

ディーゼル後処理装置が低温始動時の排出ガスに及ぼす影響*

林田 和宏¹⁾ 山田 康太²⁾ 石谷 博美³⁾ 松岡 純一⁴⁾ 山田 広行⁵⁾ 南 利貴⁶⁾

Effect of Diesel Exhaust Aftertreatment System on Exhaust Gas Emissions during Cold-Starting

Kazuhiro Hayashida Kota Yamada Hiromi Ishitani Jun'ichi Matsuoka Hiroyuki Yamada Toshitaka Minami

The effect of diesel exhaust aftertreatment system on exhaust gas emissions during cold-starting was evaluated experimentally. The aftertreatment system which consisted of diesel oxidation catalyst (DOC) and diesel particulate filter (DPF) was used. Exhaust gas emissions were measured at front and rear of the aftertreatment system, and intensity of exhaust odor was assessed by sensory assessment. The results indicate that HC was adsorbed on the aftertreatment system and desorption of some of HC occurred with elevation of exhaust temperature. HC which did not adsorb onto the aftertreatment system was discharged from a tail pipe as a white smoke. Some of HCHO, which is the primary odor component of diesel exhaust, was also adsorbed on the aftertreatment system. It was confirmed that odor intensity at the rear of the aftertreatment system was weaker than that of the front side.

Key Words: (Standardized) heat engine, post treatment system, emissions gas (Free) Cold-Starting (A1)

1. はじめに

低温条件下でディーゼルエンジンを冷間始動させると、排気管から多量の白煙が排出される。この排ガス中には未燃燃料をはじめ、燃料の熱分解や部分酸化で生成する炭化水素化合物、燃焼中間生成物および水蒸気等が粒子あるいはガスの状態で含まれている^(1,2)。中には人体や環境に有害な物質や不快な臭気成分も存在するため^(4,5)、ディーゼルエンジンの低温始動時における排気エミッションの低減は重要な課題である。

近年の自動車排出ガス規制の強化に伴い、ディーゼル車には酸化触媒 (DOC: Diesel Oxidation Catalyst) やディーゼル微粒子除去装置 (DPF: Diesel Particulate Filter)、NO_x 低減触媒などで構成される排気後処理装置が標準装備されている。しかしながら、低温始動時は排気温度、後処理触媒温度ともに低く、後処理装置の浄化機能はほとんど有効に作用しない⁽⁶⁾。

従来、後処理装置が機能する高温領域については、後処理装置による排ガス浄化特性が評価されてきたものの、浄化機能が作用しないような低温時における後処理装置の働きに関する報告は少ない⁽⁷⁾。エンジンアウトの排ガスと後処理装置下流の排気管から排出される排ガスの成分にどのような違いがあり、その違いに後処理装置がどのような影響を及ぼしてい

るかについては、詳細が明確にされていない。また、昨今のディーゼルエンジンは燃費とエミッションの低減を目的として、コモンレールシステムとターボチャージャーとの組み合わせによる圧縮比低下が進んでいるが⁽⁸⁾、厳しい低温条件下では、圧縮端温度の低下に伴う始動性の悪化が懸念される。低温始動性の悪化はエンジンアウトの排ガスの悪化を招くため⁽⁹⁾、そのような排ガスが後処理装置に流れる場合の装置下流に排出される排ガスの実態を把握することは重要である。

そこで本研究では、DOC と DPF より構成される後処理装置を用い、その前後における排ガス成分と臭いの変化を調べることで、後処理装置が低温始動時の排出ガスに及ぼす影響について考察した。また、排気管から排出される白煙濃度を測定し、後処理装置が白煙排出に及ぼす影響についても検討を行った。

2. 実験装置および方法

2.1. 供試エンジンおよび実験装置

供試エンジンの主要諸元を表 1 に示す。使用したのはコモンレール式燃料噴射システムを搭載した 4 気筒 4 サイクルのディーゼルエンジンで、ボア 95.4mm、ストローク 104.9mm、総排気量 2999cc、圧縮比は 17.5 である。排気経路中には前段に DOC を、後段にウォールフロー型の DPF を配した後処理装置を設置した。燃料には表 2 に示す JIS 特 3 号軽油を使用した。

実験装置の概略を図 1 に示す。エンジンは常温から -30℃ までの範囲で室温を任意に調節できる低温室内に設置されている。後処理装置の前後でサンプリングラインより排ガスを

*2011 年 10 月 13 日受理。2011 年 10 月 13 日自動車技術会秋季学術講演会において発表。

1)・3) 北見工業大学 (090-8507 北海道北見市公園町 165)
2) 北見工業大学大学院 (090-8507 北海道北見市公園町 165)
4) アイシン精機 (株) (448-8650 愛知県刈谷市朝日町 2-1)
5)・6) いすゞ自動車 (株) (252-8501 神奈川県藤沢市土棚 8)

採取し、排ガス中の HC、CO および代表的な臭気成分であるホルムアルデヒド (HCHO) の濃度を測定した。HC と CO は、排ガスをサンプリングラインから直接に NDIR 式の HC・CO アナライザ (堀場製作所, MEXA-321) に導入し測定した。なお、サンプリングライン内での HC の凝縮を抑制するため、ラインをリボンヒータで約 200°C に加熱した。HCHO については、サンプリングバッグに採取した排ガスを還元 FID 法⁽¹⁰⁾によりガスクロマトグラフ (日立製作所, 163 型) を用いて濃度を求めた。また、低温室外の大気中に排出される白煙濃度は、透過型スモークメータ (PHS 型) (理化精機工業) を用い評価した。エンジン出口側の冷却水温度、排気弁出口および後処理装置前後の排ガス温度の測定には K 型熱電対を使用した。

Table 1 Specifications of test engine

Engine type	4-stroke DI diesel	
Cylinder	In-line 4 cylinder	
Bore × Stroke	[mm]	95.4 × 104.9
Displacement	[cm ³]	2,999
Compression ratio	17.5	
Injection system	Common-rail system	
Maximum power	[kW/rpm]	110/2800
Maximum torque	[Nm/rpm]	375/1600
Lubricating oil	SAE 10W-30	
Aftertreatment syetem	DOC + DPF	

Table 2 Properties of test fuel

Density (15°C)	[g/cm ³]	0.8084
Kinematic viscosity (30°C)	[mm ² /s]	2.093
Gross calorific value	[MJ/kg]	46.17
Flash point	[°C]	53
Cetane number		51.9
Cold filter plugging point	[°C]	-29
Pour point	[°C]	-35
Sulfur content	[ppm]	5

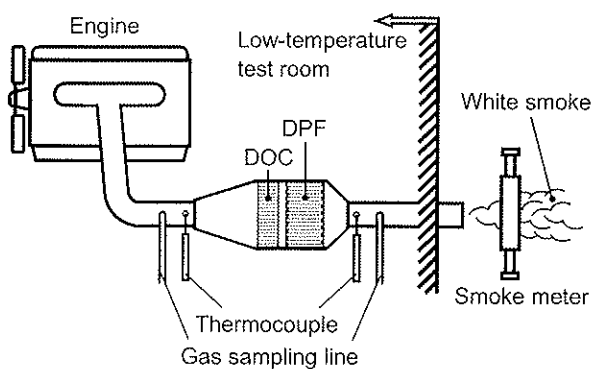


Fig.1 Experimental setup

2.2. 実験方法

始動条件を同一とするため、設定温度でエンジンのソークを約 10 時間行い、始動時にはグロープラグを 10 秒間予熱してからクランキングを開始した。エンジン始動後は無負荷暖機運転を 30 分間行い、その間に後処理装置前後の排ガス濃度

や温度等の測定を行った。30 分経過後、エンジンを回転速度 1500rpm で 20 分間運転し、続いて DPF の再生を行い、後処理装置内に残った未燃炭化水素 (UHC: Unburned HC) や PM を処理してからエンジンを停止した。

排気臭気の評価は、サンプリングバッグに採取した排ガスの臭いをパネラが嗅ぐ間接評価法⁽¹⁰⁾により行った。その評価基準を表 3 に示す。ここでは、訓練された 6 人のパネラによる官能評価の平均を評価値とした。

Table 3 Odor rating scale

Intensity rating	Verbal	Description
1	Not detectable	No odor
2	Slight	Odor but not uncomfortable
3	Moderate	Uncomfortable odor
4	Strong	Irritating odor
5	Very strong	Very irritating odor

2.3. 始動温度と始動性

ソーク開始から 10 時間経過すると、エンジン本体や後処理装置、燃料、エンジンオイルの温度は低温室内の設定温度まで低下する。この時の温度を始動温度 T_s とし、 $T_s = -10, -20, -25$ および -30°C の条件で、クランキング開始後のエンジン回転速度と燃料噴射量の時間変化を調べた。その結果を図 2 に示す。なお、燃料噴射はプレとメインの 2 回噴射で行っており、燃料噴射量は 1 気筒に噴射される 1 ストロークあたりの合計噴射量で表している。また、ここで表される噴射量は実測値ではなく、噴射ノズルのニードルリフトから求めたものであり、噴射量は回転速度が 850rpm となるように調節されている。

回転速度を見ると、始動温度 -20°C まではクランキング開始後速やかにエンジンが始動していることがわかるが、 -25°C と -30°C の場合は、グロープラグを十分に予熱しているにもかかわらず、始動にそれぞれ 4, 8 秒程度を要している。これは、おもに始動温度が低いほどオイルの粘度が高くなり摩擦トルクが増加するとともに、圧縮端温度の低下と燃料微

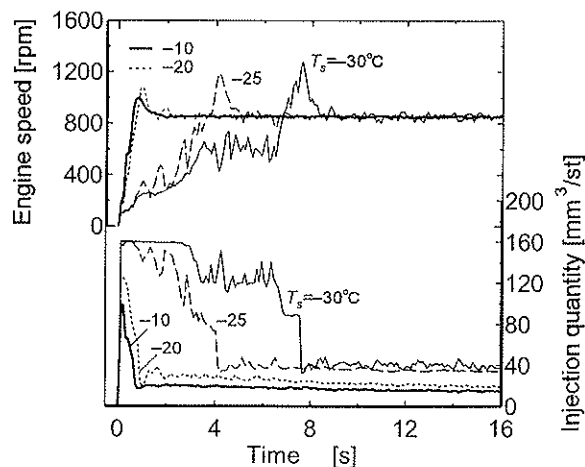


Fig.2 Engine speed and injection quantity

粒化の悪化で着火・燃焼が不安定になるからと考えられる。また、 -25°C と -30°C の条件では、目視により燃料タンク内にワックス成分の析出が確認されており、ワックス成分により燃料フィルタの目詰まりが生じて噴霧がさらに悪化した可能性も考えられる。

この図より、クランキング時間が長くなるとクランキング中にシリンダ内に供給される燃料量が大きく増加することが分かるが、実際に燃焼するのはその一部であり、多くはエンジンからそのまま排出されて白煙となるか、シリンダや燃焼室壁面に付着して始動後の白煙の原因になるものと考えられる。

3. 実験結果および考察

3.1. 後処理装置前後におけるCO, HC濃度の変化

始動温度 $T_s = -10, -20, -25$ および -30°C の条件で、後処理装置の前後においてクランキング開始後のHC濃度の時間変化を調べた。その結果を図3に示す。始動温度が $-10, -20^{\circ}\text{C}$ の場合はクランキング開始後速やかにエンジンが始動するものの、始動温度が -25°C を下回ると始動に時間がかかり、その間エンジンからは多量のUHCが排出されるため、クランキング開始後のHC濃度が急激に上昇している。また、始動後もクランキング中にシリンダ内壁面に付着、堆積した燃料の排出が続くため、しばらくは高濃度のHC排出が続く様子が確認できる。

後処理装置前後の比較をすると、後処理装置後側は前側よりも始動時のピーク値が大きく減少しており、HCが後処理装置にトラップされることがわかる。また、始動温度 -25°C と -30°C については、エンジン始動後、後処理装置後側の濃度は前側と同様に一旦低下するものの、40秒後あたりより再び濃度が上昇している。

図4はクランキング開始後の後処理装置前後における排気

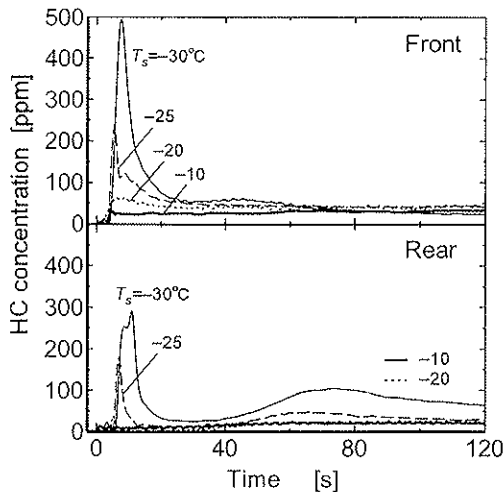


Fig.3 HC concentrations at the front and the rear of aftertreatment system

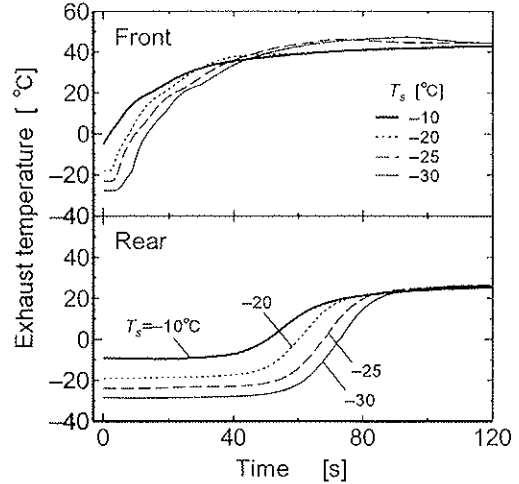


Fig.4 Exhaust temperatures at the front and the rear of aftertreatment system (0~120s)

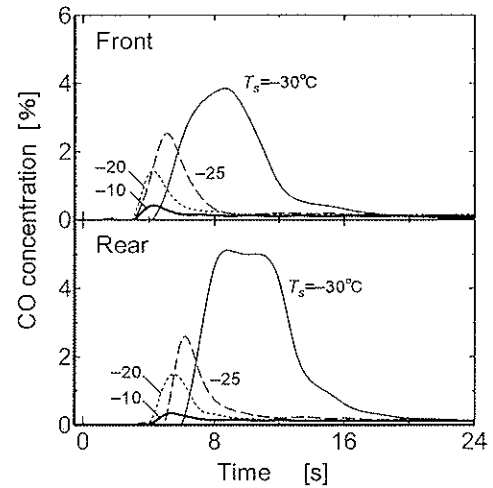


Fig.5 CO concentrations at the front and the rear of aftertreatment system

温度の時間変化であるが、後処理装置前側の排気温度が上昇するまで40秒程度かかっており、その後後処理装置後側の排気温度が上昇を始めている。このことは、後処理装置内部が始動後40秒付近より暖まり始めることを示唆しており、始動温度 $-25, -30^{\circ}\text{C}$ の条件において、始動前後で後処理装置にトラップされたUHCの一部が排気温度上昇の影響を受けて下流に流れたため、始動40秒後付近から後処理装置後側のHC濃度が再上昇したと考えることができる。

図5にクランキング開始後の後処理装置前後のCO濃度の時間変化を示す。低温始動時はクランキング中に多量の燃料が噴射され、さらにシリンダや燃焼室壁面には多量の未燃燃料が付着するため、始動時はパーセントオーダーの非常に高濃度のCOが排出されていることが確認できる。COは貴金属系の触媒に吸着しやすい性質を有するため⁽¹¹⁾、DOCの担持触媒にも吸着するものと思われる。しかしながら、排出濃度が非常に高いために吸着が飽和し、その結果、前後の濃度差が

明瞭に表れなかったものと推測される。なお、始動温度 -30°C については後処理装置後側の方が濃度が高くなっているが、これは計測器が1台のために、前側と後側で日を改めて実験を行ったことによる始動性の差が表れたものと考えられる。

3.2. 後処理装置が白煙排出に及ぼす影響

後処理装置を装着した場合としない場合の排気管出口における白煙濃度の時間変化を図6に示す。測定条件は外気温が零度前後の屋外であり、白煙濃度は光の不透過率（オパシティ）で示されている。後処理装置が非装着の場合は、クランキング開始後ただちにピークが表れており、クランキング中に排出されるUHCが凝縮して白煙となったものが検出されている。そして、その濃度は始動温度が低いほど高く、図3に示した後処理装置前側のHC濃度の結果に類似している。

これに対し、後処理装置を装着した場合は、始動時に多くのUHCが後処理装置に吸着するため、クランキング中のピーク値が低くなっている。始動後はHC濃度と同様に濃度が一旦低下するものの、50秒後付近から濃度が再上昇している。この再上昇時の白煙は、主に後処理装置内部に結露凍結した霜が排気熱により水蒸気となったものであると考えられる。気温が低いほど飽和蒸気濃度は低下し、後処理装置内部の着霜量は増加するため、始動温度が低いほど排出時間が長く、また排出濃度が高くなったと解釈できる。なお、始動温度 -25°C と -30°C については再上昇後から40秒間程度は特に値が高くなっているが、これは、図3に示した後処理装置後側のHC濃度の再上昇と対応しており、霜に付着したUHCが水蒸気とともに下流に流れたことによるものと考えられる。始動温度 -10°C と -20°C については比較的速やかにエンジンが始動するため、後処理装置に吸着するUHCが少なく、再上昇時のUHC由来の白煙の重畳は明確に見られなかった。

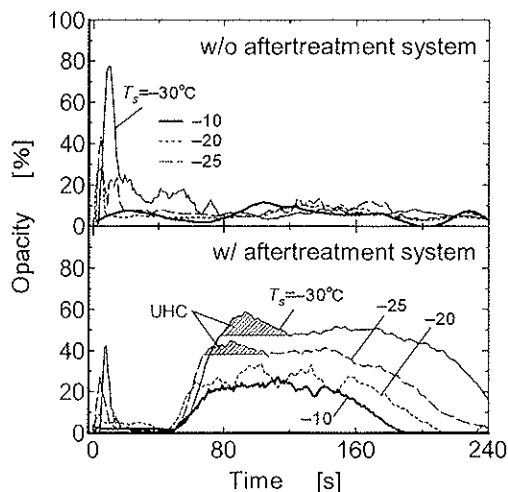


Fig.6 Comparison of white smoke concentration between with and without the aftertreatment system

なお、燃料の蒸留性状を考えると、特3号軽油には灯油留分が含まれているものの、 40°C 程度の排気温度で揮散する成分はごく一部であるため、クランキング時に後処理装置にトラップされたUHCの大半はその後も後処理装置内部に吸着したままであると推測される。実際の車両を用いた試験において、後処理装置の再生時に白煙が発生することが報告⁽¹²⁾されているが、この原因の一つとして、始動時に後処理装置にトラップされた残存UHCが再生時に白煙となって表れることが挙げられる。

3.3. 後処理装置前後におけるHCHO濃度の変化

後処理装置前後のHCHO濃度の時間変化を図7に示す。前後とも始動直後が最も高く、始動から6分後程度にかけて大きく低下し、以降は時間の経過とともに徐々に低下する。また、始動温度が低いほど始動初期の濃度が高くなる傾向が見られる。

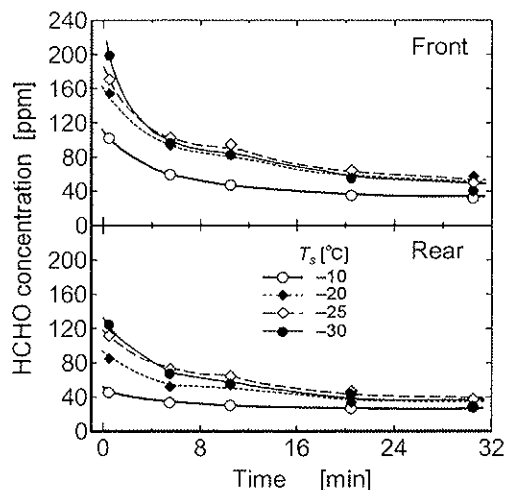


Fig.7 HCHO concentrations at the front and the rear of aftertreatment system

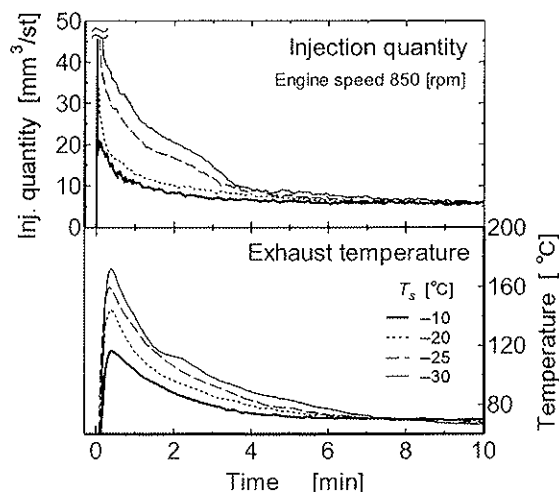


Fig.8 Injection quantity and exhaust temperature at turbocharger turbine inlet

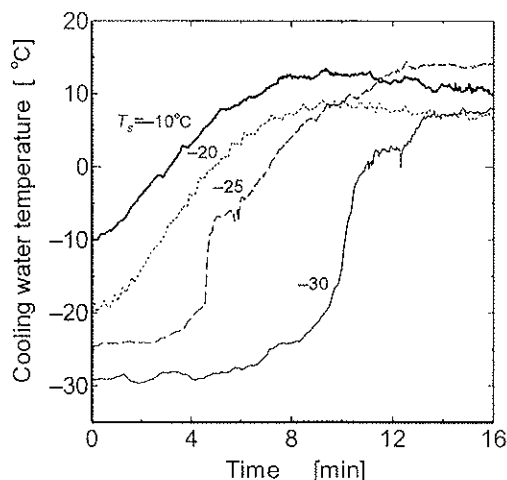


Fig.9 Coolant outlet temperature

図8は燃料噴射量とターボチャージャのタービン入口で測定した排気温度であるが、いずれの始動温度も始動から6分後にかけて燃料噴射量と排気温度が急速に低下する様子がわかる。また、エンジン出口の冷却水温度(図9)を見ると、始動から8~14分程度経過するまでは水温が低く、この間のシリンダ壁温は低いことが示唆されている。

これらから、図7に示したHCHO濃度の結果について以下のように考察できる。すなわち、HCHOは熱炎発生前の低温酸化反応における中間生成物⁽¹³⁾であり、火炎内での生成量は燃料噴射量が多いほど増加するものの、通常は熱炎反応時にHCHOが消費されるため、排ガス中のHCHO濃度はさほど高くはならない。しかし、低温始動時はシリンダ壁温や吸入空気温度が低いいため筒内ガス温度が充分に上昇せず、熱炎反応に至ることなく排出される燃焼ガスが増加するため、排ガス中のHCHO濃度が上昇する。このため、燃料噴射量の多い始動初期においてもっとも濃度が高く、その値は始動温度が低いほど高いものとなる。そして、始動後は暖機が進むとともに燃料噴射量が低下し、また、筒内ガス温度が上昇するため熱炎反応に至る割合が増え、HCHO排出量が低下していくと考えることができる。

図7に示したHCHO濃度について後処理装置前後の比較をすると、いずれの始動温度も後側の方が濃度が低くなっている。藤田ら⁽¹⁴⁾は、低温条件下ではHCHOの酸化触媒表面への物理吸着により見掛けの浄化率が上昇することを報告しているが、本研究も同様の理由により後処理装置後側のHCHO濃度が低下したものと考えられる。

3.4. 後処理装置前後における臭気の変化

間接評価法による臭気評価の結果を図10に示す。後処理装置前後ともに、始動温度が低いほど評価値が高くなる傾向が見られる。また、始動初期の臭気が比較的強いが、これは排ガス中のHCHO濃度の高い時間帯と一致している。しかしな

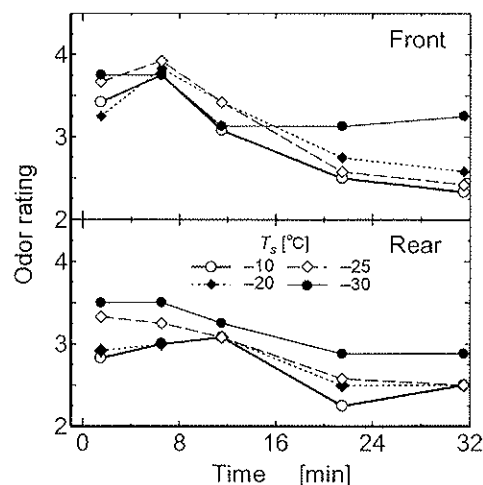


Fig.10 Odor rating at the front and the rear of aftertreatment system

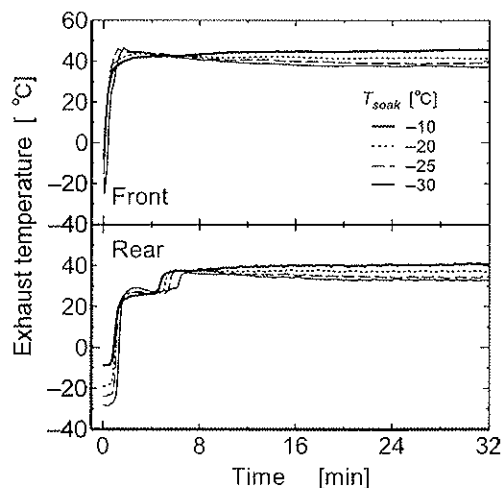


Fig.11 Exhaust temperatures at the front and the rear of aftertreatment system (0~32min)

がら、始動1~2分後における臭気の評価値は6~7分後よりも低いか同程度であり、この点についてはHCHO濃度の結果と異なっている。始動1~2分後については、他の時間帯とは異質な臭いがするとのコメントをしたパネラもあり、HCHO以外の臭気成分の影響が強かったものと推測される。また、間接評価法に使用した排ガスはHCHO評価用にサンプリングした排ガスの後にサンプリングを行っているため、排ガス中のHCHO濃度は図7に示した始動直後(0~1分後)のHCHO濃度よりも低いことが予想され、そのことが影響している可能性もある。

後処理装置前後の比較をすると、前側よりも後側の方が全体的に評価値が低く、特に始動初期の低下が大きい。この理由の一つとして、臭気成分の後処理装置内部の結露水への溶解が考えられる。図11は、図4に示した後処理装置前後の排気温度の始動32分後までのデータである。これを見ると、後

処理装置後側の排気温度が始動5~6分後のところで一段上昇しているのが確認できる。これは後処理装置内部の霜が全て溶けたことを示唆しており、始動から5~6分後までは後処理装置内部に水分が存在することを表すものと考えられる。ディーゼル排気臭の主な成分であるアルデヒド類は水溶性が高いものが多く、後処理装置内部の霜が溶けて生じた水分に臭気成分が溶解したため、始動初期の臭気評価値の低下が特に大きかったものと考えられる。

4. おわりに

ディーゼルエンジンの低温始動時とその後の無負荷暖機運転時の排出ガスに及ぼす後処理装置の影響について調べた。

以下に得られた主な知見を述べる。

- (1) 後処理装置前側のHC濃度は、クランキング中はほとんどの燃料が未燃のままエンジンから排出されるため、クランキング開始直後に高いピークを示す。後処理装置後側については前側よりもクランキング中のピーク値は低いものの、エンジン始動後40秒後付近よりHC濃度が再上昇する。
- (2) 後処理装置前後のCO濃度については、前後において顕著な差は見られない。
- (3) UHCの一部が後処理装置にトラップされるため、クランキング時に排出される白煙濃度は、後処理装置を装着した場合の方が非装着の場合よりも低くなる。後処理装置を装着した場合は、始動後に白煙濃度がいったん低下するものの、その後、排気温度の上昇に伴い再上昇を見せる。
- (4) HCHO濃度は後処理装置前後ともに始動初期が高く、時間が経過するにつれて徐々に濃度が低下していき、20分を過ぎると濃度変化はほとんど見られなくなる。また、前側よりも後側の方がHCHO濃度が低くなる。
- (5) 間接評価法による臭気評価値は始動初期が高く、時間が経過するにつれて低下する。また、始動温度が低いほど評価値が高くなる傾向がある。臭気は後処理装置前側よりも後側の方が弱い。

謝 辞

本研究の実施にあたり、いすゞ自動車(株) 柏倉拓氏、金田祐氏および北見工業大学学生 中田隼人君、池田勇太君の協力を得た。また、実験装置の製作および運用では、北見工業大学技術部 橋本晴美氏、山田忠永氏にご助力いただいた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) T. Tanaka, S. Yasunishi, N. Watanabe and K. Kobashi : Development of a Measuring Meter and a Control Device for Diesel White Smoke, SAE Paper 892044 (1989)
- (2) 張瓏, 南利貴, 高月俊昭, 横田克彦: 直噴ディーゼル機関の白煙に関する基礎的研究(火炎特性と白煙, HCの関連), 日

- 本機械学会論文集(B編), Vol.59, No.559, p.899-904 (1993)
- (3) M.K. Yassine, M.K. Tagomori, N.A. Henein and W. Bryzik : White Smoke Emissions Under Cold Starting of Diesel Engines, SAE Paper 960249 (1996)
- (4) 塩崎忠一, 大谷哲也, 上光勲, 大西孝博: 直噴式ディーゼルエンジンの白煙と臭いの研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.912247, p.57-60 (1991)
- (5) M.M. Roy : HPLC Analysis of Aldehydes in Automobile Exhaust Gas: Comparison of Exhaust Odor and Irritation in Different Types of Gasoline and Diesel Engines, Energy Conversion and Management, Vol.49, No.5, p.1111-1118 (2008)
- (6) H. Shen, T. Shamin and S. Sengupta : An Investigation of Catalytic Converter Performances during Cold Starts, SAE Paper 1999-01-3473 (1999)
- (7) A. Blackwood, T. Tidmarsh and M. Willcock : The Effect of an Oxidation Catalyst on Cold Start Diesel Emissions in the First 120 Seconds of Running, SAE Paper 980193 (1998)
- (8) 竹村純, 高田耕一, 柳澤満彦, 阿部隆春, 木村賢司, 佐藤隆弘: 低圧縮比クリーンディーゼルエンジンの燃焼制御技術, 三菱自動車テクニカルレビュー, No.22, p.34-40 (2010)
- (9) 石谷博美, 常本秀幸, 山田貴延: 小形直接噴射式ディーゼル機関の始動性と青・白煙に関する研究(第4報, セタン価と圧縮比の関係), 日本機械学会論文集(B編), Vol.54, No.507, p.3295-3300 (1988)
- (10) 常本秀幸, 石谷博美, 工藤隆司: 直接噴射式ディーゼル機関の排気臭気の評価方法について, 日本機械学会論文集(B編), Vol.62, No.604, p.4268-4274 (1996)
- (11) M. Arenz, K.J.J. Mayrhofer, V. Stamenkovic, B.B. Bliznac, T. Tomoyuki, P.N. Ross and N.M. Markovic : The Effect of the Particle Size on the Kinetics of CO Electrooxidation on High Surface Area Pt Catalysts, J. Am. Chem. Soc., Vol.127, No.18, p.6819-6829 (2005)
- (12) 横田久司, 小谷野真司, 浅海靖男, 福岡三郎: DPFの大型ディーゼルトラックへの適用実験(2), 大気環境学会誌, Vol.34, No.4, p.310-320 (1999)
- (13) 小酒英範, V.H. Drewes, L. Catalfamo, 飯田訓正, 神本武征: 非定常噴霧内のホルムアルデヒドの2次元可視化, 日本機械学会論文集(B編), Vol.66, No.647, p.1905-1911 (2000)
- (14) 藤田修, 伊藤献一, 姜友, 渡辺伸央: ホルムアルデヒドの自動車用酸化触媒による浄化特性, 日本機械学会論文集(B編), Vol.59, No.565, p.2914-2918 (1993)