れている。図17より、セル壁表面に開口している細孔開口部下流側の縁から煤が堆積し始めていることがわかる。煤堆積量0.1g/Lおよび0.25g/Lの観察においては、セル壁表面に細孔開口部を確認できるが、煤堆積量0.5g/Lにおいては、煤が細孔開口部を塞ぎつつあることがわかる。

図18に煤堆積量0.5g/Lにおけるセル壁断面のSEM写真

を示す。煤堆積量0.5g/Lでは、煤は細孔内にほとんど堆積せず、煤ケーキ層を形成し始めていることが確認できる。図19左に煤堆積量2.0g/Lにおけるセル壁断面のSEM写真を示す。煤堆積量2.0g/Lにおいては、図17のセル壁表面の観察から、セル壁表面全体に煤が堆積し、フィルタ材表面を確認することができない。しかしながら、図19左からわかるように、依然として細孔内に殆んど煤は堆積しておらず、煤ケーキ層が形成されていることが確認できる。図19右に、セル壁表面における排出ガス流入口付近の煤ケーキ層内のSEM写真を示す。同図からわかるように、煤ケーキ層は高気孔率の微小粒子集合体からなっている。

以上の観察結果から、きわめて少ない煤堆積量の段階から煤ケーキ層の生成がなされ、煤が細孔内にはほとんど堆積していないことを確認した。このメカニズムの詳細については未解明の部分もあるが、低圧損を実現する高気孔率のフィルタであるにもかかわらず、高い捕集率を維持できている現象を理解することができる。すなわち、セル壁表面で細孔がインクボトル形状、すなわち、つぼまったミクロ構造に調整されているため、煤ケーキ層が生成しやすく、かつ煤ケーキ層が高気孔率の微小粒

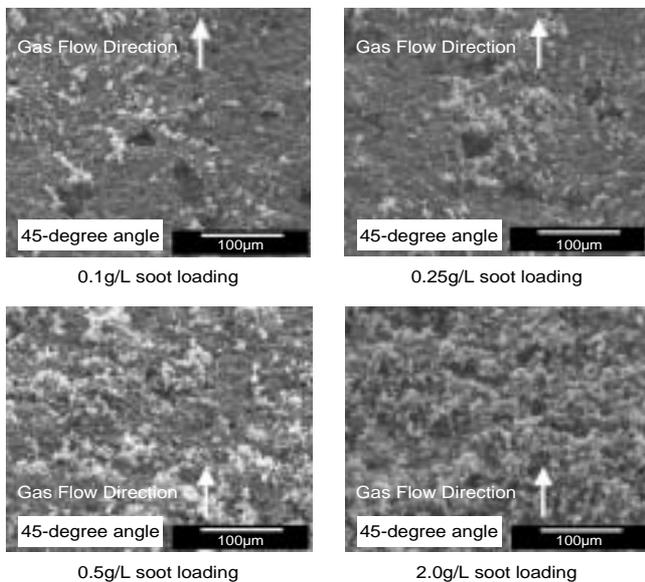


図17 煤堆積状況のSEM写真(セル壁表面)

Fig. 17 SEM micrographs of filtering appearance on porous wall surfaces.

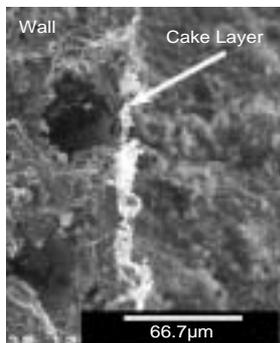


図18 煤堆積量0.5g/Lでの煤堆積状況のSEM写真(セル壁断面)
Fig. 18 SEM micrograph of cross-sectional filtering appearance with 0.5g/L soot loading.

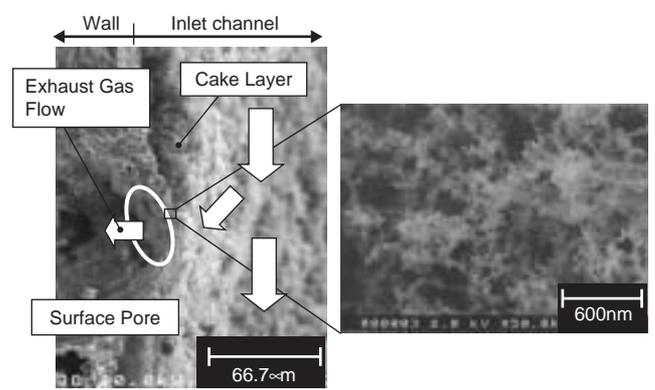


図19 煤堆積量2.0g/Lでの煤堆積状況のSEM写真(セル壁断面)
Fig. 19 SEM micrograph of cross-sectional filtering appearance with 2.0g/L soot loading.

子集合体であるため、圧力損失を大きく悪化させることもなく、微小粒子による微小粒子捕捉効果を発揮して、微小粒子サイズの煤も捕集できているものと考えられる。したがって、細孔のミクロ構造と煤ケーキ層との相互作用により、煤捕集性能と圧力損失性能の両立が実現されていると推定される。

5 エンジン試験による評価

日野自動車株式会社において、DPRを搭載し、新短期排出ガス規制に適合した新開発(2003年秋に発売開始)直列6気筒12.9リッターのインタークーラ付ターボディーゼルエンジンE13Cを用いて、セラキャット®フィルタ(フィルタ材D)の評価を行っている。

フィルタには触媒が担持され、排出ガス試験は低硫黄軽油(50ppm)を用い、D13モード(新短期排出ガス規制におけるディーゼル重量車の排出ガス測定運転モード)にて実施されている。図20に結果を示す。セラキャット®フィルタを組み込んだDPRを装着することにより、新長期排出ガス規制のPM値(0.027g/kWh)レベルを達成している。

図21に、D13モードおよび東京都実走行パターンNo.5(東京都の作成した都内実走行パターン11種のうちの1つ)におけるDPR装着による煤低減率の測定結果を示す。

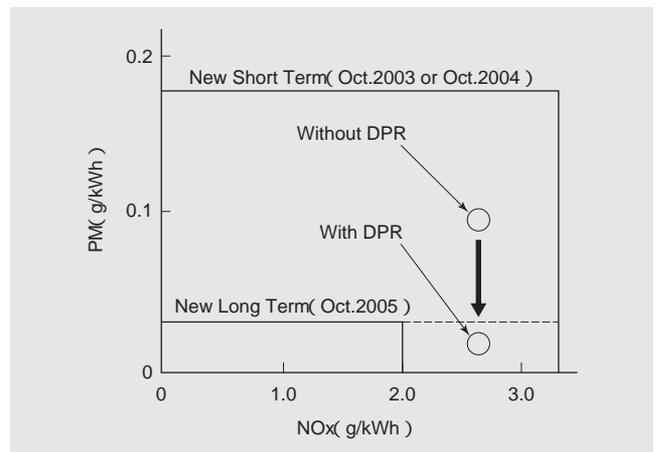


図20 D13モードにおけるDPRの効果⁴⁾

Fig. 20 Effectiveness of DPR under Japan D13 mode test condition⁴⁾.

両モードとも、95%以上の高い低減率を得ることができている。

また、排出ガス中の粒子径および粒子数の計測により、きわめて高い微小粒子低減効果のあることが検証されており、微小粒子の大幅低減にも効果のあることが確認されている^{4), 15), 16)}。

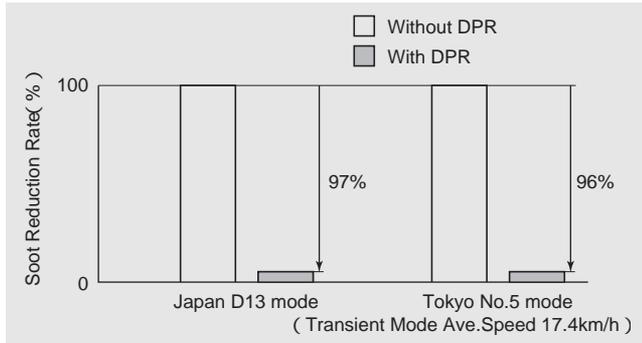


図21 煤低減率⁴⁾
Fig. 21 Soot reduction rate⁴⁾.

6 結 言

超低PM大型商用車用セラミックフィルタとして、高気孔率大型一体成形構造のコーディエライト質フィルタ“セラキャット®フィルタ”を開発し、2003年10月より実用化した。以上をまとめると次の通りである。

- (1) 大型一体成形構造を前提としたコーディエライトを主成分とするフィルタ材の細孔径分布を制御することにより、高い煤捕集率と低い圧力損失の両立を実現した。
- (2) 細孔径分布の制御と性能の関係を検討し、DPRの仕様を満足するフィルタ材として、気孔率63%、平均細孔径21.5μmの高気孔率フィルタ材を開発した。
- (3) セル壁での煤捕集形態をSEM観察した結果、本フィルタ材は、セル壁表面で細孔がつぼまったミクロ構造を有していることから、煤堆積の初期段階から煤（微小粒子）で構成される煤ケーキ層の生成がなされ、煤が細孔内にほとんど堆積されないことを確認した。
- (4) エンジン試験により、本開発フィルタを組み込んだDPRを装着することにより、PM排出量0.027g/kWh（ \quad ，新長期排出ガス規制値レベル）を達成している。

最後に研究・開発にご協力戴いた日野自動車株式会社、東京濾器株式会社の方々に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) T.V.Johnson : SAE 2003-01-0039 .
- 2) T.V.Johnson : SAE 2004-01-0070 .
- 3) 南川, 他 : 2003年自動車技術会秋季学術講演会前刷集, 20035600 .
- 4) H.Toorisaka, et al. : SAE 2004-01-0824 .
- 5) 関口, 他 : 2004年自動車技術会春季学術講演会前刷集, 20045214 .
- 6) 日立金属株式会社自動車機器カンパニー : 日立金属

技報, 20 (2004), 24 .

- 7) K. Ogyu, et al. : SAE 2003-01-0377 .
- 8) S. Ichikawa, et al. : SAE 2003-01-0380 .
- 9) K. Yuuki, et al. : SAE 2003-01-0383 .
- 10) Y. Uchida, et al. : SAE 2003-01-0384 .
- 11) 松江, 他 : 2004年自動車技術会春季学術講演会前刷集, 20045107 .
- 12) 矢野, 他 : 日立金属技報, 3 (1987), 72 .
- 13) 大塚, 他 : 日立金属技報, 6 (1990), 53 .
- 14) 三宅, 他 : 日立金属技報, 20 (2004), 69 .
- 15) 細谷, 他 : 2003年自動車技術会秋季学術講演会前刷集, 20035692 .
- 16) M. Hosoya, et al. : SAE 2004-01-1423 .



関口謙一郎
Kenichiro Sekiguchi
日立金属株式会社 素材研究所 博士(工学)



大坪靖彦
Yasuhiko Ohtsubo
日立金属株式会社 九州工場



岡崎俊二
Syunji Okazaki
日立金属株式会社 九州工場



諏訪部博久
Hirohisa Suwabe
日立金属株式会社 素材研究所



徳留 修
Osamu Tokudome
日立金属株式会社 素材研究所



山根英也
Hideya Yamane
日立金属株式会社 素材研究所



石澤俊崇
Toshitaka Ishizawa
日立金属株式会社 素材研究所