ディーゼルエンジンの簡易再生式 PM 除去装置の研究*

吉川 英夫^{*1}, 村上 貞幸^{*2}, 竹内 生公^{*3}Diesel Engine with PM Removal Equipment
with Quick Regeneration

Hideo YOSHIKAWA, Sadayuki MURAKAMI and Seikou TAKEUCHI

The most important issue concerning diesel engines is to remove PM in exhaust gas of a diesel engine and to regenerate PM from trapped components. In this paper we demonstrate that PM removal equipment which consists of negative and positive nets charged from negative and positive poles of a DC-converter is able to collect PM using low voltages. The test results show that low-voltage electrical collection was superior in physical collection compared to using just a filter, with regard to the collective and regenerative efficiency. The best regeneration procedure was the liquid detergent method rather than the use of compressed air and burnout to CO₂ by an electrical heater.

Key Words: Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Particulate Matter, PM, Regeneration, PM Removal Equipment, Soot

1. ま え が き

現在, ディーゼルエンジンの排気中の PM (Particulate Matter, すす, 灰分およびその他の燃焼生成物の浮遊微粒子) 濃度を極力低減し, そしてその捕集 PM を簡易にしかも比較的短時間で再生することは大気汚染防止の観点から極めて重要なことである。

従来, 多くの研究者によって, PM 除去の研究が行われ, そのおもなものはウォール式セラミックモノリス形および 6.6 kV 以上の直流電源を用いるコロナ放電形などである。

前者は捕集 PM の再生に, 別置のクリーン燃料と空気による燃焼装置で作られる高温ガス⁽¹⁾ またセラミックウォールに挿入設置された電熱器などで PM を焼却し⁽²⁾ CO₂ に変換し除去する再生装置を必要とする。これらの方法は再生操作, エンジンの負荷変動および起動のとき, セラミックに熱ひずみによる熱応力の繰返しを与えるため破壊するので, 使用寿命の短いことおよび信頼性に問題があった⁽⁹⁾。

後者は高圧電源を必要とすること, 捕集 PM について, 前項同様の焼却の必要性および防災の問題があって, 移動用車両に用いるのに問題を残している。

一方, 低電圧を用いて排気すすを捕集することは吉川・張・上原により報告⁽⁴⁾ されているが, その再生は電源を切って衝撃を外部から加えるもので, 確実な再生方法による長期運転の可能性を実証していなかった。

本研究は約 100 V 以下の直流電源の負極および正極に接続した 2 組の特殊ステンレス金網を用いて電氣的に PM を捕集し, その PM を圧縮空気または洗浄液によって簡易に再生して, 長期間運転可能であることを試験により明らかにした。

その結果によると, エンジンの排気背圧をウォール式セラミックモノリス形の場合より低い範囲で運転し, 低電圧 PM 除去装置が捕集および再生において実用化の可能性のあることを実証した。また, 本装置に用いる特殊ステンレス金網(以下 SS ネットという)はエンジンの急速負荷変動または起動・停止のときでも, ネット自身の自己変形により熱応力および熱変形を吸収する構造にできるので, セラミックフィルタのようにクラックおよび破壊を発生させないことである。

本装置について, 試験により次の諸利点が得られたので, 以下にその内容を報告する。

* 原稿受付 1995 年 6 月 20 日。

^{*1} 正員, 千葉工業大学 (〒275 習志野市津田沼 2-17-1)。^{*2} 学生員, 千葉工業大学大学院。^{*3} 正員, 茨城職業能開短期大学校 (〒310 水戸市水府町 864)。

(1) PM は電氣的に SS ネットに捕集されるので、約 24~60 V 程度でも除去率が比較的高く、また、再生には電源を切って、圧縮空気または洗浄液を用いると容器外から簡易に再生できた。特に、この方式は所要時間 2 min 程度でほぼ完全に再生し、その直後起動もでき、長期間使用できた。

(2) 簡易再生式低電圧 PM 除去装置は SS ネットを用いるため、排気の通気による圧力損失が従来のセラミック形に比較して少なくでき、エンジンの背圧を増加させないので、燃料消費率の増加を抑制できた。

(3) 洗浄液方式は PM を洗い落として飛散させないで集中的に処理できるので、圧縮空気方式より優れていた。

2. 試験装置および方法

PM 除去装置は図 1 に示すように、直流電源とその負極側に接続された 40 メッシュの SS ネット 2 枚と正極側に接続された 80 メッシュ 1 枚を 1 セットにしたものおよび 40 メッシュの SS ネット 2 枚の負極ネットと 32×170 メッシュの骨織り 1 枚とを 1 セットにしたものの 2 セットからなる。またそれぞれの SS ネットは耐熱性電気絶縁物により分離され、負および正極ネットのほぼ中央に圧縮空気の注入口および洗浄液

注入口を設け、下側にそれぞれ吐出し口を設置してある。装置入口管には排気温度を低下させる冷却フィンを設けて、排気温度を低下させ電気絶縁物の性能を確保した。

本試験では図 2 に示すように正極側 SS ネットの前端に 80 メッシュ SS ネットを、後段により通気面積の狭い 32×170 メッシュ骨織り SS ネットを用いた。また、負極側 SS ネットは 40 メッシュ SS ネットを用いた。供試エンジンは 199 ml、四サイクル空冷単筒ディーゼルエンジン発電機で、出力 1.7 W (3 000 rpm) である。

本装置の PM 捕集原理は図 1 に示す電氣的中性 PM (記号○印) が負極ネットを通過したとき負帯電 PM (記号⊗印) になって、下流の正極ネットに電氣的に吸着捕集される。そして、上流前段のセットで捕集されなかった PM は後段のセットで捕集される。

本試験の PM 濃度はボッシュ式汚染度計 (SOK-KEN MODEL GSM 3) を用いて計測した。

正極側ネットに捕集された PM は運転時間とともに蓄積されて、排気の通気性の低下とともにエンジンの燃料消費率が増加し、ついに停止してしまった。そこで本試験では燃料消費率を考慮して排気背圧約 6.1 kPa になったところで再生することにした。

再生方法はエンジンを停止し、低電圧すす除去装置の電源を切って、図 1 に示す負と正極ネットのほぼ中央上部の再生ノズルより、約 0.65 MPa の圧縮空気または 0.25 MPa の洗浄液約 2.0 l/min を注入口に取付けたノズルより SS ネットに噴射し、捕集 PM を下部吐出し口より装置外部に取り出した。圧縮空気の場合は吐出し口にやや真空圧の掃除機を取付け捕集した。再生は 12 回繰返し、捕集と再生間隔についてまとめた。また、試験は再生間隔と排気背圧および燃料消費率の関係について行った。

試験方法は次の要領で行った。

- (1) 負および正極ネットを 2 セットまたは 4 セットにしたときの PM 捕集とエンジン性能への影響。
- (2) 電氣的と物理的捕集 (フィルタ作用) の比較。
- (3) 圧縮空気と洗浄液による捕集 PM の再生。
- (4) 捕集 PM に含まれる SOF (Soluble Organic Fraction, 可溶性有機成分) の割合。

3. 試験結果

3.1 低電圧 PM 除去の特性 本項は低電圧による電氣的捕集と電圧を 0 V にしたフィルタの目づまりを利用して捕集する物理的捕集について、エンジンの排気背圧を極力等しくなる範囲で比較した。

Fig. 1 PM removal equipment

Fig. 2 SS net arrangement sketch (×100)

図3は外径160、厚さ20mmの電氣的絶縁物からなる容器に、負極ネットにSSネット40メッシュ2枚と正極ネットに1枚を前段セットにし、後段セットは負極ネットに40メッシュ2枚と32×170メッシュ畳織り1枚とし、印加電圧を12～150Vに変化させて、PM除去効率と経過時間を物理的捕集と比較した。試験の電流は約0.1mA以下であった。

ここで用いたPM除去効率はPM除去装置入口と出口の汚染度の差を入口汚染度で除したものである。なお、低電圧による電氣的捕集は12V以上で運転したもので、0Vで運転しないようにした。また、参考のため、後段セットを三段とし、計四段のもののPM除去効率は150Vと48Vを代表例として示した。再生は両捕集方法とも、圧縮空気を各段に2min噴射する方法で行った。他方、物理的に捕集したPMはフィルタに目づまりしたため、再生により十分取り除けず、その効率が次第に低下した。

負と正極ネットを2から4セットにすると、PM除去効率は約30%増加する。しかし、再生開始排気圧は両者を等しく設定したので、SSネットの流体抵抗増加により再生間隔は短縮する結果になった。

物理的捕集は時間経過とPM除去効率の関係からみると凹形になるのに、電氣的捕集は凸形になり、両者の原理が基本的に異なることを示唆している。また、前者は数回の再生後本装置を分解掃除をしないと、再生の効果が極めて低くなることを示した。

図4は再生前、再生2回めの測定開始時の0V～150Vまでの値を図3より代表として取り出したもので、PM除去効率は48Vまで、ほぼ線形に増加したがそれ以上の電圧を印加しても効率増加は次第に減少

Fig. 3 PM reduction efficiency dependent on operation time

し、一定の値に達するような傾向を示した。

3・2 PM除去効率と排気背圧および燃料消費率

PM除去装置を設置すると、次第に正極側SSネットにPMが付着して通気面積を狭めるため、排気背圧を上昇させて、PM濃度も増加した。図5はPM除去効率を横軸にエンジンの排気背圧、装置入口と出口のPM濃度および燃料消費率を縦軸に示した。また、本図より、装置入口の圧力が約6.1kPaに到達するまでの装置入口と出口のPM濃度の変化を示した。

本試験は負極に40メッシュ2枚を用い、正極ネットに80メッシュを2セットおよび4セットならびに負極に40メッシュ2枚と80メッシュより排気通気空間のより狭い32×170メッシュ畳織りを1枚の4セットについて行った。また、排気背圧は装置入口において最大約6.1kPaまでとしたが、32×170メッシュについては約7.8kPaまで運転したときのPM除去効率と燃料消費率も示した。本試験結果より、負および

Fig. 4 Relation between voltage and PM removal efficiency

Fig. 5 Pressure at the inlet of equipment and specific fuel consumption dependent on PM removal efficiency

正極ネットのセットの増加は PM 除去効率を増加させるが、燃料消費率も増加させる結果になった。

図 6 は空間速度 SV [h^{-1}] と PM 除去効率およびエンジンの背圧の関係を示した。ここで SV 値は負および正極側 SS ネットを流れる流速 (h^{-1}) をその容積 (1) で除したものである。流速の変化は図 1 の容器の外径を 105 mm ($t=25$) および 85 ($t=20$) mm のものを用いた。PM 除去装置入口温度は $230 \pm 10^\circ\text{C}$ 、同出口温度は $140 \pm 15^\circ\text{C}$ である。本試験に使用したものは図 5

Fig. 6 PM removal & pressure at outlet of equipment dependent on SV

のように正極側ネットに 80 メッシュを用いたもの 2 セットおよび 4 セットである。

本図より、SV 値の増加にしたがって、PM 除去効率は低下し、装置入口の圧力も増加する。また、再生直後すなわち比較的極側ネットが汚れていないときと、約 6 h エンジン運転後の正極ネットに PM の付着したときの様子 ($\uparrow \downarrow$) が示されている。

3.3 捕集 PM の再生 図 7 は PM 除去装置を分解しないで、外部から 1~2 min 以内で圧縮空気と市販の約 75°C で 30~35 Vol% 留出量の揮発性洗浄液を用いて捕集 PM を除去し、12 回にわたって経過時間および再生回数と PM 除去効率の関係を示した。本試験結果より、装置入口圧力約 6.1 kPa を再生開始にすると、圧縮空気の再生は 2, 3 回後次第に再生間隔を短縮させた。しかし、洗浄液の再生は 12 回後も再生間隔を短縮させず安定していた。物理的捕集の場合の洗浄液による再生は図 7 に示すように PM 除去効率および再生間隔において電氣的捕集の場合より低い性能を示した。本再生に要する設備は 3 l の洗浄液貯槽と最大流量 2.9 l/min のポンプであった。洗浄液による再生は電氣的捕集のときほぼ完全に PM を負極および正極ネットより洗い落とし、ほぼ初期の状態に復していることを示していた。

図 8 は物理的捕集と電氣的捕集 (48 V) のときの再生前後で、本装置を分解したときの前段 (80 メッシュ正極側ネット) の PM 付着状況の写真を示す。

Fig. 7 PM removal efficiency dependent on time with regeneration

図9は洗浄前後の捕集 PM を比較して示した。洗浄液中の PM は約 3 h で沈殿分離できた。上澄みの洗浄液は再使用し、沈殿した PM は廃棄した。

3・4 捕集 PM に含まれる SOF 一般にディーゼルエンジンの排年 PM には SOF と固形炭素(すす)を含んでいて、SOF の検討が問題にされる。そこで、供試エンジンからの排気 PM のうち、本装置の正極側ネットで捕集された PM を調査した。採取 PM は電気炉に入れて密閉加熱し、CO₂ および CO へ転換した量ならびに SOF の残留率をソックス抽出法によりジクロロメタン溶液で溶解し、残存の固形炭素の質量をひょう量した。

Fig. 8 Picture of positive SS net at the before and after regeneration

Fig. 9 Waste PM washed out by regeneration

Fig. 10 SOF residual rate and CO and CO₂ yield

図10は電気炉内の PM の温度と SOF の減少量および CO₂ と CO の発生濃度をガスクロマトグラフにより計測してまとめて示した。本試験結果より、約 200°C 以上で、SOF は CO₂ と CO に変換して減少した。したがって、装置入口温度が約 230°C であったので捕集 PM は SOF を含んでいることになる。

4. 考 察

4・1 捕集方法 本試験は燃料消費率の増加を極力抑制することをおもな目標とした。したがって、正極ネットに運転時間の経過により、PM が蓄積したときでも、エンジン背圧 6.1 ± 0.5 kPa でエンジンを止めて再生した。

以上の条件で図11に示す物理的と電気的捕集とを考察すると、前者はフィルタの網の目すなわち通気面積にちょうどくいこむ PM を捕集するが、より小さいものは通過する。また、網の目の形状と合致しないで、SS ネットの網線上に阻止された PM は流れの渦や局部的圧力差による移動、後続の一部の PM の衝突による網の目からの押出しなどで排気背圧と装置出口の PM 濃度を増加させるのみで PM 除去効率の向上に寄与しないと考えた。後者は SS ネットの網線上および図11中 A 部に示すように網の目の通路においても電気的に通気面積より細かい負帯電微粒子を付着捕捉するが、後続の一部の PM の衝突による網の目からの押出しなどで時間経過によって PM が蓄積することなく図5に示すように装置出口の PM をやや増加させた。しかし、捕集 PM の蓄積は図8に示すとおりであった。以上より、本装置出口 PM 濃度の低いことが物理的捕集に比較してよい PM 除去効率になったものと考えた。このような現象は SS ネットを用いたためにおきたもので、今後、PM 除去効率の改善は SS ネットの代替品を開発することになる。

電熱再生式セラミックフィルタは PM 付着による燃料消費率の増加の上限を約 2.9% としていたので⁽⁵⁾、

Fig. 11 Explanation of PM collection pattern

これに相当する圧力損失の増加を図6のように約5.0 kPaで再生した。

現在、ディーゼルエンジンのPMによる大気汚染抑制の第1候補のウォール式モノリスセラミックフィルタの圧力損失が10~30 kPaで⁽⁵⁾、低電圧PM除去装置の圧力損失は5.0 kPaであるため排気背圧は低く、燃料消費率も低下したものと考える。

4.2 捕集 PM の処理 圧縮空気による再生方法は注入空気の排気管への散逸およびPMに含まれる油分などにより時間経過にしたがって汚れが落ちにくくなったことによる回復率低下と推定される。また、再生操作の場合も、図7および図8から、物理的より電氣的捕集が優れていたことになる。なお、本試験で用いた直流電源の電圧は12~150 Vであったが、図3の結果より、PM除去効率の面からは48 V程度でよく、所用電流は0.1 mA以下であるから消費電力量も少なく、自動車用バッテリーが使用できた。また、再生時間を2 minより短縮することは可能である。

正極ネットはセラミックと異なり耐熱性金属金網であるから、自己変形による熱応力およびPM付着のときの排気の風圧に十分耐えるように設計できる。

電氣的絶縁は使用電圧100 V以下であること、排気温度を冷却フィンで約200°C以下に抑制することにより、安定して長期間使用できた。現在火力発電所で用いられている高電圧を用いる装置よりも極めて低い電圧を用いるので、本装置は高温雰囲気における電氣絶縁の高い信頼性、取扱いの簡易さおよび火災発生の問題も極めて少ないと考える。

本研究による装置は燃料消費率の増加抑制ならびに簡易で確実な再生および比較的高いPM除去効率などの特徴をもつものであると考える。

表1はPM除去装置で捕集したPMの物質収支をボッシュ汚染度計によるものと質量計測によるものとを概括的に比較考察した。本試験は排気管系に外径160 mmの容器にCF(Carbon fiber felt)を充てんし、PMをトラップするPM捕集装置を本装置の下流に設けて③におけるPM濃度をボッシュ汚染度計で0%にし運転した。そして、PMの質量は運転後CFとPMの合計質量を精密質量計で計測し、運転前のCF質量との差から求めた。その結果によると、①と②のPM除去効率はボッシュ汚染度計による濃度と質量計測により求めたものと約6%の差となって比較的良好一致を示した。以上より、本試験のボッシュ表示を基にしたPM除去効率は実用化の目途になると考える。

4.3 総合的検討 従来から研究されている高温

Table 1 Mass balance of PM removal equipment

Test pattern
Bosh carbon concentration (typical)	%	29.1 ± 6.5	21.4 ± 3.8	0
PM removal rate on Bosh	%	26.3 ± 6.1	100	
PM mass in PM removal eq.	g/h	1.50 (± 0.1) + 1.36 (± 0.54) (Attached wall)		
PM mass in PM capture eq.	g/h	—	3.77 ± 0.33	
PM removal rate by test	%	22.7 ± 5.3	—	

Note. Average values in 5 tests Test condition : 1.7kW, 3000rpm

ガスや電氣ヒータでPMをCO₂に変換する方法や高電圧を用いた放電法でPMを焼却する方法は優れていると考えるが、その目的を達成するため追加の燃焼装置、燃料貯槽および空燃比を調節する空気貯蔵または送風機、比較的大容量のヒータ電源、あるいは放電用電源を必要とする。

本装置の再生洗浄液ポンプは0.2 kWで自動車用バッテリーでまかなえた。したがって、設備費、設置スペースおよび運転費を考慮すると、本装置がより経済的と考える。また、従来の再生方法は完全性およびモノリスセラミックスへの影響、ならびに保安装置について装置容量と運転費に支配されることを考慮すると、簡易な本装置は実用化の可能性があると考える。

5. ま と め

以上より、今後排気雰囲気約250°C以上で約48 Vの電圧で、約0.1 mA以下の電氣絶縁物の開発ができるならば、正極ネットで捕集保持している間に図10に示すようにSOFを低減することも可能になる。また、再生に洗浄液を用いる簡易再生PM除去装置は装置の容量、燃料消費率および再生頻度を考慮すると実用化の可能性も考えられる。

文 献

- (1) Kobayashi, K., Hayashi, K., Aoki, H., Kurazono, K. and Fujimoto, M., *SAE Paper*, No. 930365 (1993), 163-173.
- (2) Kojetin, P., Janezich, F., Sura, L. and Tuna, D., *SAE Paper*, No. 930129 (1993), 45-56.
- (3) Wade, W. R., White, J. E. and Florek, J. J., *SAE Paper*, No. 810118 (1991), 327-348.
- (4) 吉川英夫・張軍・上原哲也, 機論, 58-551, B (1992), 2321-2324.
- (5) Daly, D. T., Mokinnon, D. L., Martin, J. R. and Pavlich, D. A., *SAE Paper*, No. 930131 (1993), 71-78.