

Diesel Particulate Filter (DPF)の商品化

Commercialization of Diesel Particulate Filter (DPF)

西山利彦
Toshihiko Nishiyama
江森信彦
Nobuhiko Emori

ディーゼルエンジンはその優れた経済性と信頼性、耐久性のゆえ、現在はもちろん、将来までも産業用エンジンの主流を占めると思われるが、一方ではその排気ガスに多く含まれるNOxと黒煙のため、環境汚染の悪役として扱われている。それに伴い、規制も急激に厳しさを増しており、これまでは燃焼改善を中心に対応してきた。しかし、それも限界に近づきつつあり、2010年頃予想される規制をクリアするには排気後処理装置が必須であると考えられている。当社はこれまでのトンネル仕様の黒煙除去装置の経験を活かし、いち早く将来規制対応のPM低減装置を開発したので報告する。

Diesel engines are expected to be main power sources for industrial machines in the future as well as the present day because of their superior economical efficiency, reliability and durability. At the same time, they are regarded to be one of the serious contributors of air pollution. For that reason, the regulations are rapidly becoming more and more stringent. So far, a lot of research has mainly been made on combustion. However, it is close to the limit and an after-treatment system seems essential to clear Tier 4 regulations, which is expected to go into effect around 2010. Komatsu has developed a new compact DPF ahead of the competitors to meet future regulations, utilizing the past experiences with a black emission gas removing device prescribed in the tunnel specifications.

Key Word: Diesel Particulate Filter (DPF), Diesel Engine, Emission Regulations

1. 背景

ディーゼルエンジンから排出されるPM (Particulate Matter)には図1に示すように黒煙、SOF (Soluble Organic Fraction)と呼ばれる未燃燃料、潤滑油などが含まれる。このうち浮遊微粒子と呼ばれるものが気管支喘息、肺ガンを誘発する恐れのあるものである。

図2には産業機械用の規制動向を示す。現時点で規制上、DPFが必須なのは国土交通省のトンネル規制のみであるが、Tier 4規制の施行が予想される2010年頃には規制地

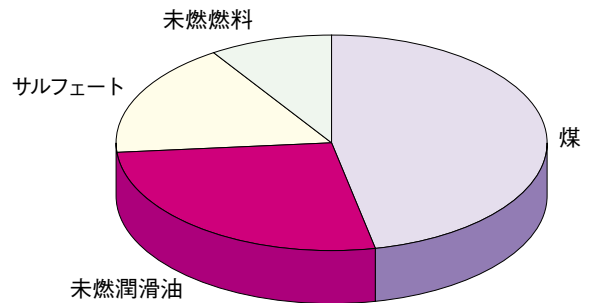


図1 ディーゼル排気ガス成分

年度	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'20XX
建設省 トンネル規制	対象機種種：トンネル内稼働車 規制内容：煤：80%低減									
国土交通省 建機規制	対象機種種：一般工事車 1次規制 黒煙：50%			2次規制 PM：0.2~0.3g/kWh (75~560kW) 黒煙：40% 50ppm軽油						
環境省	対象機種種：ディーゼル特殊自動車			PM：0.2~0.3g/kWh (75~560kW) 黒煙：40% (車検毎)						
EPA	Tier 1 225~450kW		75~130kW		Tier 2 PM：0.3g/kW			Tier 3 PM：0.13g/kW?		Tier 4 PM： 0.01g/kW?
EU	Euro 1 130~560kW		75~130kW		Euro 2 PM：0.3g/kW			Euro 3 PM： 0.15g/kW?		Euro 4 PM： 0.02g/kW?
コマツDPFの 対応	先頭機種 での品確	アプリケー ションへの 展開	受注対応、単品販売 (トンネル仕様、 都市圏)	特殊自動車レトロフィット			一部規制強化地域向け		規制地域向け 全建機	

図2 PM規制動向

域向け全アプリケーションにDPFが搭載されるものと予想される。それ以前にも2006年頃のカリフォルニア州の規制もDPF装着を前提に進めており、国内も2005年のトラックの新長期規制に対応してトラック各社はDPFを搭載すると考えられる。したがって、産業用エンジンにも数年後に同様の規制が課せられる可能性がある。

2. PM 低減機構

PMのうち煤は、両サイドで交互に目封じした多孔室の壁を持つフィルタで捕捉し、一定条件のもとで燃焼、再生するのが一般的である。ただ、煤が自然着火する温度は550～600℃と高温で、通常の運転状態では得られないため、ヒータ、バーナなどで燃焼させたり、触媒の効果で着火平衡温度を低減している。ヒータは信頼性の問題が解決されておらず、あるいは取り扱いが煩雑なため、最近の主流は触媒方式である。触媒コーティングの場合はPM以外にもHC、COなど他の有害成分も浄化する機能がある。しかし市内走行のトラック、バスなどは触媒を担持しても再生温度に到達せず、ポストインジェクションなど、更に排気温度上昇手段が必要になる。幸い、建機は、例外的アプリケーションを除き、比較的高負荷で使用されるため、自然再生が可能である。

触媒の担持位置にも2方式がある。最近着目されているのは、Johnson-Matthey社が開発した間接酸化型と言われる手法で、これはフィルタの前段に酸化触媒を設置して「NO→NO₂」に変換し、生成されたNO₂の酸化力でフィルタに蓄積した煤を燃焼させるものである。長所としては

- ①「NO→NO₂」の反応が250℃という比較的低温から生じるので、低温時の活性が高い
- ②触媒とフィルタが別体となっているので、触媒にアッシュが蓄積しない
- ③煤燃焼時の温度の影響を受けにくく、触媒の劣化が少ないなどがある。

一方で短所は

- ①部品点数が2倍となり、場積大
- ②「NO→NO₂」の反応が高硫黄燃料および高温では生じにくい

などがあり、エンジンルームが狭く、高排温である建機用としては使用しづらく、今回はこれまでのセラミックマフラ同様、フィルタに直接接触媒をコーティングする方式を選定した。図3、図4にそれぞれの構成図、表1に比較表を示す。

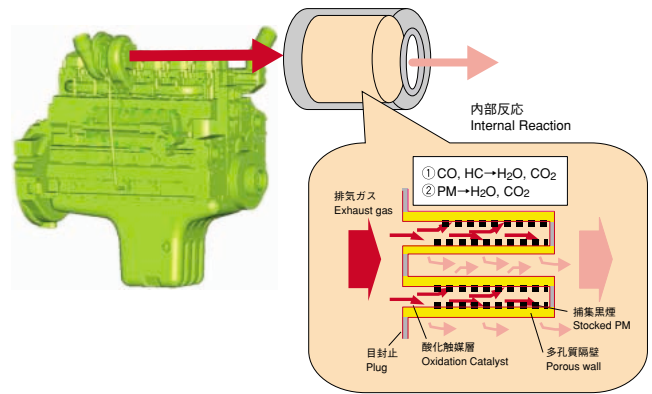


図3 直接酸化型DPF

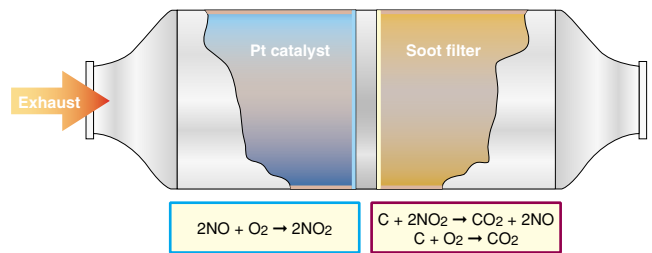


図4 間接酸化型DPF

表1 DPFシステム比較

再生方法	触媒再生		ヒータ再生 (切替式)
	直接酸化型	間接酸化型	
PM 捕集効率	○	○	× (ファイバ使用時)
再生条件			
低 温	○	○	◎
高 温	◎	×	◎
NOxの影響	△	×	◎
耐 久 性			
ハニカム破損	○	○	×
触媒劣化	○	◎	—
硫黄の影響	△(PMは増加)	×	◎
制御の複雑さ	◎	◎	×
場 積	◎	○	×
コ ス ト			
初 期	◎	○	×
メンテナンス	○	◎	×
システム発展性 (DeNOx触媒の結合)	◎ (一体化の可能性あり)	△ (位置に制約)	○
総 合	◎	○	×

3. コマツ DPF の開発のコンセプト

コマツは1989年に建設省(現国土交通省)トンネル仕様として、DPF(セラミックマフラ)の生産を開始して今日に至っている。これを将来規制に対応させるには下記の問題がある。

(1) PM の捕集効率が低い

国土交通省の規制値は煤の捕集効率が80%以上となっており、当然この値は満足している。しかし、PMとして評価した場合、捕集効率はこれよりも低く、Tier 4対応としては不十分である。

(2) 寿命、清掃間隔が短い

トンネル仕様に限定した場合、車両の寿命も短いため、現行の1000時間使用後反転、残り500時間の計1500時間の寿命でもコンプレーンは聞かれなかったが、通常建機に搭載可とするためには、メンテナンス間隔の大幅な延長が望まれる。

(3) 場積大で搭載性が悪い

現行セラミックマフラ開発当初はDPFに対する関心も低く、フィルタの品ぞろえも十分でなかった。そのため、同一サイズのフィルタを複数個組み合わせる構造を採用したため、重量、場積とも大で、一部機種のようにボンネット上に搭載している場合もある。

このため新開発の DPF は

- (1) PM の捕集効率が低い
- (2) 清掃間隔が長く、長寿命である
- (3) コンパクトで通常マフラと互換性がある

ことを目標とした。

4. 達成手段、特長

PMの捕集効率の向上は既に90%程度のもが開発されていたが、「高捕集効率」＝「目詰まりのしやすさ」→「短寿命」となる。長寿命化するためには、フィルタ容量をアップすれば良いが、今度はコンパクトさが失われることになる。これらの背反事象をいかに最適化するのが設計の課題である。これらに大きく寄与したのが、当時担体メーカーで開発中であった高密度セルの採用である。図5に既存100cpsi(1平方インチ当たりのセル数)のもの、今回新規

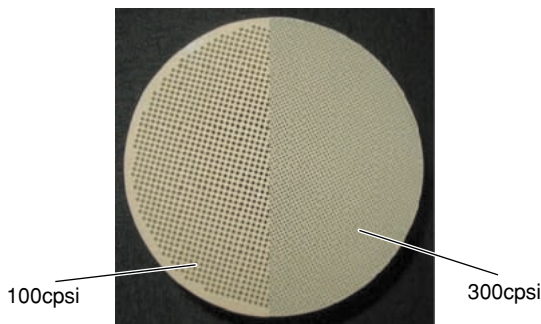


図5 新旧フィルタ比較

採用した300cpsiのものとの比較写真を示す。300 cpsi品は同一容積での表面積は1.7倍あり、この分触媒表面積を増加でき、また圧力損失を低減できる。

2番目の改良は触媒である。これまでと異なるコーティング法をDPFに最初に採用し、活性度、耐久性を向上させた。一方で、高負荷という建機特有の使い方を加味し、触媒の値段の大部分を支配する貴金属を大幅に低減し、原価改善に寄与している。

3番目の特長は入口ガス流れの均一化である。トラック、バスと異なり、マフラの収納スペースがエンジンルーム内である建機は軸方向流入、軸方向流出という、流れの均一化という点で望ましい形態がとれず、ほとんどのアプリケーションで半径方向流入、半径方向流出となる。マフラと類似の単純形状では図6からわかるように、入口流れは流入と反対方向に偏向して流れ、当然、煤も偏積する。この場合は再生時に大きな温度分布が発生し、焼損する可能性が高くなる。

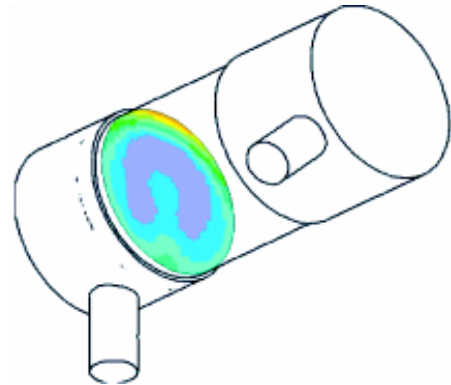


図6 入口流れ分布(オリジナル)

これらを防止するため、CFD解析を実施した。図7が改良品である。改良品は入口部に筒状のパンチングメタルと抵抗板を設置し、抵抗の大きさ、位置を最適化することにより、流れを均一にしている。

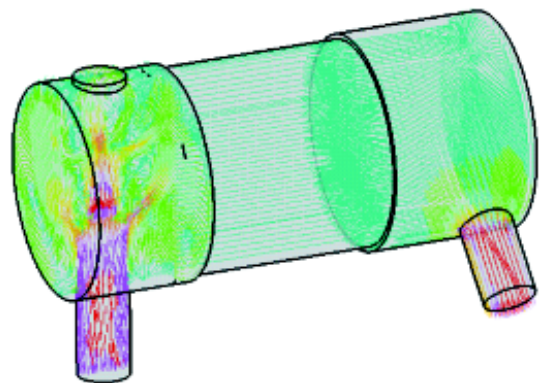


図7 入口流れ分布(改良品)

5. フィルタサイズの決定

フィルタサイズを決定する要因は、清掃あるいは交換までの寿命である。また、DPFはマフラを兼用することが多いため、騒音低減量にも注意する必要がある。

フィルタ寿命は一般的に所定排気圧力に達するまでの時間とし、この所定排圧はエンジンの性能、耐久性に影響を及ぼさない限界あるいはDPF自身の再生時に焼損しない限界として決定される。排圧上昇の一番の主要ファクターは発生する煤の量と燃焼再生可能な煤の量のバランスであるが、アッシュの蓄積、触媒の経時劣化、エンジン排気色、排気温度の排気圧力による変化などを見込む必要がある。

5.1. 煤発生量の予測

建機の場合、作業モードがある程度パターン化でき、そのパターンにおける煤の発生量と再生量のバランス検計が最初の課題である。例としてホイールローダでVシェイプ作業の場合の作動パターンを図8に示す。

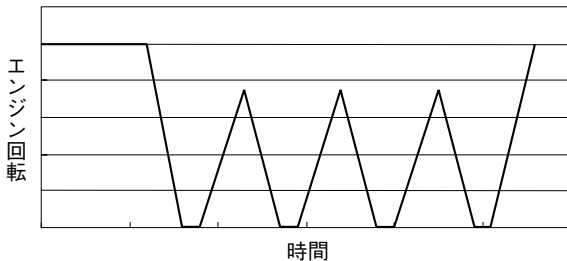


図8 ローダサイクルパターン

煤の発生量を確認するには、このパターン通りにベンチで運転しフルダイリューショントンネルで計測すれば良い。しかし、DPFはレトロフィットで種々の機械に搭載される可能性もあるため、より簡易な算出方法を検討した。定常時の煤の発生量はボッシュ濃度から算出するMIRAの式がある。

$$S = 0.982 \times \text{BSU} \times 10^{(0.1276 \times \text{BSU} - 1.66)}$$

問題は過渡時の予測であるが、加速時については、多量の煙を発生している前期加速時間と、少量の後期部に分割し、前期については計測したボッシュ濃度から、後期については到達点の定常時のボッシュ濃度を使用し、上式により換算した。前期加速時間はオパシティの計測により決定している。計算値とフルダイリューショントンネルでの実験値を比較したところ比較的良好な一致を得ており、この簡易法で代用しても問題ないとする。また、排気ボッシュ濃度は排気圧力の関数となるが、実験で求めたところほぼ直線的に変化する。つまり、DPFの目詰まりとともに、煙濃度は上昇し、DPFの煤蓄積量は増加する傾向にある。

5.2. 煤再生量の予測

煤の燃焼に関しては、DPF表面の単位面積当たり煤の燃焼可能量を温度の関数として、アレニウス関数の形で求められる。

図9に結果を示す。建機の場合、運転サイクルが比較的短いため、サイクル中の触媒温度は一定として計算をしている。また、エンジン排気温度は排気圧力の関数で、DPFの目詰まりとともに上昇する。これは再生量を増加する方向に働く。

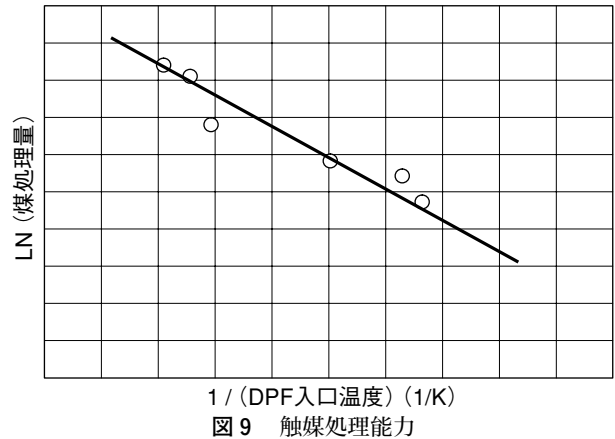


図9 触媒処理能力

5.3. 圧力損失の予測

DPFの圧力損失には下記のものが含まれる。

- (1) DPF 出入口配管部による急拡大、曲がり損失
- (2) 新品フィルタ部の通気抵抗
- (3) 煤、アッシュの蓄積による通気抵抗

(1)、(2)は固定値であるが、(3)は経時変化するものである。蓄積した煤と圧力損失の増加分より単位面積当たり単位煤量の圧力損失係数を求めておき、圧力損失係数は煤量と比例、圧力損失は速度ヘッドと比例すると仮定した。

5.4. 触媒の劣化

煤の再生能力劣化の要因には(1)触媒そのものの活性の低減と(2)触媒表面へのアッシュの蓄積による反応表面積の低下によるものがある。今回のDPFのようにフィルタに触媒をコーティングするタイプは融解移動型触媒と呼ばれ、気化による散逸が懸念されるが、実際は「NO→NO₂」の反応も同時に行われており、ベンチ耐久テスト後の調査結果では顕著な劣化は認められなかった。しかし、バランス温度が上昇している点から(2)の現象は着実に進行していると考えられ、燃料中の硫黄とともに潤滑油の金属成分も重要なファクターとなる。劣化度は表面積当たりのアッシュ蓄積量に比例し、アッシュ蓄積量は燃料中の硫黄濃度と燃料使用量に比例するとして計算した。

5.5. シミュレーション計算結果

図10に現行2-φ7.5"×7", 100cpsi品における実験値と計算値との比較, および新開発のφ12"×9", 300cpsiのDPFの計算結果を示す。

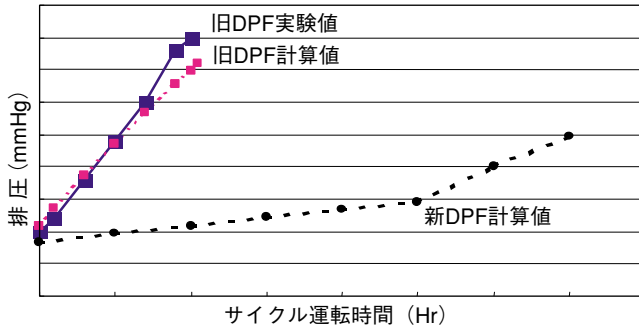


図10 寿命予測結果

実験値と計算値は後半部を除き, 良い一致を示している。100cpsi品は初期から煤を徐々に蓄積しながら, 限界圧力に達するが, 新開発品は長期間, 再生能力が煤の発生量を上回り, アッシュの蓄積による排圧上昇しか生じない。その後, 煤の蓄積が始まり, 勾配がやや急となる。各主要アプリケーションごとにこのような計算を実施し, 最適のDPFサイズを決定した。系列の一覧を表2に記す。6D140エンジンまでは1個のフィルタでカバーでき, ほぼ現行マフラと互換性のあるものを系列化した。また構造と搭載例を図12, 13に示す。

表2 DPF系列

Notation	Engine	Volume (ℓ)	Muffler Size (mm)	New DPF (300cpsi)	
				Filter Size	Body Size
KCM-1	3D84	1.5	φ150×380	φ5.66"×5"	φ156×375
KCM-1	4D84	2.0	φ170×465	φ5.66"×5"	φ156×450
KCM-3	4D95	3.3	φ220×450	φ7.5"×7"	φ203×450
KCM-4	4D102	3.9	φ220×600	φ9"×7"	φ241×450
KCM-5	6D102	5.9	φ280×525	φ12"×7"	φ318×525
KCM-6	6D114	7.2	φ280×675	φ12"×9"	φ318×700
KCM-7	6D125	11.0	φ280×800	φ12"×12"	φ318×700
KCM-8	6D140	15.2	φ340×800	φ12"×14"	φ318×775
KCM-10	6D170	23.2	φ460×700	2-φ12"×12"	318×697×800

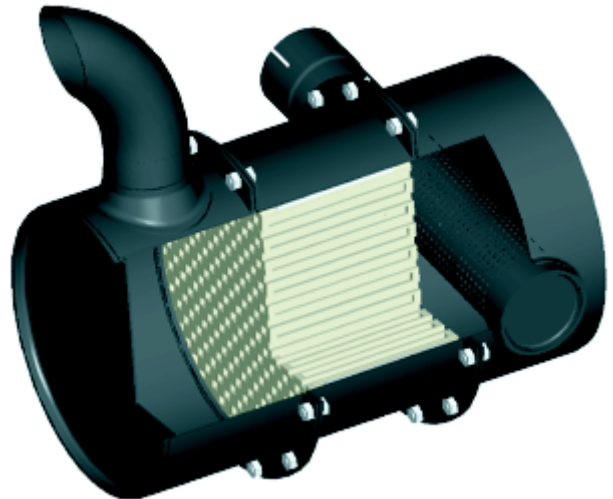


図12 PC200用DPF断面図

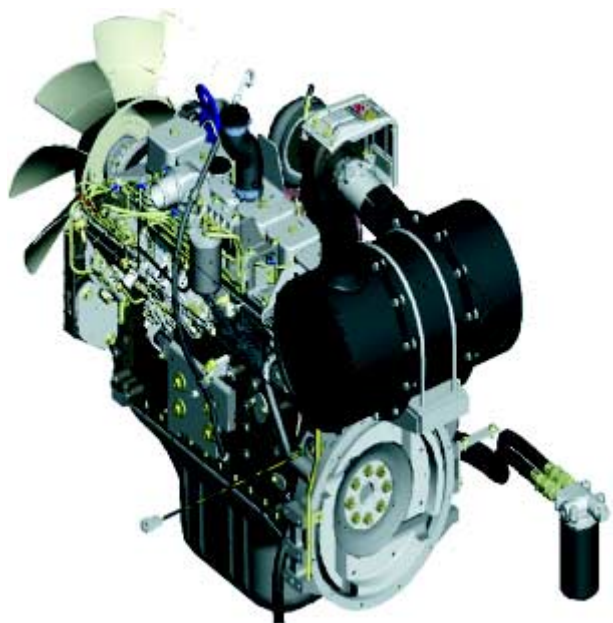


図13 PC200DPF搭載図

6. テスト結果

図14はエミッション低減効果を示す。全項目について現行より優れた結果を示している。

図15は騒音特性である。現行マフラとほぼ同等の減衰特性が得られ、マフラの代用として十分使用可能である。

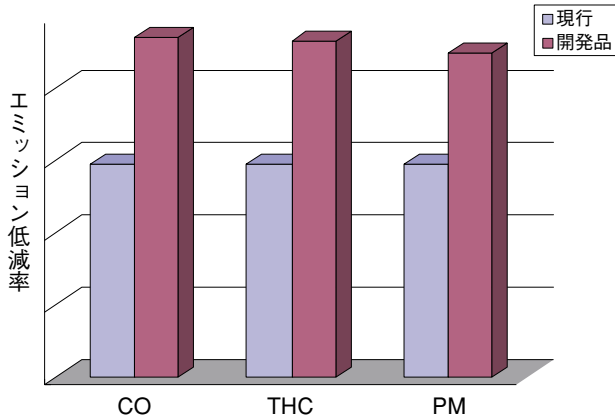


図14 エミッション低減特性

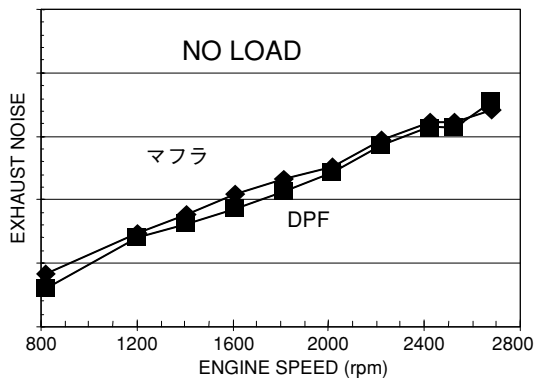
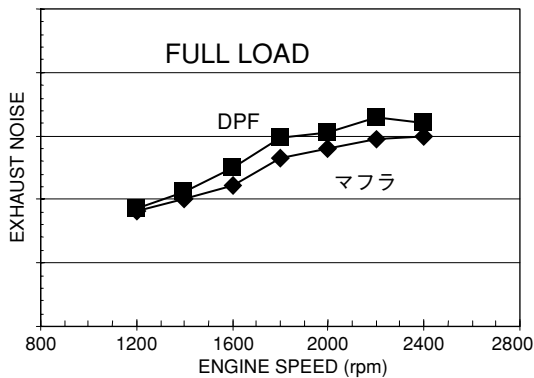


図15 騒音特性

7. まとめ

これまでのトンネル仕様の経験を活かし、次期エミッション対応手段として、より高効率で長寿命、かつ現行マフラとほぼ互換性のあるコンパクトなDPFを開発することができたと考えている。環境に対して効果大なので、ネックとなりそうなコスト低減を更に推し進め、採用拡大につなげたい。

筆者紹介



Toshihiko Nishiyama
にしやまとしひこ
西山利彦 1969年、コマツ入社。
現在、(株)アイ・ピー・エー コンポーネント研究
開発グループ所属。



Nobuhiko Emori
えもりのぶひこ
江森信彦 1983年、コマツ入社。
現在、(株)アイ・ピー・エー コンポーネント研究
開発グループ所属。

【筆者からひと言】

DPFは環境対策部品であるだけに、イメージ向上のため他社に一步でも先んじるように心掛けた。心臓部であるフィルタ、触媒が協力企業の技術であり、いかに特長づけるかに苦勞したが、どちらも新製品開発のタイミングがうまくミートして、当社が最初に利用できるのは幸運だった。