

DI ディーゼル機関の排気臭気に対する高圧噴射と酸化触媒の影響*

秋山 二郎^{*1}, 常本 秀幸^{*2}, 石谷 博美^{*2}
ムラリ M. ロイ^{*3}, 南 利貴^{*4}, 野口 雅博^{*4}Influence of High Pressure Injection and Oxidation Catalyst
on Exhaust Odor in DI Diesel EnginesJiro AKIYAMA^{*5}, Hideyuki TSUNEMOTO, Hiromi ISHITANI,
Murari M. ROY, Toshitaka MINAMI, Masahiro NOGUCHI^{*5} Department of Mechanical Engineering, Kitami Institute of Technology,
165 Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido, 090-8507 Japan

Exhaust gas odor in DI diesel engines is reduced mainly by improvement of in-cylinder combustion and by catalytic converter. In this study, the effect of high-pressure injection and an oxidation catalyst on the exhaust odor was investigated by engine with common rail high pressure injection system. At idling condition an injection pressure of 60~80 MPa showed minimum exhaust odor, total hydrocarbon (THC) and the least aldehyde. However the odor reduction by high-pressure injection is not sufficient. The preconditioned catalyst aging under the high temperature reduces exhaust components and odor just after starting due to good adsorption. At the catalyst temperature above 200°C, there were remarkable reductions of odor, but below 200°C, objectionable exhaust odor appears sharply.

Key Words: Diesel Engine, Internal Combustion Engine, Exhaust Odor, Aldehyde, High Pressure Injection, Oxidation Catalyst, Unburned Component

1. はじめに

DI ディーゼル機関は CO₂ 排出量が低く、地球温暖化に対して影響の少ない機関であるが、ガソリン機関と比較して NO_x あるいは PM の排出濃度が高い。その他にも低温およびアイドリング時に発生する排気臭気の問題がある。本研究室ではこれまでに、臭いの発生メカニズムとその低減を目的として、噴射タイミング、燃焼室形状、燃料性状および外気温などの影響に関する多くの研究を行ってきた^{1)~3)}。それらの結果から、壁面付着量を減少させたり、ヘッドクリアランスに侵入する混合気を減少させるなどの改善によって、ある程度は排気臭気の高減が可能であることがわかった。本研究では、さらに高圧噴射システムを装備した機関を用い、燃料噴射条件の影響について検討を行っている。また、ディーゼル機関用の触媒装置が実用化され、排気ガス成分の大幅な低減効果が多数報告されている

が^{4)~6)}、この触媒システムによる臭気成分の高減の可能性について検討を行った。

2. 実験装置および方法

図1は、本研究における使用機器および測定システムの概略を示している。供試機関には、燃料噴射系の電子制御が可能なコモンレールシステムを装備した単

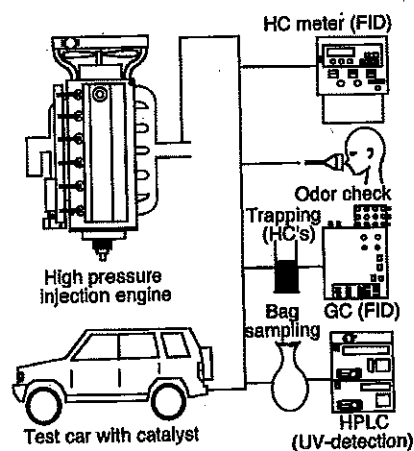


Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

* 原稿受付 2000年8月9日。

^{*1} 学生員, 北見工業大学大学院(〒090-8507 北見市公園町165)。^{*2} 正員, 北見工業大学工学部。^{*3} 正員, 北見工業大学大学院。^{*4} いすゞ自動車(株)(〒252-0806 藤沢市土棚8番地)。

E-mail: tsune@mech.kitami-it.ac.jp

体と、車載された2機のDIディーゼル機関を用いている。表1の機関は、高圧噴射の排気臭気に対する低減効果を調査するために使用し、表2の機関は触媒を取り付けた場合の試験に使用した。ここで使用した触媒は白金系で、アイドル時の空間速度は1時間あたり 3.7×10^4 程度の容量のものである。なお、使用燃料は硫黄分含有量が0.082%、セタン価57のJIS2号軽油である。

臭気を測定する方法として希釈法が一般的であるが、この方法には排気ガス臭の不快感が反映されておらず、また臭気室と希釈ガスの取り扱しも簡便ではないため、本研究では排気ガスを直接評価する方法で行った。この場合の臭気強度の評価尺度を表3に示す。また、臭気評価を行うパネラーが経験者でない場合、パネラー間の評価に大きな差が生じるが、経験が豊富なパネラーの場合、信頼性の高い評価結果が得られることがわかっており⁹⁾、本研究においては3名の経験豊富なパネラーによって評価を行っている。

Table 1 High pressure injection engine specifications

Engine type	4-st. DI diesel engine
Number of cylinders	6
Bore × Stroke	115 × 125 mm
Swept volume	7799 cc
Compression ratio	16.8
Injection system type	Common rail, electronic control, 2-way magnetic valve nozzle

Table 2 Catalyst fitted engine specifications

Engine type	4-st. DI diesel engine
Number of cylinders	4
Bore × Stroke	95.4 × t04.9 mm
Swept volume	2999 cc
Compression ratio	19
Injection system type	Common rail, Hydraulically actuated Electronically controlled injector

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; long time exposure not possible
5	Very strong	Very irritating odor; exposure for even 1 or 2 seconds impossible

なお、臭気レベルにおける1ポイントの差は、臭気性ガス濃度で10倍の差に相当することが報告されている⁷⁾。従って、臭気レベルにおける1ポイントの低下は、排気臭気にとって大きな改善であると言える。

排気中に含まれるアルデヒド化合物は、臭気および刺激成分の主要なものである⁸⁾。本研究では、アルデヒド化合物を分離・分析するために高速液体クロマトグラフ (HPLC) を使用した。ここでは、各化合物に対応する誘導体を形成するために、排気ガスを一旦バッグにサンプリングした後2-4ジ・ニトロフェニルヒドラジン (DNPH) を注入して反応させ、誘導体を生成した上で4種の化合物 (ホルムアルデヒド・アセトアルデヒド・プロピオンアルデヒド・アクロレイン) を分析している。なお、排気中に含まれるその他のアルデヒド化合物濃度はきわめて低く、成分の特定が困難であった。THC濃度はシリンダ内の燃焼状態を評価するとともに、触媒反応の良否を判断するためにも使用した。また、アルデヒド化合物以外のHC成分の影響を知るためにガスクロマトグラフ (GC) による排気ガスの成分分析も行っている。なお、実車のTHC濃度および排気臭気の測定に用いた試験車両の概要および機関の種類を表4に示している。

3. 実験結果および考察

3.1 ディーゼル機関とガソリン機関の比較

図2は、外気温度0~5℃のもとで1時間のアイドルリング運転を行った後の、ガソリン機関およびディーゼル機関搭載車における排気臭気の測定結果を示す。なお、表4で示した試験車両は、走行距離が車両間で大幅な差があり、劣化などによって触媒の反応に影響

Table 4 Detail of the tested vehicles

Vehicle No.	Engine type	Swept Vol. (liter)	Cruising length x10 ³ km	Catalyst
A	MPI	1.3	13	with
B	MPI	2.0	77	with
C	MPI	2.0	20	with
D	DIG	1.8	55	with
E	DIG	2.4	12	with
F	DIG	1.8	0.5	with
G	IDI	3.0	70	without
H	IDI	2.8	120	without
I	DDI	2.8	75	without
J	DDI	3.1	0.8	with

MPI: Multi Point Injection (Gasoline)
 DIG: Direct Injection Gasoline
 IDI: Indirect Injection Diesel (Swirl chamber)
 DDI: Direct Injection Diesel

している可能性がある。また、この実験では臭気評価を行う際に、直接法と間接法の2種類の評価方法を採用しており、直接法はテールパイプ部からのガスを直接評価し、間接法では車両間で異なる排気ガスの流速や温度の影響を低減するために、排気ガスを一旦バッグに捕集し、その後、ガス流速および温度を一定として評価を行った。

図2に示すように、いずれの評価法においても、DI ディーゼル機関は触媒反応が正常なガソリン機関と比較して約1.5ポイント高くなっている。また、DI ディーゼル機関の1台には触媒が装着されているが、触媒の臭気に対する影響はあまり認められない。これは、アイドリング運転時の排気温度が110℃程度であり、この温度帯では触媒反応が進行しないためである。なお、DIとIDI ディーゼル機関の臭気の差はDIの方が約0.5ポイント高いが、IDIの場合にはスワール室内での渦により良好な混合気形成が実現できているためと考えている。一方、ガソリン機関ではDIおよびMPI方式にかかわらず、排気臭がDIディーゼル機関程度の車両がある。これは、車両の積算走行距離が長く、触媒性能の低下した車両もあるが、触媒の取り付け位置によっては新車の場合でも触媒の反応が十分に進まないため、逆に中間生成物が多量に生成されたためと思われる。

図3は、種々のエンジンタイプにおけるTHC濃度、ホルムアルデヒドおよび他の主要アルデヒド化合物3種の合計濃度を示している。THCの最高値は数台のガソリン機関搭載車から測定されたが、最低値もガソリン機関搭載車の中に存在する。このように、正常な触媒反応が起こっているガソリン機関からの排出濃度は、ディーゼル機関と比較して低い。触媒反応が十分でない場合、臭気とともにディーゼル機関の10倍近いTHCを排出する。また、DIディーゼル機関からはIDIディーゼル機関よりも高いTHC濃度が検出されている。

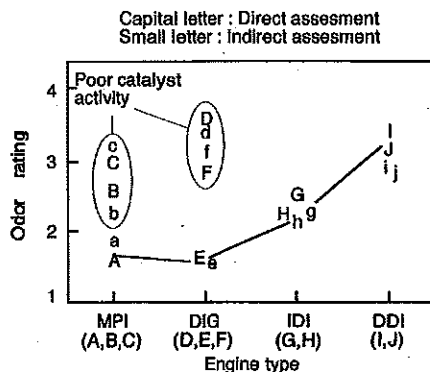


Fig.2 Odor emission in different types of engine (A~J: Car No., see Table 4)

アルデヒド成分の中では、ホルムアルデヒド濃度が最も高く、ガソリン機関およびディーゼル機関における臭気強度の傾向と類似しており、臭気強度の指標として利用が可能と思われる。最も高いアルデヒド濃度は、THCと同様に触媒状態が正常ではないDIガソリン車から排出されているが、正常なMPIガソリン車の排出濃度が最も低くなっている。トータルアルデヒドもDIディーゼル機関とIDIディーゼル機関を比べると、THCと同様にDIの方が高い値を示している。しかしながら、THC濃度が高いMPIおよびDIガソリン車の場合でもホルムアルデヒド以外のアルデヒド成分は低い値を示しており、排気臭気の傾向とは異なっている。

3.2 高圧噴射の効果

図4は、排気臭気、アルデヒド化合物4種の合計濃度（以下トータルアルデヒド濃度）およびTHC濃度に対する燃料噴射圧力と噴射タイミングの影響を示している。なお、噴射圧力は20MPa~120MPa、噴射タイミングは15°BTDC~TDCまで変更して実験を行った。また、機関回転数は高圧噴射時の機関安定性を考慮して約900rpmに設定し、冷却水温はサーモスタットの制御温度である約83℃の条件で実施した。

図4(a)の排気臭気から明らかなように、いずれの噴射タイミングにおいても噴射圧20MPaで強く、60~80MPaで改善された後に、80MPa以上で再び悪化している。タイミングを変更した場合には、15~5°BTDCでの差は少ないが、TDC噴射では噴射圧60MPa以下で臭気強度の顕著な増加が認められる。

図4(b)と(c)は、排気中に含まれるトータルアルデヒド濃度とTHC濃度を示している。測定結果は臭気強

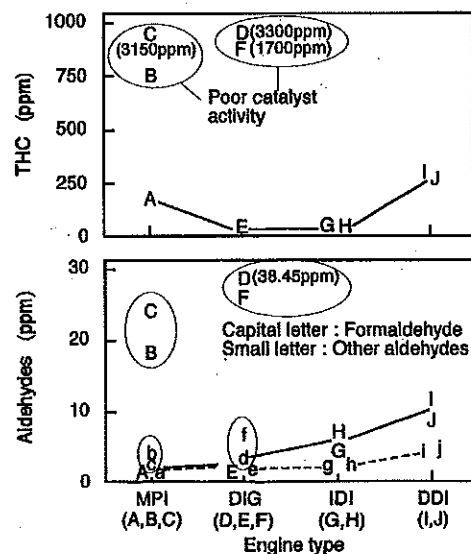


Fig.3 THC and aldehyde concentrations in exhaust gases of different engines

度と同様の傾向を示しており、アルデヒドおよび THC 濃度とともに 60~80MPa 付近で最小値となり、80MPa より高くなると再び増加する。また、臭気と同様に TDC 噴射では、最も高いトータルアルデヒドおよび THC 濃度が検出されている。このように 60~80MPa の噴射圧で臭気強度、トータルアルデヒドおよび THC 濃度が最も低い値を示したのは、混合気形成過程の変化にともなう燃焼状態の改善が考えられる。

図 5 は、種々の噴射圧力において噴射タイミングを 15°BTDC~TDC まで変更した場合の、燃焼圧力および熟発生率を示している。図から、いずれの噴射タイミングにおいても噴射圧力を 20MPa から 60MPa まで高圧化すると、着火遅れ期間は 2~3°CA 短縮される。この結果、高圧化にともない燃料粒径が小さくなって蒸発が進むとともに、燃焼室壁面への付着量が減少し、THC の減少および臭気が改善されたものと考えている。しかし、60MPa よりも高圧の領域では着火遅れ期間に差異は認められない。一方、高圧噴射を行った場合、噴霧内への空気を取り込みが改善され、燃料噴霧体積が増加し、希薄混合気が形成されることが報告されている⁹⁾。このことは、噴射圧 60MPa の場合と 100MPa では着火遅れ期間が同等であるので、高圧噴射時の方が、オーバーリーンとなって着火に至らない混合気が形成されることになり、この影響で臭気や THC が若干悪化したものと思われる。

なお図 4 で示したように、5~15°BTDC の噴射タイミングでは、臭気、THC およびアルデヒドとも非常に

類似した排出傾向を示しているが、TDC 噴射では強い排気臭気を伴い、臭気成分の排出濃度も高くなっている。この場合の着火開始点は上死点后 6~8°CA になっており、膨脹行程で発生する逆スキッシュの領域で燃焼が進むことになる。従って、シリンダ内のガスに大きな乱れが生じて低い温度領域で燃焼が進行すること、あるいは逆スキッシュによってヘッドクリアランスに流れ込む混合気が増加する可能性があり、オーバーリーンと同時に局部的に消炎を引き起こしていることが考えられる。このように、高圧噴射による排気臭気の改善は可能であるが、臭気に対する許容レベルまで改善されているとは言えない。そこで次に、酸化触媒を使用した排気後処理の効果について検討を行った。

3.3 酸化触媒の効果

3.3.1 アイドリング時の触媒反応 触媒に関する実験は、表 2 に示す機関を搭載した実車でやっているが、この場合の触媒はマニホールドから約 1 m 下流に設置している。

図 6 は、触媒装着の有無によるマニホールドからテールパイプまでの排気ガス温度の変化状況を示している。図 6 (a) より、マニホールド部の排気温度は、機関始動から約 2 分後で最も高くなっている。この時間帯

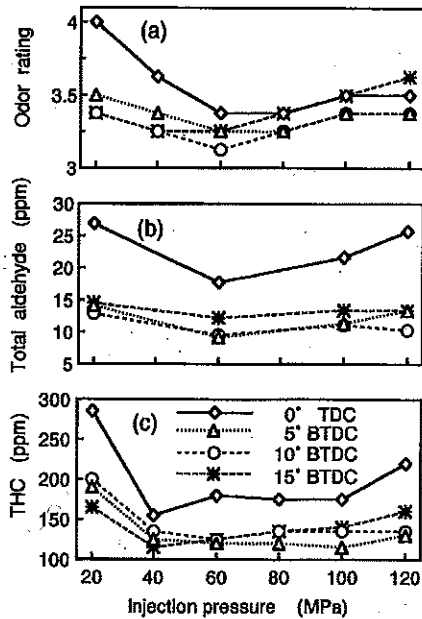


Fig.4 High pressure injection effect on odor, total aldehyde, and THC emissions

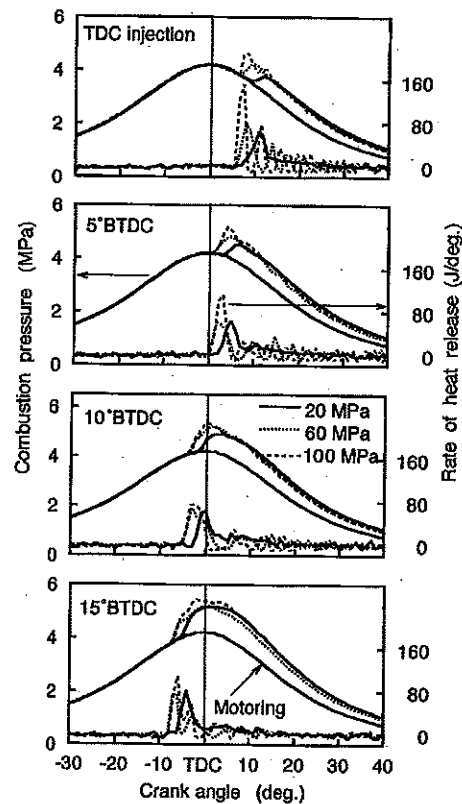


Fig.5 Combustion pressure at different injection timings and various injection pressures

においては、機関各部の摩擦損失が大きいことにより、燃料流量が増加しているためである。始動後 10 分を経過すると排気ラインのガス温度は、ほぼ一定となり、触媒中心部の最高温度は約 110℃になる。また、触媒装着の有無による排気ラインの温度差は排気出口で数℃あるものの全体としては少ない。また図 6 (b)より、始動後 2 分ではマニホールドからテールパイプまでの温度降下は約 90℃と大きい。排気管長が 3 m であることから、排気管 1 m あたりの温度降下は約 30℃である。一方、機関始動後 30 分では、この単位長さあたりの温度降下は約 10℃に減少している。従って、触媒を現在の位置から可能な限りマニホールドに近づけて設置しても、暖機後であれば触媒温度の上昇は 10℃程度である。

ここで、触媒の反応状態を調査するために、機関回転数を 800rpm に設定し、3 種類の運転条件で実験を行った。運転条件は、触媒中心温度が約 70℃の機関始動直後、約 120℃の暖機終了後、さらに暖機後に機関回転数を 3000rpm まで上げて 5 分間保持した後に、800rpm に戻して 2 分後に測定を行ったものである(触媒中心温度約 200℃)。これらの条件は『始動直後』、『暖機後』および『高速アイドリング運転後』と表記している。

図 7 は、触媒装着の有無による THC 濃度と排気臭気

の測定結果を示している。THC はいずれの運転条件においても触媒の装着により若干低下するが、排気臭気の改善は、始動直後および暖機後においてほとんど認められない。しかし、高速アイドリング運転後における臭気強度は触媒装着によって約 0.25 ポイント低下している。なお、始動時に比べ暖機後では THC 濃度が高いにもかかわらず、臭気は若干低くなっている。これは図 8 のアルデヒド濃度から考察する事ができる。すなわち、始動直後では HC の一部が排気系に凝結して排出濃度が低下するものの、燃焼状態が悪いためホルムアルデヒドなどが発生する。しかし、アルデヒドは沸点が低く凝結しないで放出されるため臭気の差となって表れる。

なお、触媒装着の有無によるアルデヒドは始動直後および暖機後でも変化がなく、ホルムアルデヒドのよ

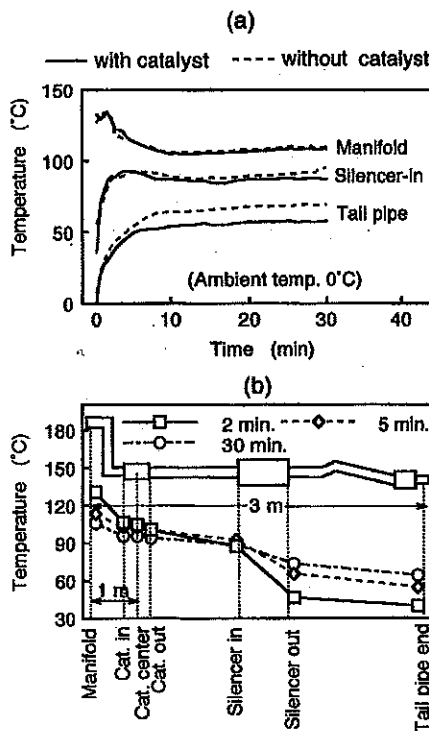


Fig.6 Temperature pattern from manifold to tail pipe with and without catalyst

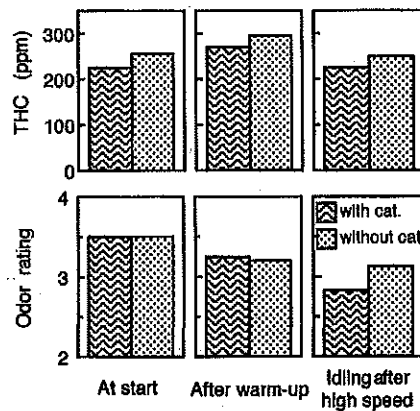


Fig.7 THC and exhaust odor during idling with and without catalyst

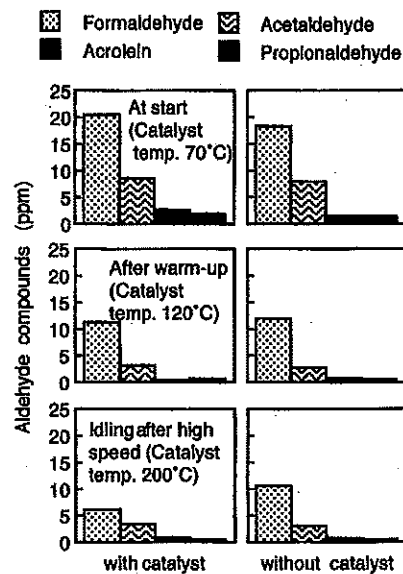


Fig.8 Comparison of aldehydes at idling with and without catalyst

うな成分に対しても触媒反応は確認できなかった。一方、高速アイドリング運転後では触媒によってアルデヒド濃度は低減されており、特にホルムアルデヒドは約 40% 減少している。従って、200℃以上の触媒温度が維持できれば、排気臭気の改善が可能であると考えられる。

3.3.2 高温条件下での触媒反応 通常のアイドリング運転では触媒温度が低いため、触媒の反応が十分でなく臭気との関係が確認できなかった。ここでは、運転条件を変更することにより触媒温度を約 650℃まで上昇させ、その後の臭気あるいは排気特性を調べた。なお、車両走行後、計測までに触媒温度は約 450℃まで低下するが、この温度帯においても完全な触媒反応が継続されていたため、以下の実験における測定開始点は 450℃とし、その後の 60 分間のアイドリング運転において測定を行った。

図 9 は、上記運転パターンにおける、時間経過に対する触媒中心温度、THC 濃度および臭気強度を示している。触媒温度は測定開始後 15 分で約 125℃まで低下し、その後はほぼ一定値になっている。なお、運転時間が 8 分に達するまでは触媒温度は 200℃以上の状態にあり、この温度領域ではごくわずかな臭気と、数 ppm の THC 濃度から明確な触媒反応が確認できる。一方、8 分以降では温度の降下により完全な触媒反応は得られないが、触媒なしの場合と比較すると、臭気強度で 0.5 ポイント、THC では 100ppm の低減が見られる。これは、表面が浄化された場合の触媒層における吸着作

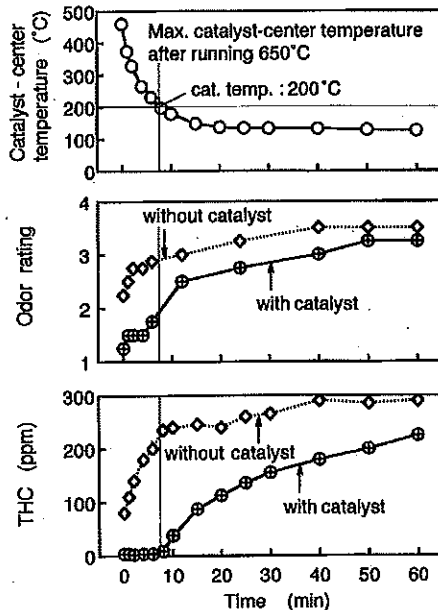


Fig.9 Exhaust odor and THC with and without catalyst after hot exhaust condition

用によるものと思われる。

また、触媒を装着していない場合でも、高温での運転後では排気温度が高く、測定初期の数分間にわたり臭気および THC 濃度は低い値を示している。これは、燃焼室壁面が高温であるために燃料の付着量が減少し、アルデヒドの発生しやすい燃焼パターンが減少したためと考えている。

一方、図 10 は、この場合のアルデヒド化合物 4 成分の排出状況を示している。図 10(a)の触媒を装着した場合、8 分以内ではアルデヒド類はほぼ検出されず、その後は装着していない場合と類似した結果となっている。また、図 10(b)の触媒を装着しない場合でも、測定初期には排出量が少なく、高い壁面温度によりシリンダ内燃焼が活性化されていたことがわかる。

なおアイドリング運転を継続すると、触媒の有無に関わらず不快な排気臭気が発生する。この場合の臭気強度は同等ではあるが、臭気の質が異なっている。そこで、HC 排出成分の構成状態を調べるために GC による分析を行った。図 11 は、3 種の運転条件における分析結果を示している。触媒温度が約 450℃の測定開始

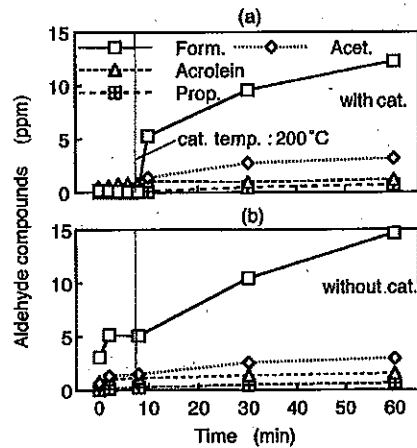


Fig.10 Aldehyde compounds at idling with and without catalyst after hot exhaust condition

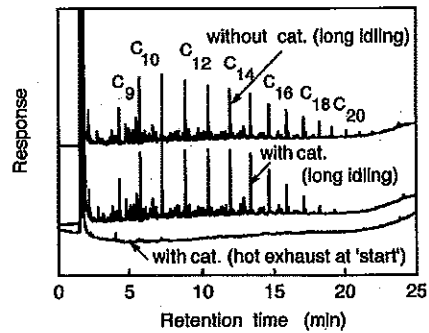


Fig.11 Gas-chromatogram at hot exhaust condition, with and without catalyst

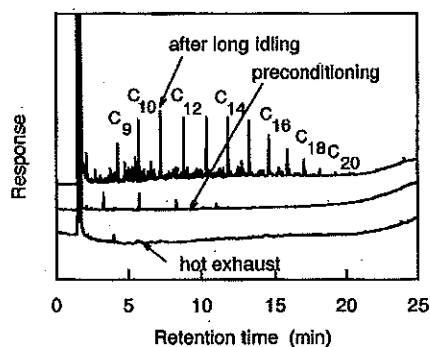


Fig.12 Adsorption capability of catalyst

時には、全沸点範囲でHC成分は検出されていない。また、ロングアイドリングを行い、臭気レベルが同一となった条件でのHC成分は触媒がない場合と非常に似通っている。しかし、高沸点成分に若干の相違点が存在する。すなわち、触媒を装着している場合に高沸点成分の含有量が少なくなっているが、これは触媒の吸着作用によるものと考えられる。これらの成分が臭いの質に影響を与えていることも考えられるが、さらに詳細な調査が必要である。

また図12は、触媒の吸着性を比較した結果である。触媒温度が高い場合(hot exhaust)は触媒での酸化反応によってほとんどの成分が浄化されている。一方、高温運転を行って触媒表面を清浄化し、翌日始動した直後の触媒の場合(preconditioning),触媒は酸化反応条件に達していないが、吸着作用により多くの成分が減少している。この場合の臭気もロングアイドリング後の臭気に比べ約0.5ポイント改善されており、吸着作用の活用は今後の臭気低減方法の一つと考えられる。

4. 結 論

本研究では、燃料の高圧噴射と酸化触媒の排気臭気に対する影響について種々検討を行った。その結果、以下のような結論が得られた。

(1) ガソリン機関とディーゼル機関を比較した場合、触媒が正常に反応しているガソリン機関であれば、ディーゼル機関に比べて約1.5ポイント臭気レベルが低い。しかし、触媒反応が低下すると、DIディーゼル機関と同等あるいはそれ以上の臭気が発生する。

(2) アイドリング運転の場合、排気臭気に対する最適な燃料噴射圧力は60~80MPaである。この圧力範囲では、着火遅れ期間がもっとも短く、壁面付着燃料が

少なくなるため排気中のアルデヒド化合物とTHC濃度が減少し、臭気が低減されている。なお、噴射圧力が低い場合、壁面付着量が増大すること、一方噴射圧力が高すぎた場合、オーバーリーンの混合気が増大することなどにより、最適範囲が存在したと考えられる。

(3) 今回使用した触媒の場合、触媒層温度が200℃以上になると、THCとアルデヒド化合物の浄化割合は90%以上となり、排気臭気は1ポイント以上改善できる。しかし200℃を下回ると、次第に不快な排気臭気が発生しており、触媒層温度を維持することが臭気低減に対する課題となる。

文 献

- (1) Colin. Ingram, Diesel Exhaust Odour of small, High Speed, Direct Injection Engines, SAE Paper 780114 (1978).
- (2) T. Tanaka and et al., Development of a Diesel Odor Measurement Method and its Application to Odor Reduction, SAE Paper 920726 (1992).
- (3) M. M. Roy and et al., Effect of Injection Timing and Fuel Properties on Exhaust Odor in DI Diesel Engines, SAE Paper 1990-01-1531 (1999)
- (4) S. T. Gulati and et al., Ceramic Wall-Flow Filters and Oxidation Catalyst Supports for Diesel Exhaust Aftertreatment, Proceeding of IPC-9, (1997), 15-21.
- (5) Y. Kiyota and et al., Development of Diesel Particulate Trap Oxidizer System, SAE Paper 860294 (1986)
- (6) M. Horiuchi and et al., The Effects of Flow-through Type Oxidation Catalysts on the Particulate Reduction of 1990's Diesel Engines, SAE Paper 900600 (1990)
- (7) 大喜多敏一, 重田芳広, 微量ガス・悪臭の分析, 講談社, (1972), 117-216.
- (8) 塩崎忠一, ほか3名, 直噴式ディーゼルエンジンの白煙と臭いの研究, 自動車技術会秋季講演会前刷集 No. 912247 (1991).
- (9) T. Minami and et al., Analysis of Fuel Spray Characteristics and Combustion Phenomena under High Pressure Fuel Injection, SAE Paper 900438 (1990).