

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560216

研究課題名(和文)ディーゼル機関の排気流路における炭素状微粒子の壁面付着および離脱機構の解明

研究課題名(英文)PM deposit layer formation and its broken away on a exhaust line surface of diesel engine

研究代表者

新井 雅隆 (ARAI, Masataka)

群馬大学・理工学研究院・教授

研究者番号：80112176

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：ディーゼル機関では、吸気に排ガスを混入させることにより吸気の酸素濃度を下げ、それによりNOxの生成を抑制させる方策が取られている。この場合に炭素状微粒子(PM)を含む排ガスを吸気側に循環させるため、循環ラインの内壁にPMが付着して、所定の性能が得られない場合がある。とくにラインの途中に設置されるEGRクーラではこのPMの堆積による性能劣化が著しく、これを抑制することが急務になっている。

ここでは試験用のEGRクーラのラインをつくり、PMの堆積層の成長と離脱のメカニズムを調べた。その結果、排ガス中の水分が冷却により凝縮水となり、これが堆積層の離脱を促進していることを明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：EGR combustion is one of the promising ways for NOx reduction in a diesel engine. Since PM and condensable hydrocarbons are contained in the diesel exhaust, they cause PM deposition in an EGR cooler. To improve performance of EGR cooler, the PM deposits should be reduced because the heat transfer performance is deteriorated by the deposits layer. In this study, effects of wall temperature and exhaust gas inlet condition on PM deposition in an experimental EGR cooler were investigated.

The thickness of PM deposit in the upstream region of EGR cooler was thicker than that in the downstream region. In addition, the thickness of PM deposit in low flow rate condition of the exhaust gas was thicker than that in high flow rate condition. Also, PM deposit layers were separated from the wall in the case of lower wall temperature. The separation was probably caused by condensation water in the exhaust gas.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：輸送機器 熱工学 大気汚染・防止 エネルギー効率化 可視化 EGRクーラ 堆積物 炭素状微粒子

1. 研究開始当初の背景

ディーゼル機関からの NO_x の排出を抑制する方策として、排ガスを吸気側に還流させて吸気の酸素濃度を下げて、NO_x の生成を抑制することが行われている。しかし吸気の充填効率を高く維持したまま排気を還流させるためには高温の排気ガスを冷却する必要があり、その役目を果たす熱交換器を EGR クーラと称している。

排ガス中には Soot を主成分とする PM が含まれているため、高い熱交換性能を維持するためにはこの PM の EGR クーラ内での堆積を避けなければならない。ここではこの問題を、PM の堆積と離脱の挙動を解析することで明らかにしようとした。

さらに EGR クーラの堆積物が機関性能の悪化をもたらしている場合には、その堆積物を強制的に排除することを考えなければならない。この意味では堆積物を離脱させる機関の作動条件を見出すことが、実機関の開発においては極めて重要になる。

2. 研究の目的

ディーゼル機関の低 NO_x 化に不可欠なワールド EGR で問題となるのは、排ガス中の PM が EGR クーラの伝熱壁面に堆積することで EGR クーラの冷却能力の低下や通気抵抗の増加が引き起こされることである。これらは伝熱面に PM が徐々に堆積していくことで EGR ガスと冷却水（クーラント）間の熱抵抗が増加することが原因であり、EGR クーラ内への PM 堆積を抑制するためには、PM の堆積挙動の把握が重要となる。

そこで本研究では、PM 堆積層の厚さの計測が容易な単純な構造の試験用 EGR クーラを用いて、PM 堆積層の厚さの経時変化を調査するとともに、EGR クーラの熱交換壁面と排ガス入口条件が PM 堆積層の厚さに及ぼす影響を考察した。

3. 研究の方法

実験装置の概略図を図 1 に示す。実験装置は、試験用 EGR クーラ、試験用 EGR クーラに排ガスを供給するディーゼルエンジン、および試験用の排ガスラインから構成されている。試験用 EGR クーラの冷却壁面の温度は流入する冷却水の温度を変えることにより設定する。また、試験用 EGR クーラに流入する排ガスの流量は試験用 EGR クーラ上流とバイパスライン上流にある二つのバルブの開度を調節することにより設定した。流入する排ガスの温度はディーゼルエンジンと試験用 EGR クーラをつなぐ排ガスラインの温度管理のための冷却空気の送風量と、排ガスラインに巻かれた断熱材の量を調節することで制御した。

本研究で用いた試験用 EGR クーラは排ガス流路の断面が 32mm × 32mm × の矩形であり、全長が 300mm である。排ガス流路の一面には 32mm × 220mm の可視化用の窓を設けた。

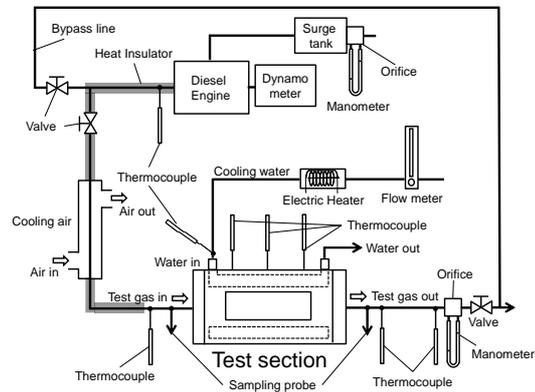


図 1 実験装置のレイアウト

試験用 EGR クーラ内の PM 堆積層厚さの計測方法を図 2 に示す。堆積層の厚さは可視化窓よりレーザ変位計 (Keyence 製 LK-G80) を用いて上流側から下流側までを 5mm 間隔で計測した。ここで粉体層である堆積層の表面の位置をレーザ変位計で計測可能であるか否かについては、3 次元的な画像処理の可能な光学顕微鏡での観察結果と相互比較を行い、レーザ変位計で計測可能なことを確認している。また、計測前に測定可能範囲の両端の PM を削り、試験用 EGR クーラの冷却壁面上を基準とし、基準からの変位量を堆積層の厚さとした。計測は試験用 EGR クーラへ排ガスを 1 時間 (1h) 流入させる度に行い、これを 7 時間 (7h) まで繰り返した。

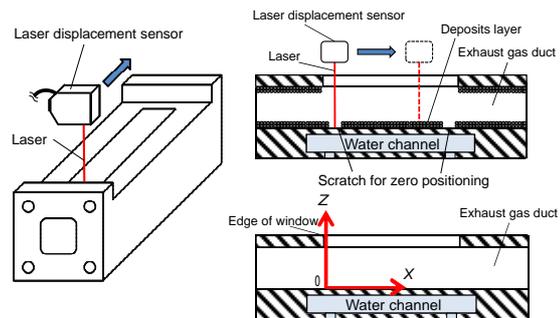


図 2 堆積層の厚さの計測手法

実験条件はエンジンの運転条件が一定 (空気過剰率 = 1.8, 機関回転数 $n_e = 1040 \pm 30$ rpm) で、試験用 EGR クーラへの冷却水の温度 T_w が 80、排ガス流量 G_{exh} が 0.2kg/min、試験用 EGR クーラ入口の排ガス温度 T_{ei} が 250 (レイノルズ数 3700 程度) とした。これは実機の低負荷での運転中の EGR クーラの作動状態に近い条件であり、これを基準とし、冷却水温度 T_w 、排ガス流量 G_{exh} 、入口排ガス温度 T_{ei} をそれぞれ変更し実験を行った。さらに流量については実機の EGR クーラとレイノルズ数が等しくなるように設定した。また、基準条件において試験用 EGR クーラへ排ガスを連続的に 3h, 5h または 7h 流通させた後に計測を行い、1h 毎に断続的に流入させた場合との PM 堆積層厚さの違いについて調査した。なお、実験条件によっては試験用 EGR クー

ラの排ガス流路内に凝縮水が多量に発生し、堆積試験直後では凝縮水が安定せず厚さの計測が困難な場合があった。そこで本研究では特に断りがない場合を除き、堆積試験が終了し100分が経過した時点($t_c=100\text{min}$)で堆積層がある程度乾燥して安定した状態での計測結果を用いデータの比較および考察を行うこととした。なおこの時点では凝縮水が残存していないことを確認している。

4. 研究成果

(1) 冷却壁面温度がPM堆積層の厚さに及ぼす影響

EGRクーラの冷却壁面の温度がPM堆積層の厚さに及ぼす影響を調査するため、冷却水の温度 T_w を80, 40, 15とし実験を行った。ここで、 $T_w = 80$ は実機の運転条件に近い温度、 $T_w = 40$ は流入する排ガスの露点付近の温度、 $T_w = 15$ は排ガスの露点より低い温度に対応している。

$T_w = 80$ と $T_w = 40$ の条件における実験結果を、図3の(a)と(b)に示す。図3は横軸を試験用EGRクーラの計測可能範囲における最上流地点からの距離とするPM堆積層の流れ方向の厚さ分布となっている。ここで、原点($X = 0\text{ mm}$)と測定可能範囲の最下流($X = 220\text{ mm}$)付近の計測値がないのは、基準点を求める都合上、冷却壁面を露出させるため堆積層を削り取ったためである。

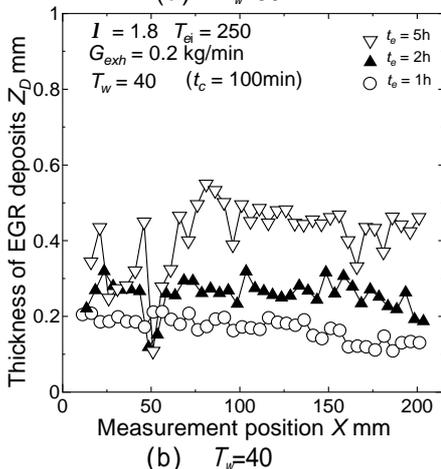
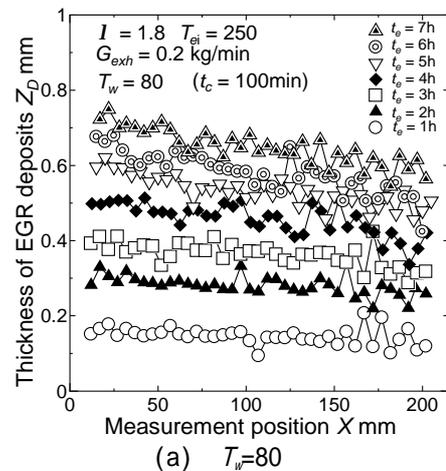


図3 伝熱面上の堆積層厚さの分布

まず、 $T_w = 80$ (図3(a))の場合、排ガス流通時間が経過するとともに堆積層が厚くなることわかる。また、試験用EGRクーラの上流側の堆積層は下流側より厚く、EGRクーラ上流側でPMが堆積しやすいことがわかる。一方、 $T_w = 40$ (図3(b))の場合、排ガスの流通2h以降で堆積層が他の部分より極端に薄くなっている箇所($X=50\text{ mm}$ 付近)があることがわかる。堆積層が薄くなっている箇所では、堆積層の剥離のスポット状の跡が目視でも確認されており、この位置で堆積層の剥離が生じたと考えられる。

図4に $T_w = 80$ と $T_w = 15$ の条件における堆積層厚さの経時変化を比較したグラフを示す。図4の縦軸は試験用EGRクーラの計測可能範囲における堆積層厚さの平均値であり横軸は排ガス流通時間を表している。図4より、 $T_w = 80$ の場合では流通時間の経過とともに堆積層の厚みが増加しているのに対し、 $T_w = 15$ の場合では排ガス流通3hでは厚さが減少し、それ以降では堆積層厚さが0.1mm程度に落ち着くことがわかる。

試験用EGRクーラへ流入する冷却水の温度が排ガスの露点以下の場合では、PM堆積層の内部に凝縮水が発生することが確認されている。このことより、 $T_w = 40$ と $T_w = 15$ の条件で見られた堆積層の剥離やPMの堆積抑制は、冷却壁面と堆積層の間、もしくは堆積層の内部に凝縮水が膜状にたまることで堆積層の表面が持ち上げられ、吹き飛びやすくなったことが原因だと考えられる。また、 $T_w = 15$ の条件では、凝縮水により堆積層が流路の下流方向へ洗い流されたと思われる跡が確認されている。従って、凝縮水が排ガスの流れで移動することで、周辺の堆積層を洗い流しているとも考えられる。

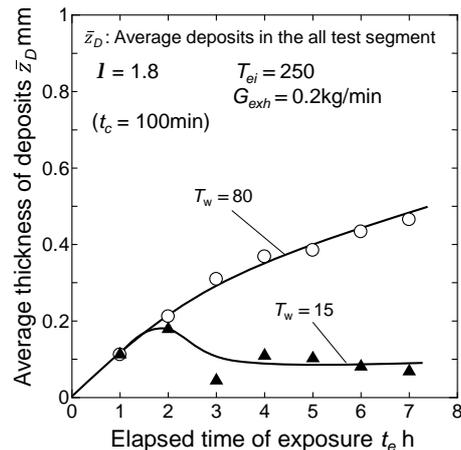


図4 伝熱面温度が堆積層の厚さに及ぼす影響

(2) 排ガスの流量がPM堆積層の厚さに及ぼす影響

排ガスの流量がPM堆積層の厚さに及ぼす影響について調査するため、試験用EGRクーラに流入する排ガスの流量 G_{exh} を0.2kg/minまたは0.1kg/minとし実験を行った。実験結

果を図5に示す．図5の横軸は試験用EGRクーラを通過した排ガスの積算質量であり，縦軸は試験用EGRクーラの計測可能範囲における堆積層の厚さの平均値を表している．図5より，試験用EGRクーラを通過した排ガスの積算質量が同じとき，堆積層は排ガス流量の多い方が薄いことがわかる．これは，排ガス流量が多く排ガス流速が速い方が試験用EGRクーラ内での排ガスの滞留時間が短く，PMが堆積しにくかったためだと考えられる．

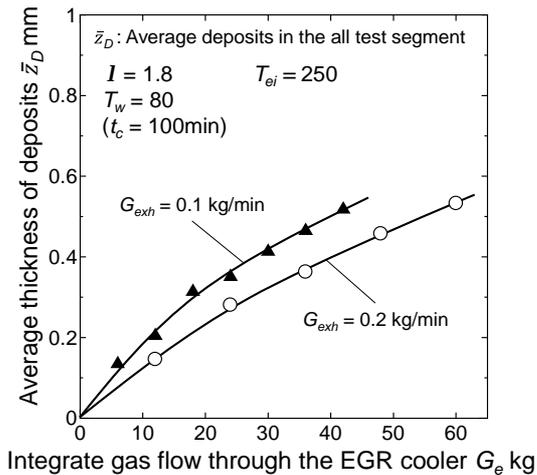


図5 EGRクーラ内の排ガス流量が堆積層厚さに及ぼす影響

(3) 排ガスの温度がPM堆積層の厚さに及ぼす影響

EGRクーラへ流入する排ガスの温度がPM堆積層の厚さに及ぼす影響について調査するために試験用EGRクーラの入口における排ガスの温度 T_{ei} を250と300とし実験を行った．実験結果を図6に示す．図6の縦軸は試験用EGRクーラの計測可能範囲における堆積層厚さの平均値であり，横軸は排ガス流通時間を表す．図6より，排ガス温度250と300の条件ではPM堆積層の厚さに差がないことがわかった．

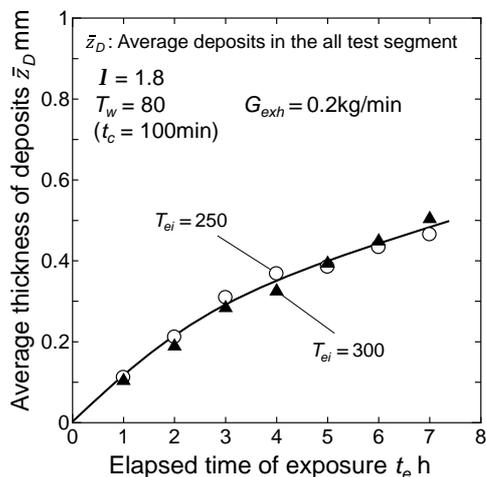


図6 排ガス温度が堆積層の厚さに及ぼす影響

(4) 排ガスの断続および連続流通がPM堆積層の厚さに及ぼす影響

排ガスの断続および連続流通がPM堆積層の厚さに及ぼす影響を調査するため，試験用EGRクーラへ排ガスを連続的に3h,5hまたは7h流通させた後に計測を行った場合と，1h毎に断続的に流通させ，これを7hまでくりかえした場合のPM堆積層の厚さを比較した．断続的に行う実験では1時間毎に2時間ないし3時間の休止時間があり，休止期間においてEGRクーラが冷却されることが連続運転の場合との相違である．図7に実験結果を示す．図7より，堆積層の厚さは排ガスの総流通時間が同じでも，断続で排ガスを流通した場合の方が厚いことがわかる．

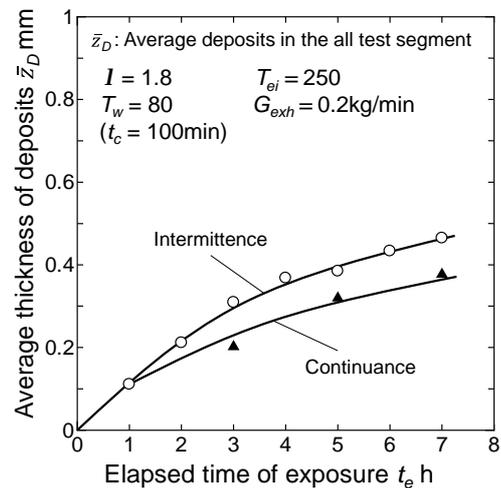


図7 連続および間欠作動による堆積層厚さの相違

堆積試験中は，冷却壁面付近で未燃炭化水素のような高沸点の凝縮成分を多く含む吹き飛びにくい層が形成され，冷却壁面から遠い堆積層の表面付近では高温の排ガスに曝されるため凝縮成分の揮発が進み，吹き飛びやすい層が形成されると考えられる．この時，排ガス流通を停止する期間があると，その間は堆積層の表面付近で凝縮成分が揮発せず，さらに冷却壁面付近の凝縮成分が堆積層の表面まで浸透することで堆積層全体が吹き飛びにくくなると考えられる．排ガスの流通を再開すると，吹き飛びにくくなった堆積層の上に新たにPMが堆積するため，排ガスの連続流通の場合に比べて断続流通での場合の堆積層が厚くなったと考えられる．

(5) まとめ

EGRクーラの上流部は下流部に比べて堆積物の堆積が顕著である．この原因としては排ガスと伝熱面の温度差が大きだけでなく，伝熱面での流れの境界層が未発達であることが支配因子として重要と思われる．またEGRクーラを通過する排ガスの総量を多くすれば，排ガスの流量に対する堆積物の質量割合は相対的に減少する．

冷却水の温度が低く、伝熱面の温度が排ガスの露点温度付近の場合には堆積物の表面が離脱した。さらには伝熱面の温度が排ガスの露点より十分低い場合では堆積自体が抑制された。この挙動は伝熱面上に層状に付着している堆積物の粉体層の内部に凝縮水の層が膜状に形成され、それが堆積物の離脱や堆積層の形成を阻止しているためと推定できた。またこの場合の離脱は堆積層の底部から起き、第4項で述べる表層の離脱とは異なることが、スポット状の離脱痕跡のパターンから明らかになった。EGRクーラに排ガスを7時間連続で流した場合と一時間毎にEGRクーラを常温に冷却しかつ乾燥させた場合を比較すると、乾燥させた場合の方が堆積が進行した。これは乾燥により上述した凝縮水の発生が抑制されたためと思われる。

排ガス自体の温度を300から200に低下させても堆積量には変化が現れなかった。

堆積物の層の厚さは長時間の試験の結果400ミクロンから600ミクロンにとどまり、それ以上厚くなることはなかった。これは上述した凝縮水の問題ではなく、堆積物の表層からの堆積物の流れのせん断力による離脱の影響とみられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

1. 久原圭, 柴崎嘉隆, 後藤直哉, 新井雅隆, すす堆積による EGR クーラの性能劣化評価, 自動車技術会論文集, 査読有り, 44 巻-4 号, 2013, 1009-1014.

2. 座間淑夫, 古畑朋彦, 兼本直征, 新井雅隆, 小型直噴ディーゼルエンジンにおけるシリンダヘッドデポジットの生成特性, 日本機械学会論文集 (B 編), 査読有り, 78 巻 794 号, 2012, 1841-1848.

3. 八田伸仁, 大森剛茂, 座間淑夫, 古畑朋彦, 新井雅隆, 各種脂肪酸またはエステルを添加したジェット燃料の高温壁面上におけるデポジット生成特性, 日本機械学会論文集 (B 編), 査読有り, 78 巻 793 号, 2012, 1620-1629.

4. 古畑朋彦, トリタ グラティカ, 新井雅隆, EGR クーラへの PM の堆積および堆積 PM の気流による除去, 自動車技術会論文集, 査読有り, 42 巻 5 号, 2011, 1117-1123.

〔学会発表〕(計 1 件)

1. 阿部祐太郎, 座間淑夫, 古畑朋彦, 新井雅隆, EGR クーラ内の PM 堆積に及ぼす壁面温度と排ガス流量の影響, 第 24 回内燃機関シンポジウム, 2013 年 11 月, 神戸.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

新井 雅隆 (ARAI Masataka)
群馬大学・理工学研究院・教授
研究者番号: 80112176

(2) 研究分担者

古畑 朋彦 (FURUHATA Tomohiko)
群馬大学・理工学研究院・准教授
研究者番号: 80261585

座間 淑夫 (ZAMA Yoshio)
群馬大学・理工学研究院・助教
研究者番号: 30594113