

一 般 論 文

ディーゼル排ガス浄化装置 (DPF : Diesel Particulate Filter)の開発

Development of a New type Diesel Particulate Filter (DPF)

内 藤 健 太* 千 林 暁*
K. Naito S. Sembayashi

概 要

海外の旧式ディーゼル車向けとして、電気ヒータによるフィルタ自動再生機能をもったディーゼル排ガス浄化装置(DPF : Diesel Particulate Filter)を開発した。実車実路耐久試験により、良好な浄化性能と耐久性能を有することを実証した。本稿では、開発したDPFの基本原理、要素技術、走行耐久試験結果について紹介する。

Synopsis

We have developed a new type diesel particulate filter (DPF) suitable for retrofit application to medium duty diesel cars in the world. Significant feature of our DPF is a unique filter regeneration function using electric heaters. DPF models using our design demonstrated sufficient exhaust gas purification performance and durability during the mileage test on the road. In this paper, outlines of our DPF, such as a concept, key technologies and mileage test results, are described

1 . はじめに

ディーゼル車の排ガス中に含まれる微粒子は大気中の浮遊粒子濃度に大きな影響を与え、都市部の大気汚染問題に深く関わっている。日本を含む一部の国では、微粒子排出量の少ない新式ディーゼル車の普及・置換が進んでいるが、他の国々では燃料品質や経済的事情の問題もあって旧式ディーゼル車への依存度の高い状態が続いている。

新式ディーゼル車に搭載されているディーゼル排ガス浄化装置(Diesel Particulate Filter : 以下、DPFと表記)は、高い微粒子除去率と酸化触媒を利用したフィルタ再生機能とを実現している。但し最新の燃料噴射システムを備えたエンジンであることが不可欠であり、また車両のECU(電子制御ユニット)との複雑な連携による排ガス温度制御が必要であるため、旧式ディーゼル車への適用には多くの困難を伴う。

当社では、海外の旧式ディーゼル車向けとして、燃料噴射制御やECUとの連携・調整を必要としない電気ヒータ再生式DPFの基本技術を開発した。この技術は韓国メカによって製品化され、2010年に韓国の公的認証を取得し、2011年に韓国国内で販売を開始した。当社は韓国メカに電装部品の供給を行っている。

2 . DPF(Diesel Particulate Filter)

ディーゼル排ガス中の微粒子は、大まかには油分(白煙)とカーボン粒子(黒煙)に分類でき、代表的な運転パターンにおける油分とカーボン粒子の重量比はおおよそ3 : 7である。

DPFは車両の排気系統に装着され、排ガス中の油分とカーボン粒子を燃焼除去する。旧式ディーゼル車に適用する場合は排気管を途中で切断してDPFを取り付ける。

DPFは、通常、酸化触媒とフィルタで構成される。油分は酸化触媒で燃焼除去される。油分に対する酸化触媒

*新エネルギー・環境事業本部

の活性開始温度は200 程度なので、通常運転の排ガス温度で油分を燃焼除去することはさほど困難ではない。一方、カーボン粒子はフィルタで捕集される。フィルタがカーボン粒子で目詰まり状態になると、排気系の圧力損失が増大して、エンジン出力の低下、燃費の悪化などを引き起こすので、車両用にはフィルタの目詰まりを解消する「自動フィルタ再生機能」が必要となる。フィルタ再生には、捕集したカーボン粒子を酸化燃焼して二酸化炭素にガス化すればよい。カーボン粒子の酸化燃焼には600 程度以上の高温が必要である。

小さいセラミック繊維(白色)の小片に、排ガスから採取したカーボン粒子(黒色)を塗布し、電気炉(炉内ガス:空気)を用いて、加熱温度と加熱時間によるカーボン粒子の酸化燃焼特性を調べた結果を図1に示す。加熱温度が700 以上になれば加熱時間は数分でよいが、加熱温度が600 程度以下だと10分以上の加熱時間が必要となる。一方、エンジンを最高出力で運転しても排ガス温度は500 ~600 程度であるから、通常の運転条件でフィルタ再生を実現することは難しい。カーボン粒子の酸化燃焼温度を下げるための技術が種々開発されているが、カーボン粒子の排出量が多い旧式ディーゼル車への適用は限定的である。

カーボン粒子を捕集したフィルタを高温に加熱する技術には、軽油バーナー再生式(軽油バーナーで排ガスを加熱)、燃料噴射再生式(酸化触媒に軽油を噴射して軽油の酸化燃焼熱で排ガスを加熱)などがある。これらの再生方式は、構造が比較的簡単であるが、燃費に直接的に影響し、加熱特性が触媒の劣化状態や排ガス中の酸素濃度に依存するなど制御が難しい。当社は、構造が比較的複雑になるが、加熱制御の安定性に優れた電気ヒータ再生式の開発に取り組んできた。

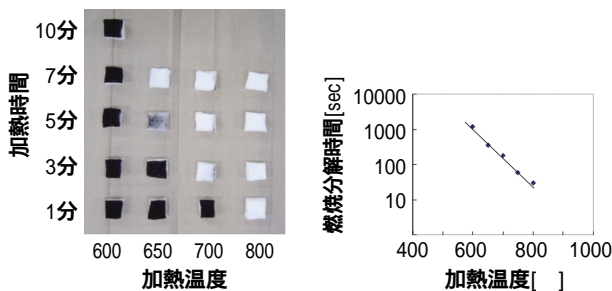


図1 ディーゼル排ガス中のカーボン粒子の酸化燃焼特性

3. 電気ヒータ再生式DPFの基本原理

排気量5000ccのエンジンでアイドリング状態の排ガス流量はおおよそ1500L/min程度である。排ガスの比熱を空気と同程度と考えれば、この排ガス流量を電気ヒータ

で600 以上に加熱するには、10kW以上の電力を要する。走行時は排ガス流量はさらに大きくなるので、さらに多くの電力を必要とする。

通常の車両用バッテリー・オルタネータの能力を勘案すれば、許容範囲は瞬時電力1kW程度以下、平均消費電力200W程度が目安と考えられる。

このため、当社では、次のようなシステムの開発に取り組んだ。フィルタを複数のフィルタユニットに分割し、フィルタユニットを交互に加熱再生する。各フィルタユニットのフィルタ材には断熱性に優れた繊維フィルタを採用し、各ユニットの排ガス流入口には遮断弁を設け、加熱再生時は遮断弁を閉じて、微粒子捕集面を含む加熱空間からの熱の散逸を防ぐ。このようなシステムにより、少ない電力で高い加熱温度を実現することができる(特許第4023514号)。

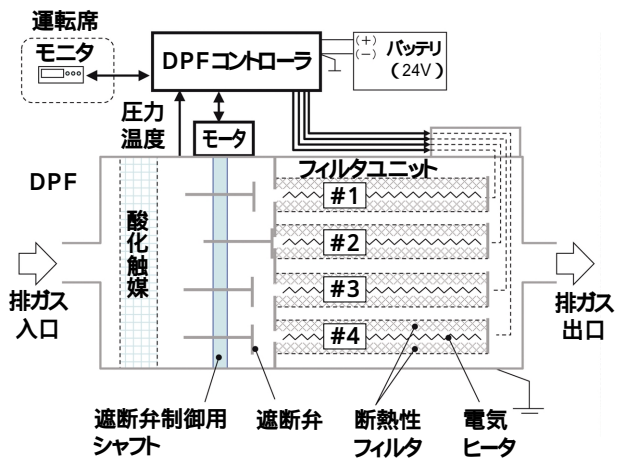


図2 電気ヒータ再生式DPFシステムの模式図

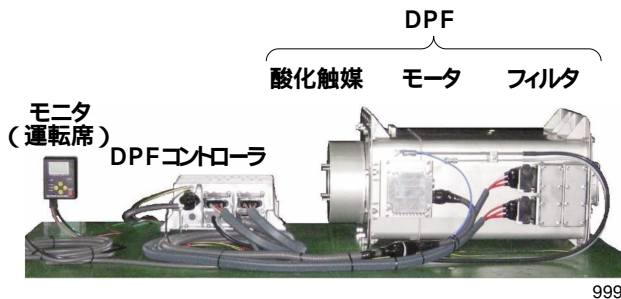
このシステムの模式図を図2に示す。酸化触媒で油分を除去した排ガス流はフィルタに導かれる。フィルタは4つのユニットに分割され、各ユニットは電気ヒータと遮断弁を備えている。電気ヒータは断熱性フィルタの微粒子捕集面で包み込まれるように配置されており、遮断弁を閉じることで微粒子捕集面を含む加熱空間は高い断熱性を確保することができる。

4つのフィルタユニットに#1、#2、#3、#4と番号をつけて、各ユニットの遮断弁と電気ヒータの動作を以下に説明する。いま、ユニット#1、#3、#4のユニットの遮断弁が開状態で排ガス中の微粒子を捕集しており、ユニット#2の遮断弁が閉じていて加熱再生が完了した状態にあったとする。排ガス中の微粒子の捕集によってユニット#1、#3、#4のユニットの目詰まりが進行し、DPF全体の圧力損失が高くなれば、ユニット#2の遮断弁を開状態に切り替えるとともに、ユニット#3の遮断弁を閉状態に切り替える。ユニット#2は加熱再

生が完了しているため、DPF全体としては目詰まり状態が解消され、DPFの圧力損失は低下する。この目詰まり状態が解消されている間にユニット#3の加熱再生を完了しておく。次にDPF全体の圧力損失が高くなったときはユニット#3の遮断弁を開状態に切り替え、ユニット#4の遮断弁を閉状態に切り替え、ユニット#4の加熱再生を行う。このような操作を順送りに実施していく。この遮断弁と電気ヒータの動作は、DPFコントローラによって制御される。遮断弁の開閉制御には、モータを採用し、モータで回転するシャフトにカムを取り付け、モータ出力軸の回転制御によって遮断弁の開閉制御を行う。

4. 車載用電気ヒータ再生式DPFの基本技術

前節で説明したDPFシステムの一例を図3に示す。排気量3000cc~8000ccクラスの車載用として試作したものである。このシステムの各構成要素の概要を以下に紹介する。



仕様(試作機)	
適用車種	排気量3000~8000cc
微粒子除去率	80%
装置圧力損失	50kPa
消費電力	300W(燃費悪化 5%)
寸法・重量	<ul style="list-style-type: none"> DPF 700(L)×300(W)×200(H)mm,35kg DPFコントローラ 311(L)×231(W)×117(H)mm,3.5kg

図3 車載用電気ヒータ再生式DPF

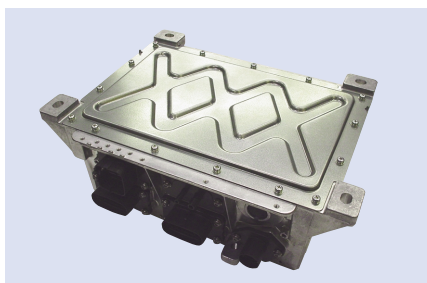


図4 DPFコントローラ

寸法	311(L)×231(W)×117(H)mm
重量	3.5kg
保護構造	IP67相当
動作電圧	20~32V
動作温度範囲	-30~+85
ヒータ端子許容電流	47A(10分)、65A(20ms)

(1) DPFコントローラ

DPFシステムの司令塔であり、その主な機能は次のとおりである。

フィルタ再生時期の判定

DPFのフィルタの目詰まり状態を圧力センサ(コントローラ内蔵)と温度センサ(フィルタ本体に取り付ける熱電対)で監視し、フィルタ再生時期を自動判定する。車両用途では、瞬時の圧力損失・排ガス温度とフィルタの目詰まり状態との相関性は低いいため、特殊なアルゴリズムによって、フィルタ再生時期を判定している。

フィルタ加熱再生動作の制御

フィルタ再生時期と判定したら、どのフィルタユニットを加熱再生すればよいかを自動で判断し、遮断弁の開閉制御と電気ヒータの通電制御を行う。フィルタユニットの過熱を防止するため、電気ヒータへの通電は排ガス温度とバッテリー電圧をもとに制御する。バッテリーの負担を軽減するため、エンジン停止状態であれば加熱再生を順延する機能を備えている。エンジン停止状態は圧力損失の監視値を利用して自動検出している。

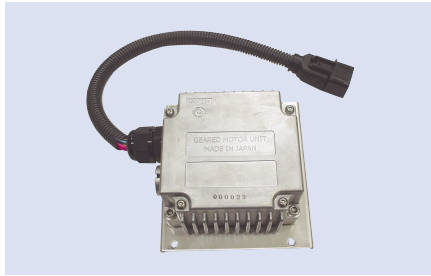
自己診断

DPFシステムの運転状態を常時自己診断している。異常検出時は、加熱再生動作を自動で停止する。自己診断結果は、CAN通信によって、リアルタイムで運転席のモニターに表示・記録することができる。

DPFコントローラの外観と仕様を図4に示す。(社)日本自動車技術会のJASO D規格に準拠した耐環境性試験をクリアしており、排気系統周辺の劣悪な環境下でも使用可能である。DPFコントローラは当社で製品化し、韓国メーカーに供給を行っている。

(2) モータ

遮断弁の開閉制御はカムを取り付けたシャフトの回転を利用して行う。このシャフトの回転制御にはモータを採用した。モータは、DCブラシレスモータとギアで構成され、出力軸には回転位置検出機能を組み込んでいる。



999

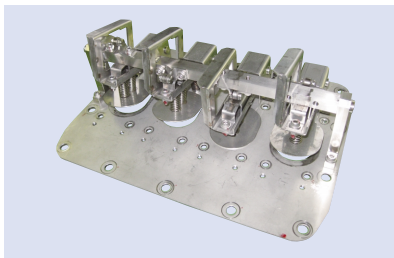
図5 モータ

寸法	134(L) × 125(W) × 71(H)mm	
重量	1.2kg	
保護構造	IP67相当	
動作電圧	20 ~ 32V	
動作温度範囲	-30 ~ +85	
トルク	typ 2.45N・m	max 4.90N・m

外観と仕様を図5に示す。(社)日本自動車技術会のJASO D規格に準拠した耐環境性試験をクリアしており、排気系統周辺の劣悪な環境下でも使用可能である。このモータは当社で製品化し、韓国メーカーに供給を行っている。

(3) 遮断弁

遮断弁には、開状態では、エンジン最高出力で15,000 L/minを超える大流量をできるだけ低い圧力損失で流せるだけの開口部が必要であり、一方、閉状態では加熱再生の熱効率の観点から漏れ流量を10L/min以下(開口部の間隙0.03mm以下)に抑制する遮断性能が必要となる。排ガス温度は500 を超えることがあり、また、加熱再生時のフィルタユニット内部温度は700 以上に達するため、遮断弁には高い耐熱性が要請されるとともに、熱歪みを吸収できる構造が必要とされる。過酷な熱サイクル・振動環境下で長期間安定した開閉動作を実現するため、矩形の開口部を金属プレートで開閉する技術を開発した。外観を図6に示す。パッキン・ガスケット類は使用していない。モータに連結されたシャフトにカムを取り付け、カムの回転によって金属プレートを押(閉)・引(開)して開口部の開閉操作を行っている。カムは二重構造とし、振動環境下での共振現象による遮断弁の誤動作を防いでいる。高温域での摩擦対策として、遮断弁の回転部分・摺動部分にはコロ等を採用している。また、金属プレートの押引動作には耐熱性スプリングを介在させ、部品加工精度およびシャフト回転角度制御の精度に関わる要求仕様を緩和している。耐熱性スプリングは、高温域での「へたり」を考慮し、インコネル系を採用した。この結果、過酷な熱サイクル・振動環境下でも遮断時の漏れ流量を5L/min以下に抑制することに成功した。



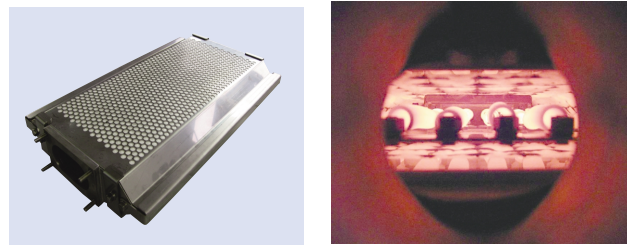
999

図6 遮断弁

この基本技術は、韓国メーカーの製品に採用されている。

(4) フィルタユニット

フィルタには、排ガス流入時は通気性と微粒子捕集性能が、排ガス遮断時には高い断熱性が、それぞれ要求される。フィルタ材には熱容量が小さく、断熱性にすぐれたシート状の無機繊維フィルタを採用した。フィルタユニットは、生産性を勘案して、電気ヒータを固定した軽量の金属フレームに、金属製カパーにはめ込んだシート状のフィルタ材を取り付ける形とした。外観を図7(a)に示す。フィルタ材の端部に適切な圧縮力が加わるような構造になっており、50kPaの圧力差でもフィルタ材端部からの微粒子漏出を抑制することができる。



(a) 外観

999

(b) 内部

999

図7 フィルタユニット

内部に組み込む電気ヒータは耐熱性と機械的強度を考慮して鉄クロム系の電熱線を採用した。電熱線の合成抵抗は約0.7 であり、代表的な電流・瞬時電力はそれぞれ約35A、約900Wである。抵抗値が比較的小さく、また比較的大きな電流を流すため、酸化雰囲気でも接触抵抗が変化しないように電熱線の端末処理を行った。また、電熱線が振動や熱膨張によってフィルタ材を損傷しないように電熱線の形状、固定方法を工夫した。電熱線の絶縁固定にはセラミック碍子を採用した。フィルタ内部温度は700 以上に達し、セラミック碍子には大きな熱応力が繰り返し印加されるため、碍子形状と取り付け方法にも工夫を施した。

周囲温度25 で、フィルタユニットの電気ヒータに約35Aの電流を流すと、フィルタユニット内部は2分以内で700 以上に加熱できた。加熱10分後の内部温度は約

900であった。加熱時のフィルタユニット内部を排ガス流入口から観察した例を図7(b)に示す。実際の運用では、酸素供給速度を考慮して加熱時間は最長10分とし、また、排ガス温度とバッテリー電圧をもとに内部温度が1000を超えないようにDPFコントローラで加熱エネルギーを制御している。フィルタユニット単体について、振動環境下で加熱・急冷操作を繰り返す試験を行った結果、耐久性能は良好であった。このフィルタユニットに関する基本技術も、韓国メーカーの製品に採用されている。

(5) その他

モータはフィルタ本体に簡単な方法でコンパクトに取り付けられる必要があり、また電気ヒータ系統への給電には樹脂製コネクタを使って安価にハンドリング性を高める必要がある。一方、排ガス温度は500を超えることがあり、フィルタ本体は、外面の素材であるステンレスが茶色に変色するくらい高温になることも珍しくない。このため、モータとフィルタ本体の熱絶縁技術、高温排ガスを漏出せずに遮断弁制御用シャフトとモータ出力軸を連結する技術、樹脂製コネクタとフィルタ本体の熱絶縁技術なども開発した。これらの技術も、韓国メーカーの製品に採用されている。

5. 走行耐久性能

韓国メーカーと共同で実路8万kmの走行耐久試験を実施した(図8)。開発した電気ヒータ再生式DPFを排気量6600cc(ターボエンジン)のディーゼル・トラックに装着し、周回約490kmのコースを1日に1周乃至2周した。周回あたりの平均車速は約45km/h(最高85km/h)、平均排ガス温度は約140(最高温度200)であった。横軸に走行距離をとり、縦軸に周回あたりのDPFの圧力損失と消費電力の平均値をプロットしたものを図9に示す。平均圧力損失は約5kPaで安定しており、平均消費電力も200W程度以下で推移している。走行試験中、DPFシステムにトラブルはなく、メンテナンスは実施していな

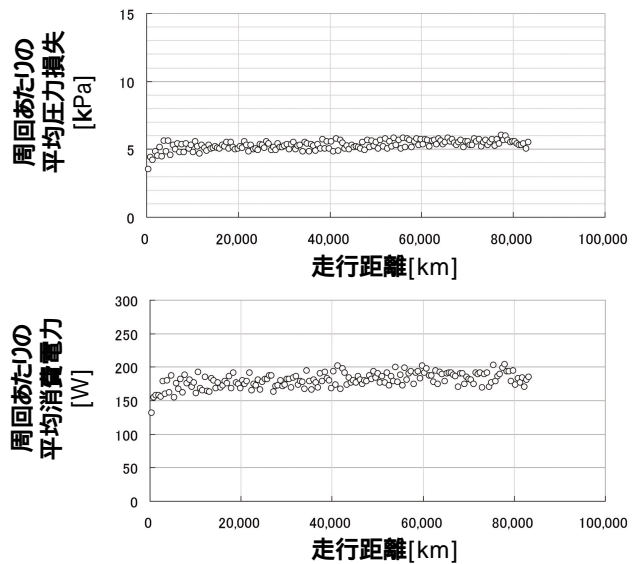


図9 走行耐久試験結果

い。走行耐久試験前と試験後の微粒子除去率はそれぞれ約85%、約87%であり、微粒子除去性能に劣化はなかった。走行耐久試験終了後の解体調査でも内部に異常・損傷はなく、良好な耐久性能を有することを実証した。

6. まとめ

車両用バッテリー・オルタネータで運用可能な車載用電気ヒータ再生式DPFの基本技術を開発し、実車・実路耐久試験により、良好な浄化性能と耐久性能を有することを実証した。

従来の技術はフィルタの再生処理に貴金属触媒を積極的に活用しているが、燃料中の硫黄分は貴金属触媒の被毒物質であり、貴金属触媒の性能を著しく劣化させる。このため、低硫黄燃料の普及に時間を要する国々への適用には触媒劣化という問題を抱えている。一方、当社の技術は、フィルタの再生処理を電気ヒータのみで実現しており、貴金属触媒を原理的に必要としないため、燃料中の硫黄分による触媒劣化問題を回避しやすいという利点を有している。微粒子中の油分の処理方法や、硫黄分が電気系統に与える影響の検証といった課題はあるが、従来の技術とは異なるアプローチが可能であり、低硫黄燃料の普及に時間がかかる国々の大気汚染対策技術としてユニークなポテンシャルを有すると考えている。

図8 走行耐久試験車両に装着された電気ヒータ再生式DPFシステム

7. 謝辞

本稿の技術開発と製品化には、多くの方々の協力を必要とした。本稿執筆にあたり、労苦と喜びを分かち合った多くの方々との共著としたかったが、著者名だけで相当の紙面を割くことになるため、本技術に企画・開発段階から携わった2名が代表として執筆する形とした。末文ながら、本稿に記載の技術開発と製品化にご協力いただいたの方々にはあらためて心より謝意を申し上げたい。

執筆者紹介



内藤健太 Kenta Naito
新エネルギー・環境事業本部
新エネルギー事業推進部
車載機器部 次長



千林 暁 Satoru Sembayashi
新エネルギー・環境事業本部
新エネルギー事業推進部
車載機器部 主任