

給気加熱を用いた低負荷域における DPF の連続再生システムの開発

津田 稔¹⁾・山西 大¹⁾・石田 雅照¹⁾・大原 順一¹⁾・前田 和幸¹⁾

Development of Continuously Regenerated DPF System at Low Load with Suction Air Heater

Minoru Tsuda, Dai Yamanishi, Masateru Ishida, Junichi Ohara, Kazuyuki Maeda

A system which can continuously regenerate DPF at low load, by heating suction air with electric power of dynamo was developed. This system maintain inlet temperature of DPF to 320 deg. C or more by increasing engine load and heating suction air by electric power. The operating state of this system was confirmed by using 214kW/3101min⁻¹ high speed diesel engine, and the result was analyzed.

KEY WORDS: Compression ignition engine, Particulate filter, Measurement/diagnosis/evaluation (A1)

1. ま え が き

自動車等のディーゼルエンジンに設置された DPF (ディーゼル微粒子低減フィルタ) に捕集された粒子状物質 (PM) を、触媒の働きにより酸化除去することにより、連続して使用できるようにするためには、まず、DOC (ディーゼル酸化触媒) において排ガス中に含まれる PM 成分である SOF を酸化除去するとともに、エンジンの燃焼室において生成された NO (一酸化窒素) を酸化させて、NO₂ (二酸化窒素) に変化させる必要がある。次に DPF において、捕集された PM 成分である C (炭素、すす) を、DPF に担持された触媒と、排ガス中の O₂ (酸素) 及び NO₂ の働きにより 400°C 以下の温度で酸化させる (炭素化合物である CO₂ に変化させる) ことにより、これを除去する (以後、これを DPF の再生と記す) という方法が用いられている。触媒の活性化が始まる温度 (以後、これを活性化温度と記す) は、DOC や DPF に担持された触媒の種類や担持方法によって異なるが一般に 300°C 以上とされ、これ以下の温度領域において運転を続けると DPF に PM の成分である Soot (すす) が堆積して排ガスの流路が狭められ、排気系統の圧力が上昇してエンジン性能が低下し、遂には運転できない状態になる。これを防止するには、排ガス温度を DOC や DPF に担持された触媒の活性化温度以上にすることが必要だが、起動時や低負荷運転時にこの温度を維持するのは困難である。

本研究では、まず、214kW/3101min⁻¹ の高速ディーゼルエンジンから排出される PM の排出特性を明らかにするとともに、このエンジンの排気系統に市販の DPF を設置して負荷率を段階的に変化させることにより、排気温度を 200°C~350°C まで変化させた時の排気温度と DPF 入口圧力の関係を明らかにした。次に、同様の実験において、軽油にセリウム系添加剤を混合して排気温度を 320°C 以上にすることにより、DPF に捕集された PM を連続して酸化除去できることを明らかにした。さらに、これらの結果を用いて、ディーゼルエンジンの低負荷

域において、エンジンにより駆動される発電機の電力によって給気を加熱するとともに、これによりエンジンの負荷率を上昇させることにより、排ガス温度を 320°C 以上に保持して DPF において PM を連続除去できることを示した。

2. 実験装置と方法

表 1 に、実験に用いた高速ディーゼルエンジンの主要目を示す。また、図 1 に、水産大学校の実験室に設置された PM の計測・低減システム⁽¹⁾の概要と排ガスの流れを示し、図 2 に、エンジンの排気管系統に設置した DOC と DPF から構成される PM 低減装置における温度センサー、圧力センサー、排ガス (NO_x, O₂, CO, CO₂) 濃度測定用プローブの設置位置を示す。

Table 1 Main specifications of engine

Number of Cyl.		6
Cylinder Bore	mm	100
Piston Stroke	mm	110
Max. Power	kW	214
Engine Speed	min ⁻¹	3101
Max. Pme	MPa	1.59

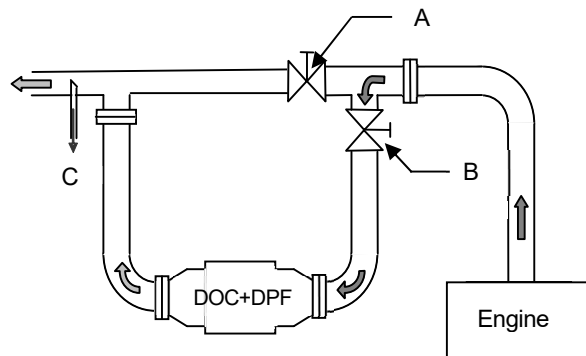


Fig.1 Outline of experimental apparatus

1) 水産大学校(759-6595 山口県下関市永田本町 2-7-1)

図1において、通常はバルブAを開きバルブBを閉じた状態でエンジンを運転することにより、全ての排ガスはPM低減装置が設置されていない排気管を流れる。この状態でサンプリングプローブCから吸引した排ガスを分析することにより、通常運転時における排ガス中のNO_x、O₂、CO、CO₂及びPMを計測できる。次に、バルブBが開かれた状態にしてバルブAを閉じると、全ての排ガスがPM低減装置を通過する。

図2において、エンジンから出た排ガスはDOCとDPFから構成されるPM低減装置を経て外気に放出されるが、DOC入口には温度センサーと圧力センサー及び排ガス濃度測定用プローブが設置されており、DPF入口には温度センサーと圧力センサーが設置されている。また、DPF出口には温度センサーと排ガス濃度測定用プローブが設置されている。

表2に実験に使用したセリウム系触媒を含むセリウム系添加剤の性状を示す。表に示すように、セリウム系添加剤の密度は0.917g/cm³ (15°C)、セリウム系添加剤中のセリウム系触媒(CeO₂)の割合は7.37%で、燃料に対するセリウム系触媒(CeO₂)の割合は25 ppmである。

PMの採取及び計測(分析)は、“JIS B 8001-1 往復動内燃機関一排气排出物測定一第1部：ガス状排出物及び粒子状排出物の台上測定”に基づいて実施し、PMの捕集はこの規定の文献に示された装置⁽²⁾、⁽³⁾を用いて行った。図3に、本実験に用いたPM計測システムの概要を示す。図において、排ガスは水平方向から希釈トンネルに入り、曲がり部を経ることなく希釈空気により希釈される。また、希釈トンネル内の排ガス導入管は保温のため、二重管構造となっている。このような構造とすることにより、PM中に含まれるSOFが排ガス導入管において希釈空気(約25°C)により冷却されて凝縮して内壁に付着し、それにSoot(すす)が付着することによる計測精度の低下を防止することが可能となる。

3. 実験結果

3.1. 負荷率がPMの排出特性に及ぼす影響

図4に、エンジン出力とPM排出量[g/h]及びその成分の関係を示す。PM排出量は、実験の前後において捕集フィルタを規定時間恒温恒湿槽に静置し、それぞれのエンジン出力において5回の計測を行い、精密天秤(計測精度:10万分の1g)を用いて計測した。PM捕集前後の捕集フィルタの質量差から算出した。PMの成分は、任意に抽出した上記3回分の試料を、ジクロロメタンを溶剤とするソックスレー抽出法によって分析した平均とした。図において、PM排出量は出力の増加とともに増大している。これは、出力が増加すると機関速度が上昇するとともに1回に噴射される燃料の量が増加するため、サイクル毎の燃焼時間が短くなるとともに、1回の燃焼における燃焼量も増加するため、不完全燃焼が発生しやすくなりSoot(すす)の量と割合が増加するためと考えられる。図において、負荷率18%は39kWに相当し、負荷率28%は60kW

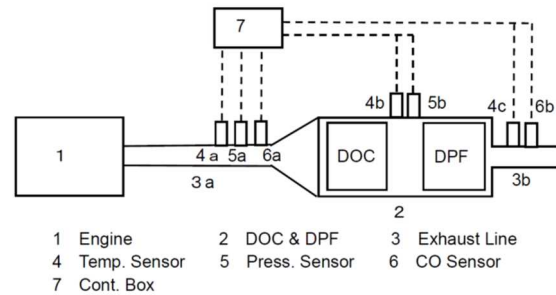


Fig. 2 Position of sensors

Table 2 Properties of catalyst

CeO ₂ Concentration to Fuel	wt. ppm	25
CeO ₂ Concentration to Additives	wt. %	7.37
Density of additives (15°C)	g/cm ³	0.917

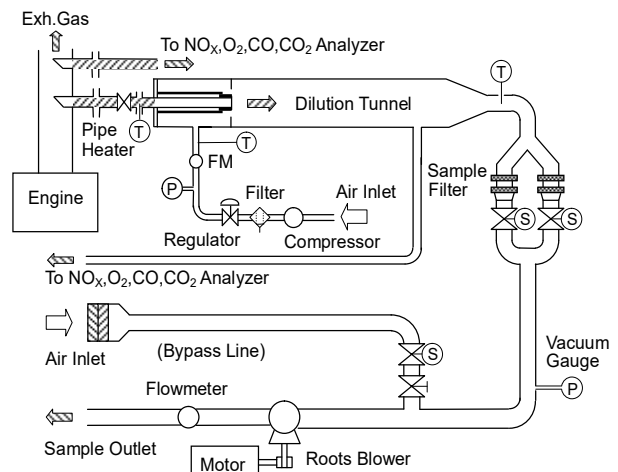


Fig. 3 Outline of PM measurement system

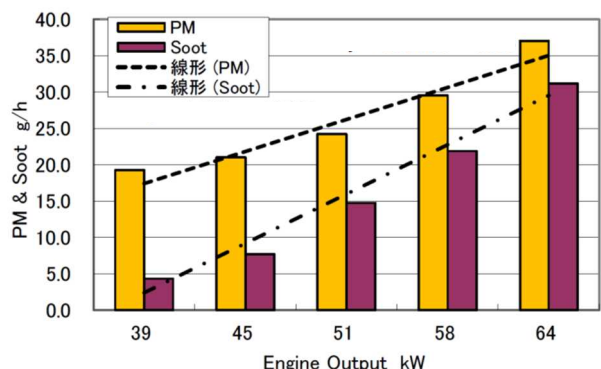


Fig. 4 Relation between engine output and PM

に相当するため、この図は本実験の全ての運転範囲におけるPMの排出特性を示している。

3.2. セリウム系触媒によるDPFの性能改善効果

図5に、供試機関の負荷率を18%から1%毎に28%まで上

昇させたときの、DPF 入口温度と DPF 入口圧力との関係を示す。図中の黒丸と緑丸は、市販の軽油を用いて行った実験結果を示し、図中の青丸と赤丸は、軽油に表 2 に示すセリウム系添加剤を混合した燃料を用いて行った実験結果を示している。

まず、図 5(a)に示す市販の軽油を用いて行った実験結果に注目すると、時間の経過（負荷率の増加）とともに DPF 入口圧力は上昇し、その上昇割合は増加傾向となっている。これは図 4 に示したように、負荷率の上昇とともに PM の排出量が増加するとともに、PM 中に含まれる Soot（すす）の割合が増加するためである。なお、PM 中の成分である Soot は DPF に堆積して排ガスの流路を狭めることにより DPF 入口圧力の上昇を招くが、PM 中の成分である SOF は DOC において酸化除去される。また、図 5(a)に示す軽油にセリウム系添加剤を混合した実験に注目すると、DPF 入口温度が約 300°C までは、軽油を燃料とする実験結果とほぼ同様の傾向を示すが、DPF 入口温度が約 300°C になると圧力の増加傾向が小さくなり、約 320°C 以上では上昇しなくなっている。図 4 に示すように、出力（負荷率）の上昇とともに単位時間当たりの PM 排出量は増加し、Soot の割合も大きくなるにも係わらず、DPF 入口圧力が上昇しなくなるのは、DPF 内部において Soot（すす）が連続除去されていることを示している。図 5(a)に示す実験結果から、セリウム系添加剤を燃料に混合して、DPF 入口温度を 320°C 以上にするにより、DPF において Soot（すす）が連続除去されることが確認された。

次に、図 5(b)の“軽油にセリウム系添加剤”を混合した実験における DPF 入口圧力の変化に注目すると、DPF 入口温度が 320°C 以上になると DPF 入口圧力は上昇しなくなり、330°C 以上になると圧力が減少傾向に転じている。これは、既に DPF に堆積している Soot（すす）が酸化除去されていることを示している。図 5(b)に示す実験結果から、セリウム系添加剤を燃料に混合して、DPF 入口温度を 320°C 以上にするにより DPF が連続再生されるとともに、DPF 入口温度を 330°C 以上にするにより、DPF に堆積している Soot（すす）も酸化除去されることが明らかになった。

図 6 に、軽油にセリウム系添加剤を混合した燃料が Soot（すす）の酸化除去に及ぼす影響を示す。図 6(a)は、温度が 280°C から約 360°C まで変化した時の DPF 入口圧力の変化を示し、図 6(b)は、DPF 入口温度が 300°C に達した後の時間の経過に伴う DPF 入口圧力の変化を示している。図 6(a)から、DPF 入口温度が 350°C 付近で、軽油にセリウム系添加剤を混合した燃料に切替えることにより、DPF 入口圧力は上昇しなくなり、逆に下降気味となっている。これは、図 6(b)に示すように、時間の経過とともに、まず DPF において Soot（すす）が連続再生される状態となり（DPF 入口の圧力が上昇しなくなり）、次に、それまでに DPF に堆積していた Soot（すす）の酸化除去が始まったためと考えられる。図 6 に示す実験結果から、軽油で運転中においても、DPF 入口温度が約 350°C において燃

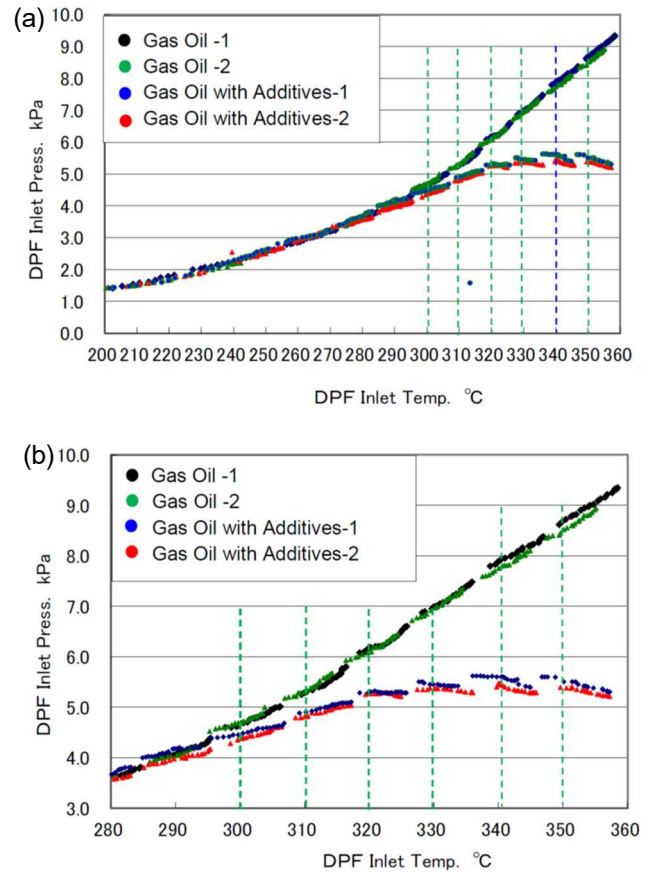


Fig. 5 Relation between DPF Inlet Temp. and DPF Inlet Press.

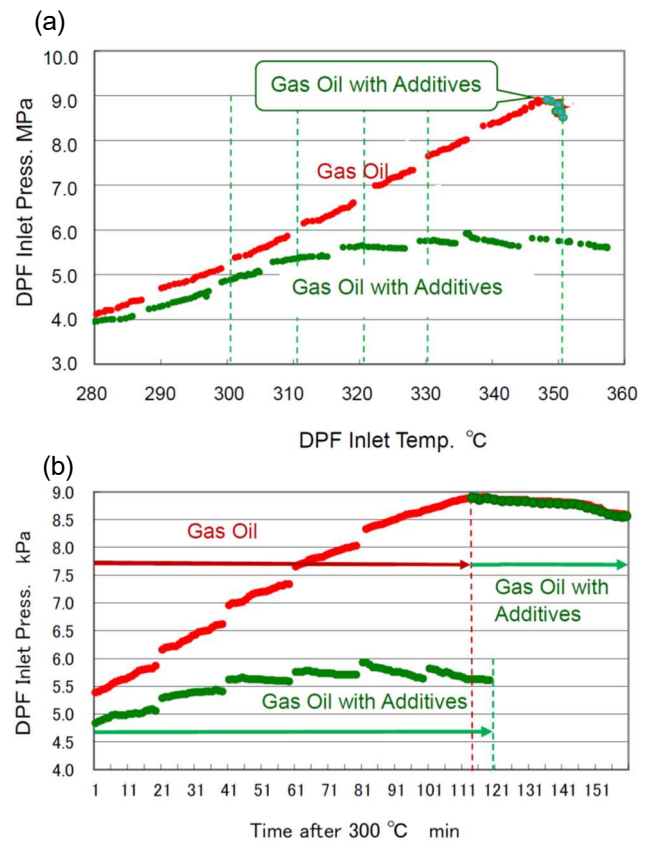


Fig. 6 Effect of using Gas Oil with Additives

料を“セリウム系添加剤を混合した燃料”に切換えることにより、DPF において Soot (すす) が連続除去されるとともに、それまで堆積していた Soot (すす) も酸化除去されることが確認された。

3.3. 給気加熱による DPF の連続再生

前節において、軽油にセリウム系添加剤を混合した燃料を用いるとともに、排ガスの DPF 入口温度を 320°C 以上にするることにより DPF の連続再生が可能となり、330°C 以上にするることにより、DPF に堆積していた Soot (すす) も酸化除去できることを示した。しかし、本研究が対象としている、アイドリング時を含む低負荷域において DPF 入口における排ガス温度を 300°C 以上に保持することは困難である。本節では、給気を加熱することにより DPF を連続再生可能なシステムについて検討する。

図 7 に、給気温度を 40°C に保持して負荷率を上昇させた時の、負荷率と排ガス温度 (エンジンの出口温度) の関係を示す。負荷率を上昇させることにより排ガス温度は直線的に上昇するが、負荷率 18% における排ガス温度は約 300°C であるため、DPF の連続再生は困難であり、アイドリング運転時や低負荷運転時にはそれ以下の温度であるため、何らかの対応を行わないと、DPF に捕集された Soot (すす) が排ガスの流路を狭め、DPF 入口圧力は上昇を続ける。

図 8 に、負荷率 18% 一定の状態では給気温度を変化させた時の排ガス温度を示す。図 7 において、給気温度 40°C の時の排ガス温度は約 300°C であったが、給気温度が約 20°C になると排ガス温度は 280°C まで低下する。我が国の冬期はこれ以下の温度になるため、排ガス中の Soot (すす) は DPF に堆積し続けることになる。これに対し、給気加熱などの方法により給気温度を 55°C まで上昇させると、負荷率 18% においても 320°C を達成することが可能となることが分かる。

図 9 に、供試機関の負荷率 18% において、給気温度が着火遅れに及ぼす影響を示す。この図から、給気温度を高くすることにより、同一の燃料噴射圧力波形と噴射時期に対する着火時期が早くなり、最高圧力が低下している (燃焼が改善されている) ことが分かる。

図 10 に、DOC 入口/出口温度と DPF 出口における CO (一酸化炭素) 濃度の関係を示す。図において、DOC の温度が 200°C 以上になると CO 濃度が急激に減少しはじめるとともに、DOC 入口温度と DOC 出口温度の値が逆転している。また、220°C 以上においては CO 濃度が 0 (零) に近い値となっている。約 200°C から DOC に担持された触媒の活性化が活発になることにより、CO が酸化されて CO₂ に変化するとともに、この時の DOC における発熱反応によって出口温度が高くなるためと考えられる。このことから、本実験装置範囲においては、給気を加熱して DOC 入口温度を 220°C 以上にした状態で、排気管系統に燃料を噴射することにより、この燃料が DOC に置いて酸化される際の発熱反応によって DPF 入口温度を 320°C

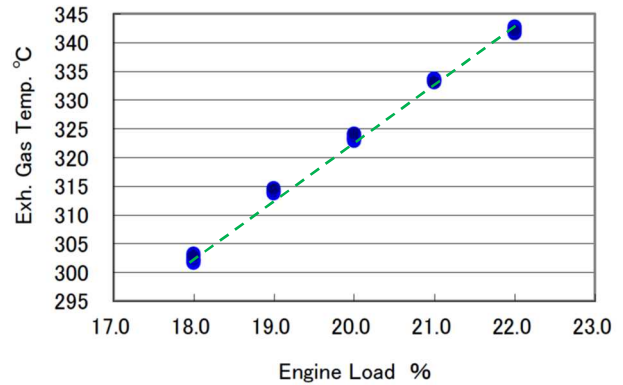


Fig. 7 Relation between engine load and Exhaust Gas Temp.

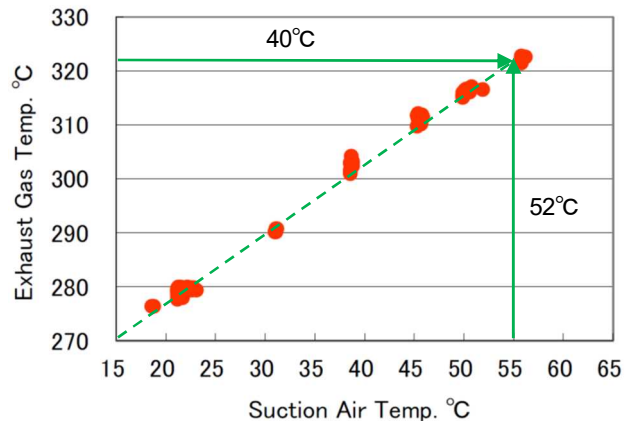


Fig. 8 Relation between Suction Air Temp. and Exhaust Gas Temp. at 18% Load.

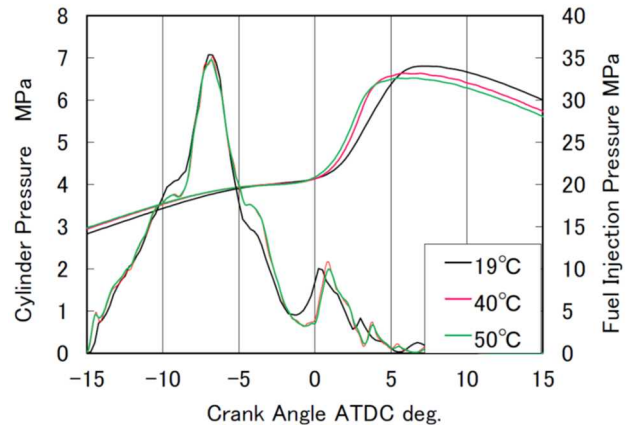


Fig. 9 Change in Ignition Delay on Suction Air Temp.

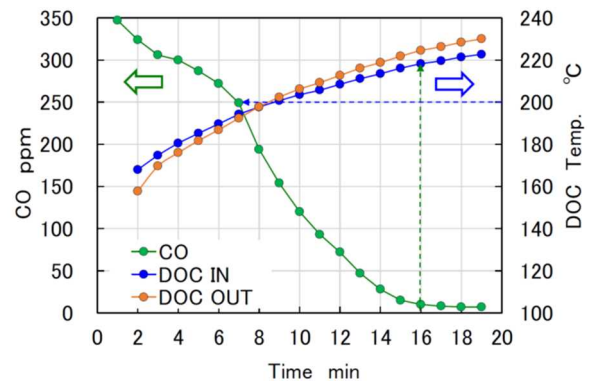


Fig. 10 Oxidative breakdown Temperature of Catalyst in DOC

以上にできる可能性がある。逆に、DOC 入口温度が 220°C 以下であれば、噴射された燃料は DOC において酸化されることなく DPF に達して堆積し続け、ある温度以上になるとこれが一度に酸化・燃焼して DPF が焼損に至る可能性がある。

4. 結果の考察

前章において、燃料にセリウム系触媒を含む添加剤を混合するとともに DPF 入口温度を 320°C 以上にすることにより、DPF の連続再生が可能になり、330°C 以上にすることにより、それまで DPD に堆積していた Soot (すす) を酸化除去できることを示した。しかし、本研究が目的とするアイドリングや本実験範囲の最低負荷である負荷率 18% においてはこの温度を達成することは困難である。本章では、これまでに得られた実験結果を基に、アイドリングを含む低負荷域においても DPF を連続再生できるシステムについて検討する。

4.1. 給気の加熱効果

図 7 に示すように給気温度が 40°C でもエンジンの出口温度は約 300°C であり、図 8 に示すように給気温度 20°C においては 280°C 以下となる。給気温度が低いと DPF の再生に必要な条件の達成が困難になるだけでなく、図 9 に示すように、エンジンの燃焼室における燃焼状況も悪化し、エンジンにとっては非常に好ましくない状況になる。図 8 において、給気温度を 40°C (15°C から 55°C) に上昇させることにより排気温度 (エンジン出口温度) は 52°C (270°C から 320°C) まで上昇しているが、これは、エンジンに吸入する空気を加熱することにより圧縮後の温度を高くすることができるとともに、加熱により圧力一定の下における空気の密度 (kg/m^3) が小さくなるため、燃焼室における燃焼において供給熱量 (燃料噴射量) に対する燃焼ガスの温度上昇割合を大きくすることができるためである。燃料は上死点付近において噴射されるため、その時の燃焼室温度 (圧縮後の温度) が高いと、図 9 に示すように、着火遅れが短くなるとともに、その後続く燃焼温度も高くなるため、PM の成分である SOF (可溶性有機成分) の割合も減少する可能性がある。

4.2 給気の加熱方法

給気を加熱するには、電気ヒーターを用いるのが一般的であるが、電気ヒーターに供給する余分の電力を必要とする。また、DPF において浄化された排ガスの一部を給気に戻す (排ガス再循環) ことにより給気を加熱する方法もあるが、装置が複雑になるとともに、長時間の使用においては給気系統が汚損する可能性がある。本研究においては、給気を電力で加熱する方法について考察する。トラックやバスにおいて、給気加熱を行う場合、その電力は発電機から直接供給されるか蓄電池から供給されるかのいずれかの方法によるが、蓄電池に貯蔵された電力も発電機によって発電されたものである。発電機はエンジンによって駆動されるため、いずれの方法を用いても、エンジンは、発電に必要な動力を供給する必要がある。こ

れらのことから、給気加熱に必要な動力 (電力) を得るためには、その増加分だけエンジンの負荷率を上昇させる必要があるため、図 7 に示すように、負荷率が上昇した分だけ排ガス (エンジン出口) 温度が上昇する。以上のことより、給気加熱を行うことにより効果的に排ガス (エンジン出口) 温度を上昇させることができるとともに、それに伴う負荷率 (エンジン出口) の上昇による排ガス (エンジン出口) 温度の上昇という相乗効果を得ることが可能になる。

4.3. 低負荷域における DPF の連続再生システム

前節において、発電機によって供給される電力を用いて給気加熱を行うことにより効果的に排ガス (エンジン出口) 温度を上昇できることを示したが、本節ではより効果的な方法について検討する。

図 11 に、従来の発電機と蓄電池の組み合わせに、電動発電機と制御装置を加えたシステムを示す。

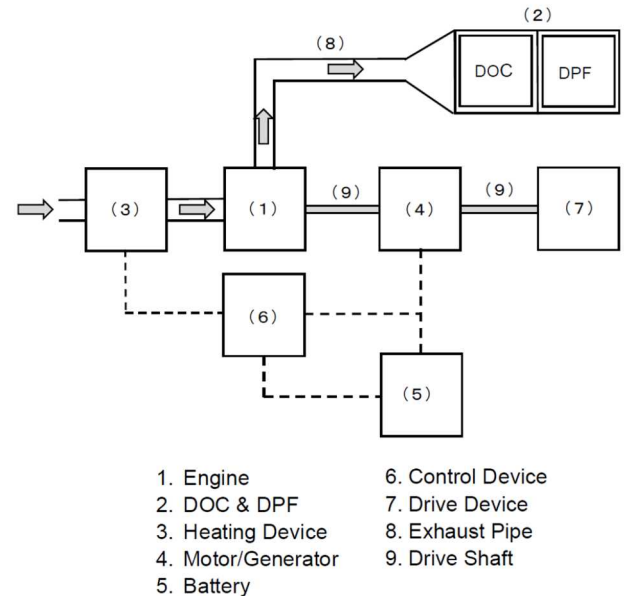


Fig. 11 General Arrangement of Continuously Regenerated DPF System at Low Load with Suction Air Heater, Motor/Generator and Controller

図において、ディーゼルエンジンの燃焼に必要な空気は、加熱装置 (3) を経てエンジン (1) に吸入され、排気管 (8) を経て DOC と DPF から構成される PM 低減装置 (2) に流入する。エンジン (1) は電動発電機 (4)、車輪・その他の装置を駆動する駆動装置 (7) に駆動軸 (9) により連結されており、電動発電機 (4) はエンジン (1) により駆動される発電機としての機能を持つとともに、駆動軸 (9) を介して駆動装置 (7) を駆動する動力源としての電動機としての機能を併せ持つ。電動発電機 (4) によって発電された電力はケーブルを介して蓄電装置 (5) に蓄電されるとともに制御装置 (6) を介して加熱装置に供給されエンジンに吸入される空気を加熱する熱源となる。

通常運転 (走行) 時においては、エンジン (1) の動力は駆

動軸（9）を介して、直接、駆動装置（7）に伝えられ、エンジンから排出された排ガスは排気管（8）を通して PM 低減装置（2）に至り、排ガス中の PM は DPF において連続的に酸化除去される。一方、アイドリングや低負荷運転時には、エンジン性能が十分に発揮できない（燃焼室における燃焼状態や機械効率が悪化する）とともに、排ガス温度が低い（PM 低減装置に担持された触媒の活性化温度に達していない）ため排ガス中の PM は DPF に堆積するという好ましくない状態となる。そこで、電動発電機（4）により発電を行いその電力を蓄電装置（5）に蓄えるという動作を行わせると、エンジンの負荷率が上昇することによりエンジン性能が改善されるとともに、排ガス温度が上昇して PM の酸化除去が可能となる。それでも排ガス温度が不足する場合は、同時に電動発電機（4）で発電された電力を用いて加熱装置（3）を作動させることによりエンジンの負荷率はさらに上昇するため、状態は改善される。電動発電機（4）によって発電された電力を蓄電装置（5）に供給するか加熱装置（3）に供給するかの選択とその供給割合は制御装置（6）により制御される。蓄電装置（5）に蓄えられた電力は、必要に応じて電動発電機（4）に供給されて駆動軸（9）を介して駆動装置（7）を駆動するとともに、ケーブルと制御装置（6）を介して加熱装置（3）に供給されてエンジンに流入する空気を加熱する。また、電動発電機（4）は、自動車等においては減速時や坂道等におけるマイナス負荷の際は発電機として機能し、エンジンからの出力がない場合でも蓄電設備に電力を供給することが可能となる。

本システムを用いることにより、小型エンジンや大型エンジンにおいても、その運転形態に合わせた電動発電機（4）、蓄電設備（5）の容量と機能の選択が可能となり、効果的なハイブリッドシステムの構成が可能となる。

5. ま と め

ディーゼルエンジンの低負荷域において、エンジンにより駆動される発電機の電力により給気を加熱するとともにエンジンの負荷率を上昇させ、排ガス温度を 320°C 以上に保持することにより DPF を連続的に再生できるシステムを開発するために、214kW/3101min⁻¹ の高速ディーゼル機関を用いた実験を行い、その結果を解析した。その結果、本実験範囲において次のことを明らかにした。

（1）セリウム系添加剤を燃料に混合して、DPF 入口温を 320°C 以上にすることにより DPF が連続再生されるとともに、DPF 入口温度を 330°C にすることにより、それまで DPF に堆積していた Soot（すす）も酸化除去される。

（2）DPF 入口温度が 350°C 以上において燃料を“軽油”から“セリウム系添加剤を混合した燃料”に切換えることにより、DPF において Soot（すす）が連続除去されるとともに、それまで堆積していた Soot（すす）も酸化除去される

（3）給気温度が低いと DPF の再生に必要な温度条件の達成

が困難になるだけでなく、エンジンの燃焼室における燃焼状況も悪化するが、負荷率 18% において給気温度を 15°C から 55°C まで（40°C）上昇させることにより、排気温度（エンジン出口温度）は 270°C から 320°C まで（52°C）上昇し、DPF の連続再生が可能となる。

（4）発電機、蓄電装置（Battery）、給気加熱装置を用いることにより効果的な給気加熱を行うことができる。さらに、電動発電機と制御装置を加えることにより、低負荷域においても有効に作動する DPF の連続再生システムとなる。

謝 辞

本研究は、国立研究開発法人水産研究・教育機構水産大学校と日本油化工業株式会社の共同研究により実施されたものである。実験機材の提供、実験及びデータの解析にご協力いただいた関係各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- （1）前田和幸：フィルタ方式 DPF による船舶起源 PM の低減、日本マリンエンジニアリング学会誌，Vol. 46，No. 6，p. 38-45（2011）
- （2）前田和幸，高崎講二，津田稔，阿部清三：希釈率が PM 計測に及ぼす影響，日本マリンエンジニアリング学会誌，Vol. 38，No. 8，p. 37-41（2003）
- （3）Maeda et al.：Measurement of PM Emission from Marine Diesel Engines，24th CIMAC International Congress on Combustion Engines，Paper No.107，p.1-7（2004）
- （4）津田稔，前田和幸，山西大，成田克矢，神部典之，表清隆：セリウム（セリア）が PM の酸化除去に及ぼす影響，自動車技術会 2020 秋季大会学術講演会講演予稿集，No. 240，p. 1-6（2020）
- （5）津田稔，山西大，石田雅照，前田 和幸：低負荷域におけるリアルタイム再生 DPF システムの開発，自動車技術会 2021 春季大会学術講演会講演予稿集，No. 154，p. 1-5（2020）