

論文・解説

24

ボンゴ用触媒担持型DPFシステムの開発

Development of Catalyzed DPF System for Bongo

松江 浩太*1 柚木 伸夫*2 林原 寛*3
 Kota Matsue Nobuo Yunoki Hiroshi Hayashibara
 崎本 正嗣*4 松尾 祐児*5
 Masatsugu Sakimoto Yuji Matsuo

要約

ディーゼル車（以下DE車）の排出ガスに含まれる浮遊粒子状物質（Particulate Matter，以下PM）による大気汚染の懸念が指摘され、首都圏をはじめとする大都市圏ではDE車の運行規制が開始され始めている。ボンゴでは、そのPMの排出をほぼゼロとし、本来の直噴DE車の美点である“燃費のよさ”を活かすために、触媒担持型DPF（Diesel Particulate Filter）システムを新開発して搭載した。このシステムでは排出ガス中のPMの約90%をフィルタで捕集でき、捕集したPMはコモンレールシステムなどの電子制御により“自動的”に除去することを可能とした。これによりボンゴはクラスで初めて大都市圏でも登録・運行が可能なDE車となった。

Summary

Air pollution caused by particulate matter (PM) contained in the emissions from a diesel engine has turned into severe health problems. In the capital sphere, therefore, no duty-diesel activity has started, which imposes regulations on diesel vehicles so that they cannot be driven freely and uninhibitedly in the sphere. The Bongo has the capability of removing almost all of PM using a newly developed DPF (Diesel Particulate Filter) system which can automatically regenerate the PM trapped in DPF. The Bongo is the first-in-class vehicle to satisfy new Japanese short-term emission standards and NOx/PM law for vehicles.

1. はじめに

東京都をはじめとして大都市圏を中心にDE車から排出されるPMによる大気汚染の懸念が指摘され、NOx・PM法の施行やDE車の運行規制が始まるなど、都市圏でDE車を使用することが難しい環境になっている。一方、DEには燃費がよいという本来の利点があり、商用車ユーザからは根強い需要があるのが実態である。特にボンゴは保有ユーザの約4割（当社資料）がNOx・PM法対象地域に集中する“都市型輸送貨物車”であるため、早急な対応が必要となっていた。

今回のボンゴでは、新短期規制に適合するのを機に“大都市圏でもこれまでと変わらず使用できるDE車”を目指して、PMをほぼゼロにする“DPFシステム”を新規開発して搭載し、新短期規制、自動車NOx・PM法と首都圏ディーゼル車運行規制のすべてにクラスで初めて適合した。Fig.1にボンゴクラスの各排出ガス規制値と低減率の例を示す。

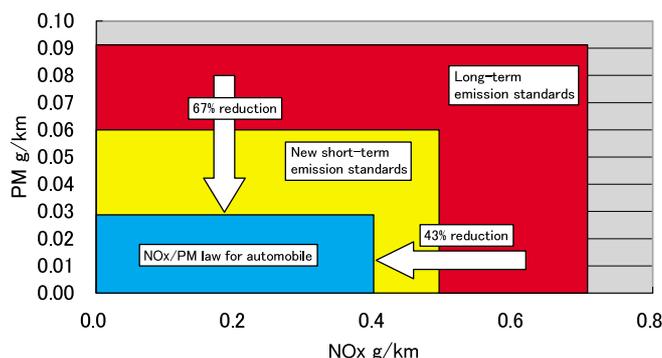


Fig.1 Changing of Emission Regulation(1.7 GVW 2.5)

2. パワートレインの特徴

Fig.1に示したように、ボンゴでは規制値ベースでPMの約70%、NOxも約40%の削減が必要であった。そこで、ベースエンジンは、マツダ6（日本名：アテンザ）などに

*1, 2, 4, 5 第2エンジン開発部
 Engine Development Dept. No.2

*3 技術研究所
 Technical Research Center

搭載し、欧州Stage4のEM規制に適合し高出力・低EMの直接噴射式DE MZR-CDとし、NOx低減のポテンシャルを確保した。これに、日本国内向け商用車用の仕様変更を行い、RF-CDTとしている。RF-CDTの諸元をTable 1に示す。

Table 1 Engine Specification

Displacement	cc	1998
Bore × Stroke	mm	86 × 86
Combustion Type		Direct Injection
Compression Ratio		18.4
Max Power	kW/rpm	63/3500
Max Torque	Nm/rpm	178/2000
Variable Swirl system		with
Injection system		Common Rail System (Denso U2P)
Fuel Pressure Max	MPa	180
Turbo Charger		with (IHI RHF3H)
Charged air cooler		Without

3. 触媒担時型DPFシステムの概要

以下にポンゴに搭載したPM低減の中心技術である“DPFシステム”に必要とされる2つの機能について解説する。

- 1) エンジンから排出されるPMを捕集する機能
- 2) 捕集したPMを浄化する機能

3.1 DPFでPMを捕集するメカニズム

DPF本体の外観をFig.2に示す。

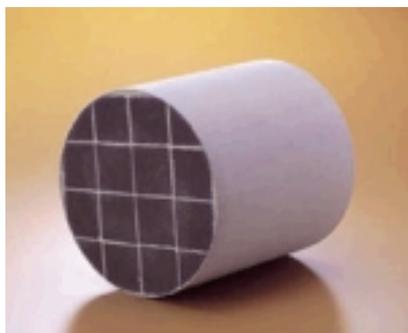


Fig.2 Outer View of DPF

DPF内部は従来から使用している排出ガス浄化触媒用セラミックス担体と同様に1mm角程度の断面を持った細かい通路（セル）に分けられており、セルの端面が交互に目封じされているのが特徴である（Fig.3）。セラミックス製の

多孔質体であるため、セル間の壁の内部は直径が数μ～数十μmの気孔が3次的に無数に連通した構造になっている。上流側が開口されたセルの入口から流入した排出ガスはセル間の壁内部の気孔を通り、下流側が開口された隣のセルから排出されるが、PMは気孔にフィルタリング（捕集）され、壁に堆積していく（Fig.4）。

PMを捕集した状態のセル拡大写真をFig.5に示す。

このメカニズムにより、DPFではエンジンから排出されるPM分の約90%を捕集・低減することが可能である。

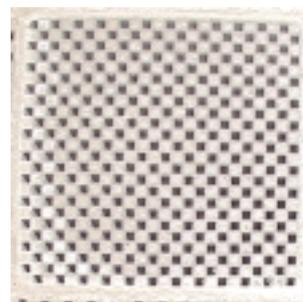


Fig.3 Close Up View of a Part of DPF Side Surface

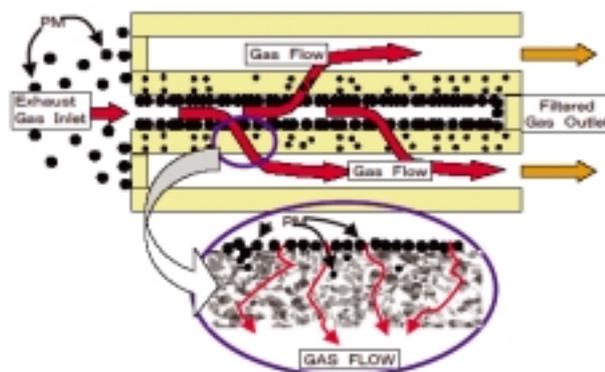


Fig.4 Mechanism of PM Trap on DPF

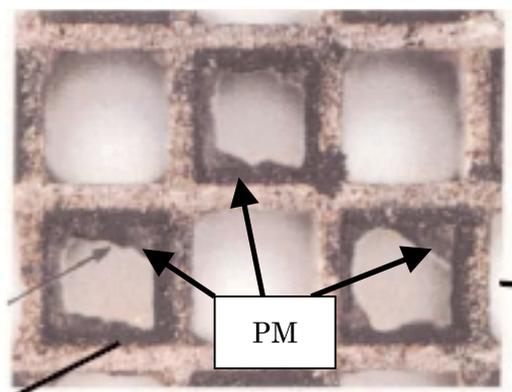


Fig.5 Cutting View of Cell with PM

3.2 PMを除去するメカニズムとボンゴのシステム

(1) PM浄化のメカニズム

PMを捕集した状態で運転を継続すると、PMの堆積が増えるに従って排気圧力が上昇し、出力の低下などにつながるため、捕集したPMを一定以上溜めず浄化する“除去作業”が必要である。

除去の方法としては、PMのほとんどが炭素(C)の化合物であることから、本システムでは“加熱して酸化除去する”メカニズムを採用しており、このメカニズムを“再生”と呼んでいる。この再生方式を採用したDPFシステムは下記の3種類に大別できる。

- 1) 外部熱源方式...外部電源を使用し、電気ヒータでPMを加熱除去する方式(レトロフィットなど)
- 2) 燃料添加剤方式...燃料中にPMの着火温度を低下させる酸化補助剤(セリアなど)を混入し、その効果でPMの酸化反応を促す方式(欧州の一部乗用車)
- 3) 触媒方式...DPFに担持した酸化触媒と排出ガスの熱を利用してPMの酸化反応を促す方式

(2) ボンゴのDPF再生方式

ボンゴには自営業者から運送業者まで幅広いユーザが存在するため 特殊なメンテナンスを要求することが難しい。そこで、ユーザのメンテナンスが不要で環境にもやさしい“触媒方式”を基本とした。触媒方式のDPF再生の特徴は、触媒の作用により、PMが自己着火で燃焼を開始する温度よりも低い温度からPMの酸化除去ができることであり、この再生方式を“連続再生”と呼んでいる。しかし、連続再生は排出ガスの温度が低い場合のPM再生速度が遅く、ボンゴの使用条件では、高速道路などの高負荷走行では十分な連続再生が可能であるが、それ以外の走行条件では連続再生だけでは十分な再生ができない。そこで、所定のPM量が捕集された時に、電子制御で自動的に排出ガス温度を上昇させ、捕集されたPMを全て燃焼させる“自動再生制御”を追加したシステムとし、再生能力を確保した。このシステムをFig.6に示す。

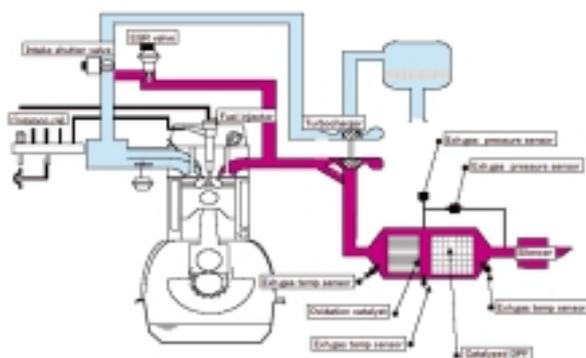


Fig.6 Schematic of DPF System for Bongo

3.3 ボンゴ用DPFシステム構成の特徴

次に、ボンゴに搭載したDPFシステムの特徴的な部品について説明する。

(1) DPFユニット

ボンゴ用DPFユニットは、前段に酸化触媒、後段にDPF担体を一体ケースに収めた“2ベッド構造”を採用して小型化を図り、車両床下への搭載を可能にした(Fig.7)。

前段の酸化触媒にはコーゼライト製担体を使用し、従来と同様の一酸化炭素や未燃炭化水素を低減する役割とともに、自動再生時に排出ガス中に供給された未燃燃料を酸化反応させ、DPF入口のガス温度を上昇させる役割を持たせている。このため、軽油成分の燃焼反応と耐熱性に優れた新開発の触媒を採用した。



Fig.7 DPF Unit (cut model)

後段のDPFには“炭化ケイ素(SiC)”製担体(1.9L:NGK(株)製)を採用した。DPFには一般的に“コーゼライト製担体”と“SiC製担体”があるが、SiCはコーゼライトと比較して熱伝導性が10倍程度高く、捕集したPMを酸化除去する際の発熱による局所的な高温化を抑制できる。また耐熱温度自体もコーゼライトより高いため、PMを酸化除去する際の高熱に対する信頼性が高く、PMの許容捕集量を高く設定することが可能である。ボンゴでは、前述のように連続再生運転が可能な領域が高速走行などの限られた領域であり、平均的なユーザの使用形態を想定すると、数百kmに1回の自動再生が必要である。しかし、自動再生中は通常走行時より燃費が悪化するため、自動再生を実行するインターバルはできるだけ長く、かつ短時間で効率よくPM浄化をすることが理想である。そのため、再生を開始するPM捕集量を高く設定でき、自動再生実行のインターバルが伸ばせる“SiC製DPF”の特徴を利用することとした。更にDPFに担持する触媒は、PM浄化性能に優れた新開発酸化触媒として、触媒によるPM浄化の機会を最大に確保するとともに、自動再生によるPM除去が完了する時間(再生時間)の短縮を行った。これらの材料技術により、自動再生を実行するインターバルはコーゼライト担体を使用した場合の約2倍に、再生時間も数分程度に短縮でき、燃費悪化を1%以下(再生頻度を考慮した10・15モード平均値)に抑制できた。

(2) コモンレール式燃料噴射システム

ハード面はベースエンジンであるMZR-CDと同一である。RF-CDTでは従来の使い方に加え、DPFに捕集したPMを除去する“自動再生”制御のために、噴射主噴射(メイン)より遅いタイミング側での噴射可能領域を広げているのが特徴である。

(3) PM捕集量算出用センサ

DPFのPM捕集量をDPFの前後の差圧から算出するため、2つの圧力センサ(DPF前後差圧センサ、DPF前圧センサ)、3本の温度センサ(酸化触媒上流、DPF上流、DPF下流)とエアフローセンサを採用した。各センサから得られた値をベースにコンピュータでモデル演算を実施し、DPFへのPM捕集量を高精度に算出している。

(4) 電子制御吸気シャッターバルブ

自動再生時に吸気量をコントロールし、排出ガスの熱容量を低減するため、制御精度が高く応答性のよい、DCモータ駆動の電子制御式吸気シャッターバルブを採用した。吸気シャッターバルブの開度は、運転状態や環境条件などを基準にコンピュータで目標開度を算出し、TACM(Throttle Actuator Control Module)を介してフィードバック制御している。

4. ボンゴ用触媒担持型DPFシステム制御の特徴

4.1 自動再生制御実行タイミングの算出

DPFにPMを溜め続けると、前述のように、DPFが詰まって排気圧力の上昇などが懸念される。

このような状況を回避するためには、DPFに捕集したPMの量を正確に把握して、自動再生を開始するタイミングを算出する必要がある。従来、PM捕集量とDPFの前後差圧には1対1の相関があるといわれていたが、実際にはFig.8のように、同じ捕集量でも捕集量をゼロから増やしていく場合と、ある量から減らしていく場合で大きな特性差があり、従来の考え方ではDPFに捕集可能な量を超えるほどの算出誤差が出てしまうことが確認できた。

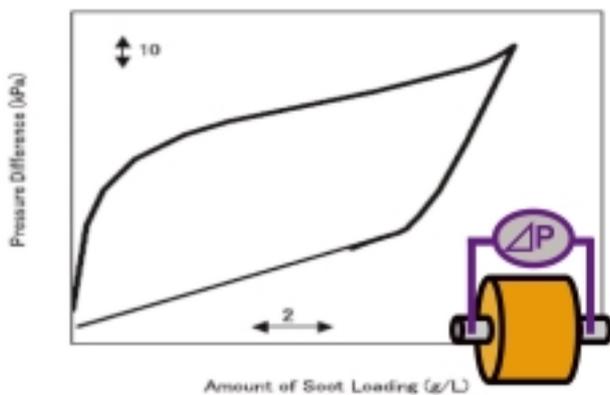


Fig.8 Characteristic of DPF Pressure Drop

この圧損特性差のメカニズムが“DPFへのPM堆積パターンの違い”(Fig.9)にあることを特定し、そのパターンをモデル化してPM捕集量算出演算に織り込むことで、算出誤差を低減した。この結果、DPFに捕集したPMの除去を開始するタイミングを正確に算出することが可能となった。

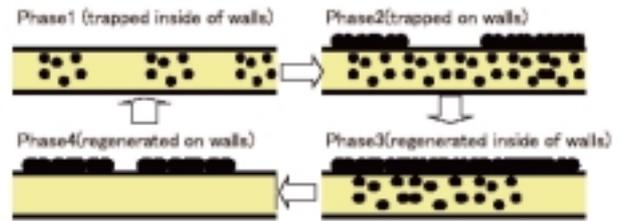


Fig.9 Patterns of PM Trap on DPF

なお、ボンゴでは、センサ類の故障やその他の不測の事態でも正確な捕集量が算出できるように、エンジンの運転履歴から捕集量を推定する方法も導入し、両方式を併用して捕集量の算出精度を向上させている。

4.2 捕集したPMの除去方法

前述のように、ボンゴ用DPFシステムでは捕集したPMを除去するために、連続再生と自動再生を使い分けている。Fig.10に運転領域ごとに適用する再生方法を示す。

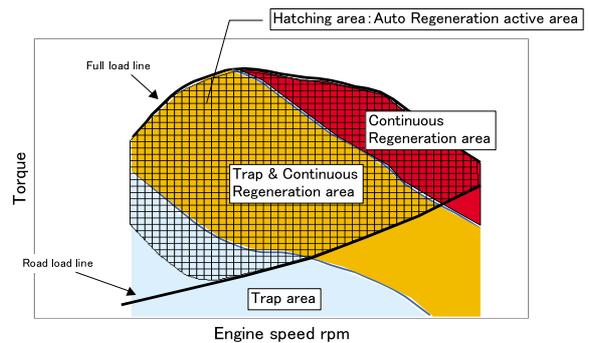


Fig.10 The Way of Regeneration

(1) 連続再生 (Continuously Regeneration area)

一般にPMの自己発火温度は約550 であるが、通常の走行シーンでは排出ガス温度がその温度に達する頻度はほとんどない。そこでDPF担体にPM酸化性能に優れた触媒を担持し、PM着火温度を100~150 低減して高負荷走行時に連続再生を可能とした。

(2) 自動再生(Hatching area: Auto Regeneration active area)

DPFに流入する排出ガス温度がPM着火温度に満たない運転領域(Trap area)や連続再生速度の遅い領域(Trap

& Continuously Regeneration area) で、PM捕集量が基準値を上回った際に自動的に制御を実行してPMを除去する再生である。自動再生では、吸気シャッターバルブとコモンレール噴射装置の総合制御を行い、排出ガス温度を上昇させてPM着火温度にして再生を行う。制御の概要を以下に示す。

1) 電子制御式吸気シャッターバルブ制御

吸入空気量を減少させ、排出ガスの熱容量を低減する。

2) 燃料噴射制御

下記2種類の噴射パターンをガス温度により使い分け、PM着火温度以上にDPF流入ガス温度を昇温してPM除去を実行する。

- ① フォロー噴射：メインの燃料噴射後の膨張行程前半のシリンダ内で着火可能なタイミングで行う噴射。エンジン出口での排出ガス温度を上昇させ、下流の酸化触媒の温度を上昇させ、維持する。
- ② ポスト噴射：シリンダ内では着火しない膨張行程中盤に行う噴射。エンジン下流に未燃燃料を供給し、酸化触媒上で酸化反応をさせ、その反応熱でDPF入口のガス温度をPM着火温度以上に上昇させる。

Fig.11に各噴射のイメージを、Fig.12に制御例を示す。

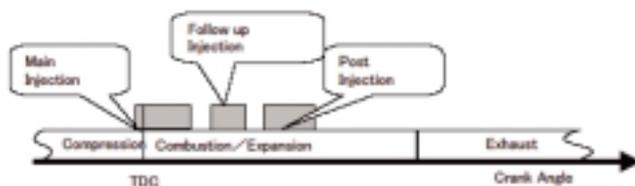


Fig.11 Image Drawing of Each Injection

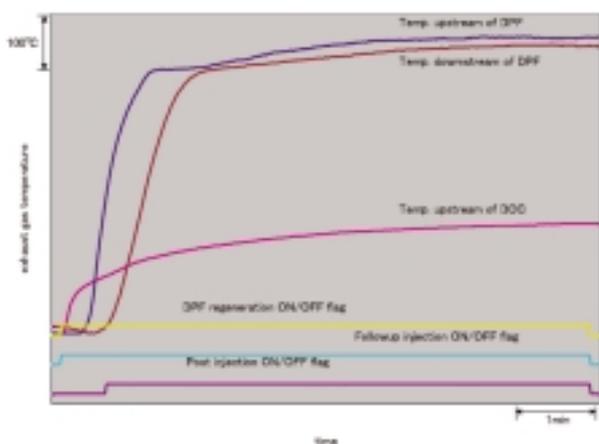


Fig.12 Temperature at Auto Regeneration

(3) 手動再生

アイドリングや極低負荷の運転領域やエンジンが暖機できていない燃焼が不安定な条件では、効率的な自動再生を行うことが難しいため、自動再生制御を停止させている。

そのため、この領域で運転を続けるとDPFにPMが捕集

され続ける可能性がある。ボンゴのDPFシステムでは、自動再生されずに高捕集量となった時、これを検出してインストルメントパネル内の“DPFランプ”を点灯させ、ドライバに告知するシステムとした。DPFランプ点灯時には、一定の車両条件が整った状況でインストルメントパネルに設けた“DPFスイッチ”を押すと、強制的に再生制御を実行し、安全にPMの除去を実施することができる。

4.3 自動再生中のドライバビリティ向上

以上の技術により、DPFへのPMの捕集と再生は可能となったが、実際にドライバに意識させずに自動再生を実行するには、自動再生制御と通常走行の切り替わり時にトルク段差が発生することを防止したり、走行中のアクセルワークに対する加減速の応答性が変化することを防止したりする必要がある。そこで、ボンゴでは自動再生時にアクセル開度やエンジン回転数から、同一運転状態で通常走行時に発生するトルクを予測し、トルク差が発生しないようにトルク補正を行う“トルク一定制御”を導入して、運転者に制御の違いを感じさせないよう配慮した。その結果、通常運転時と再生運転時で同一の加速が可能となっている。

5. システム耐久性

5.1 フルライフノーメンテナンスへの対応

ボンゴ用DPFシステムでは下記2点に注力した開発を行い、フルライフノーメンテナンスを実現した。

(1) 自動再生頻度と自動再生時のガス温度コントロール

ボンゴ用DPFシステムで耐久性のキーとなる部分は、“前段酸化触媒およびDPFに担持した触媒の耐久性”にある。酸化触媒は一般に高温条件にさらされると、貴金属のシタリングが生じ、触媒反応活性が低下する。特に自動再生中は酸化触媒とDPFが高温にさらされ続けるため、自動再生中のガス温度の影響が大きい。そこでボンゴ用DPFシステムでは、耐久性を重視した貴金属仕様を選定した上で、次の2点に着目した制御の最適化を実施し、フルライフノーメンテナンスを実現した。

- 1) 自動再生中のガス温度を常にモニタ、走行条件によらず適切な温度に保つ補正を行うことで、触媒の劣化を防止した。
- 2) 通常走行時に排出するPM量を最大限減少させるチューニングを行い、自動再生頻度を低減した。

同時に使用燃料をPM発生量が少ない“S50低硫黄燃料”に限定し、耐久性に有利な設定としている。

(2) DPFへの異物堆積の抑制

DPFに再生で除去できない異物が捕集されると、排圧上昇が生じ、出力低下などが発生する。また、常に捕集量が高めに誤算出していくため、自動再生の実行頻度が増加し、触媒の劣化も加速されていく。一方、DPFに捕集される異物の大部分は、消費された潤滑油中のアッシュ分に起因する化合物であるため、ボンゴの潤滑油にはアッシュ成分比

率の少ない最新の“DL-1 低アッシュ潤滑油”を指定している。

(3) エンジン本体に与えるダメージ

自動再生モード中のフォロー噴射の一部とポスト噴射は、噴射時期が遅く、噴霧がシリンダ壁に直接あたるケースがあるため、潤滑油の燃料希釈が発生する。ボンゴでは、エンジン信頼性に影響を与えない希釈率を把握した上で、先行実施したDPF装着車両のモニタ走行から得られた結果を基に、ポスト噴射とフォロー噴射の実行開始タイミングのチューニングを行い、排出ガスの昇温につながらない余分な噴射量を低減する制御を織り込んだ。これらにより、RF-CDT型エンジンはDPFなし従来のMZR-CDエンジンと同等の信頼性を確保した。

6. 結論

- (1) 酸化触媒と触媒担持型DPFを1コンテナに収めたDPFユニットと制御システムを構築し、ボンゴに搭載した。
- (2) DPFへのPM捕集パターンのモデル化により、DPF前後の差圧から高精度に捕集量を算出することを可能とした。
- (3) コモンレール式燃料噴射装置とDCモータ式吸気シャッターバルブの統合制御により、排出ガス温度の低い運転条件でも、捕集したPMの自動再生を可能にした。
- (4) 通常運転時と自動再生時のトルク一定制御により、自動再生を意識させないドライバビリティを実現した。
- (5) 自動再生制御とチューニングの最適化および低硫黄軽油、低アッシュオイルの採用により、フルライフのDPFシステム耐久性を確保した。
- (6) 以上の新技术を織り込んだ触媒担持型DPFシステムを搭載して排出ガス中のPMを約90%低減した結果、ボンゴは国内新短期排出ガス規制と自動車NOx・PM法にクラスで初めて適合し、更に首都圏ディーゼル車運行規制にも適合する商用車に仕上げることができた。

参考文献

- (1) 日本学術振興会高温セラミック材料第124委員会：SiC系セラミック新材料 最近の展開，東京，内田老鶴園（2001）

著者



松江浩太



袖木伸夫



林原 寛



崎本正嗣



松尾祐児