

DMEを燃料とするクリーンディーゼルエンジンの研究開発（第6報）

—吸蔵還元型触媒のNO_x低減効果に関する基礎調査—

環境研究領域 ※李 晟旭 佐藤 由雄 高柳 智光 野田 明 山本 敏朗

1. はじめに

ディーゼルエンジンは高い熱効率が得られることから、省エネルギーやCO₂の排出低減の面でも有効な熱機関である半面、排気ガス中のPMやNO_xなどによる大気汚染は大都市地域の環境問題を深刻化させている。このような状況から、近年、ディーゼルエンジンの低公害燃料としてジメチルエーテル (Dimethyl Ether, 以下 DME) の利用が注目されている¹⁾。

DME はセタン価が高く、圧縮着火が可能なことから、ディーゼルエンジン並みの高い熱効率が得られる。しかも、排出ガス中には黒煙や硫黄酸化物を含まずPMも極めて少ない。しかしながら、NO_x に関してはディーゼル並みの排出レベルであることから、その対策が求められている。DME エンジンのNO_x 対策として、大量 EGR が有効であるが、なお、一層のNO_x 低減を行うためには排気中のNO_x を触媒により浄化する必要がある。

そこで、本研究では単気筒 DME エンジンにNO_x 吸蔵還元型 (NO_x Storage Reduction, 以下 NSR) の触媒を装着し、NSR 触媒によるNO_x 低減効果に関する基礎調査を行った。

2. NO_x 吸蔵触媒のメカニズム

NSR システムの通常の運転条件である希薄 (以下リーン) な状態では、NO_x は貴金属上で酸化されて主に硝酸塩の形でNO_x 吸蔵材に吸蔵される。吸蔵されたNO_x は、排気中への燃料添加により過濃 (以下リッチ) な雰囲気形成させると、NO_x 吸蔵材からNOと多量の活性酸素が放出される。NO_x は排気ガス中のHC、COにより還元され、窒素となる。このようにリッチ、リーンの切り替

えを最適に制御することでNO_xの低減が可能となる²⁾。

3. 実験装置および方法

3. 1. DME エンジン

エンジン実験には表1に示す排気量1.05Lの単気筒ディーゼルエンジンをベースエンジンとして用いた。燃焼室はベースディーゼルエンジンと同じく圧縮比18.1のトロイダル型である。実験システムはコモンレール式燃料噴射システム、クーラー付きEGRシステム、そしてNSRシステムで構成されており、図1にその概要を示す。

Table 1 Engine Specifications

| | DME engine | Diesel engine |
|------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| Type | 4-stroke, Troidal single cylinder | ← |
| Bore & Stroke mm | 108×115 | ← |
| Displacement cm ³ | 1053 | ← |
| Compression ratio | 18.1 | ← |
| Injector hole dia. mm | φ 0.5×5 holes | φ 0.2×5 holes |
| Injection pressure MPa | 20–35 | 60–110 |

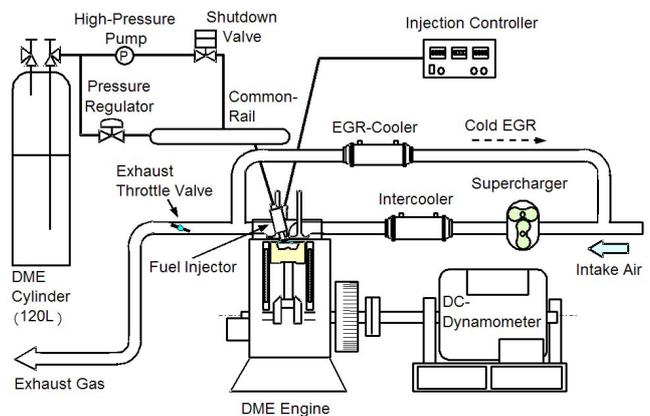


Fig.1 Experimental apparatus

3. 2. NSR 触媒

表 2 に実験に用いた 2 種類の触媒をまとめた。触媒 A は Pt/Rh で構成されており、触媒 B は Pt/Pd で構成されている。両方とも同寸法で容積は 2.47L である。

エンジン試験に用いた NSR システムは図 2 に示すように、リッチ条件を作り出すためのインジェクター、リッチスパイクを制御するためのコントロール装置、そしてデータの表示と保存のためのパソコンおよびインターフェースで構成されている。空燃比 (以下 A/F) はジルコニア (ZrO₂) センサーを、CO, NO_x および THC の濃度はそれぞれ NDIR, CLD, HFID 分析装置を利用した。

Table 2 Catalysts specifications

| | Components | Size (φ × L) | Characteristics |
|-----------------|------------|--------------|--|
| Type A Catalyst | Pt/Rh | 144 × 152 | <ul style="list-style-type: none"> Low temperature activity Improvement of NO_x reaction |
| Type B Catalyst | Pt/Pd | 144 × 152 | <ul style="list-style-type: none"> Low temperature activity Improvement of HC reaction |

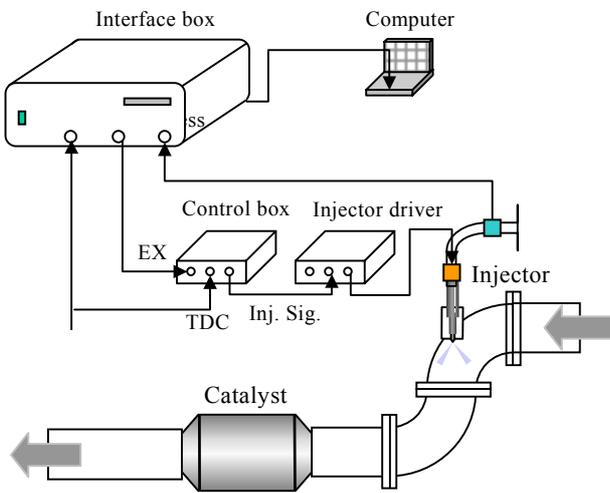


Fig.2 NSR System

3. 3. 実験方法

実験では、まず、比較的広い温度範囲において高活性を示す触媒を選定するためのエンジン試験をエンジン回転数 1280rpm 一定の条件で実施した。触媒単独の温度制御は困難であるため、エンジン負荷により触媒の温度を変更した。次に、高い浄化性能を持つ触媒を用いて還元剤の投入

による触媒前後での NO_x 浄化特性、温度、A/F、排気ガスの変化および EGR の影響を調べた。さらに還元剤の噴射方法、噴射間隔等について基礎的な調査を行った。

4. 実験結果および考察

4. 1. エンジンの排出ガス特性

図 3 に単気筒エンジンの各負荷における排出ガスおよび温度の基本特性を示す。負荷が高い領域での排気ガス温度は最大 500°C まで上昇するが、触媒入口での温度は配管からの放熱により 400°C 程度となる。NO_x は最大 500 ppm まで増加し、THC は高負荷ほど低減するが CO は全負荷に近いトルク 50Nm 付近で急上昇している。

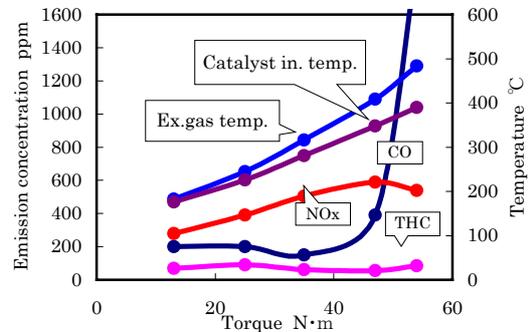


Fig.3 Exhaust gas characteristics (1280 RPM)

4. 2. リッチスパイク時の NO_x 挙動

図 4 に NSR システムにおけるリッチスパイクを行った時の、触媒前後での温度、THC 変化、NO_x などの基本特性を示す。エンジンの運転条件は回転数 1280 RPM, 100% 負荷, EGR なし, リッチスパイクの条件は噴射指令時間が 15 ms, 噴射周期が 60 sec で行った。DME の理論空燃比は 8.9 であり、還元反応が起こるためには、リッチスパイクをこの値を下回る条件を与える必要がある。

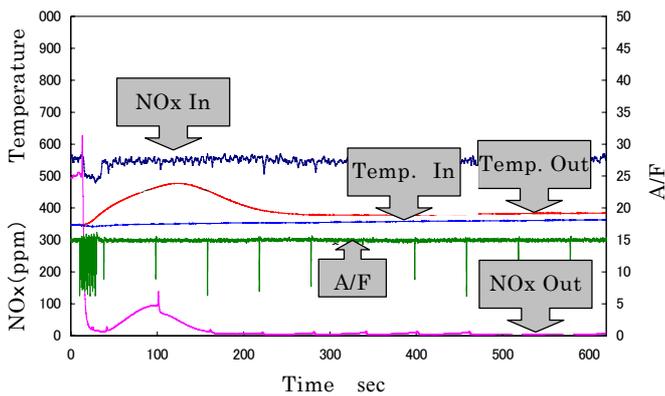
運転初期では、触媒の活性化と吸蔵された NO_x を放出するため 20 回の連続的なリッチスパイクを行った。このような連続スパイクの後、NO_x は急激に下がるが、直ぐに増加する傾向となった。これは連続スパイクにより温度が急上昇し、NSR 触媒の反応温度ウィンドーを外れたためである。触媒の入口温度と出口温度の違いからわかるように投入された DME が酸化され出口の温度がより高くなっている。その後、触媒反応温度ウィンドーまで下がり、リッチスパイクを一定間隔

で行うと NSR 触媒は 100% 近い高い NO_x 浄化率を示す。

図 5 に低負荷運転領域における触媒 A を用いた試験結果を示す。低負荷領域では触媒出入口温度は約 200℃ 付近に止まり、活性温度より下回っている。この理由から低負荷領域における NO_x の高い浄化率は得られにくいため、エンジン制御による抑制、そして EGR とリッチスパイクの最適化が必要とされる。

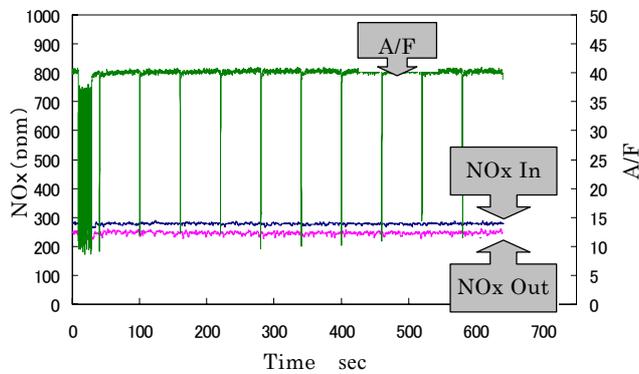
4. 3. 触媒の浄化特性

図 6, 7 に触媒 A と B の浄化特性をそれぞれ示す。二種類とも 300℃ を越えると高い浄化率を示している。触媒 A の場合、300℃ 以下の低い温度範囲でも比較的高い浄化率を示している半面、触媒 B の場合は 250℃ を越えたところで浄化率が急上昇しているのがわかる。これらの結果から広い温度範囲で浄化率が高い触媒 A を選定した。



1280 RPM, 100% Load, Inj_{duration} 15 ms, Inj_{cycle} 60 sec, EGR off

Fig.4 Basic characteristic of type A catalyst



1280 RPM, 20% Load, Inj_{duration} 15 ms, Inj_{cycle} 60 sec, EGR off

Fig.5 Catalyst performance in low load condition

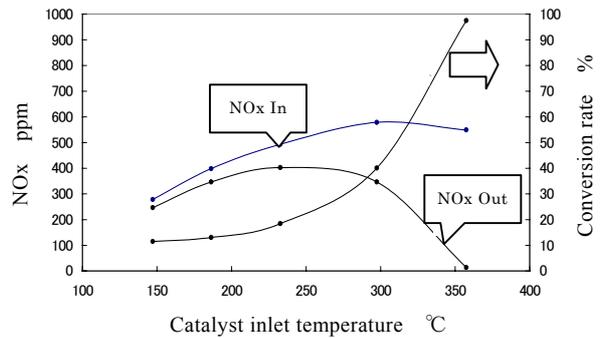


Fig.6 Characteristic of type A catalyst

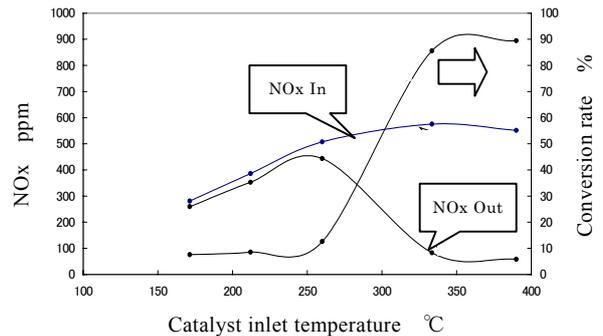
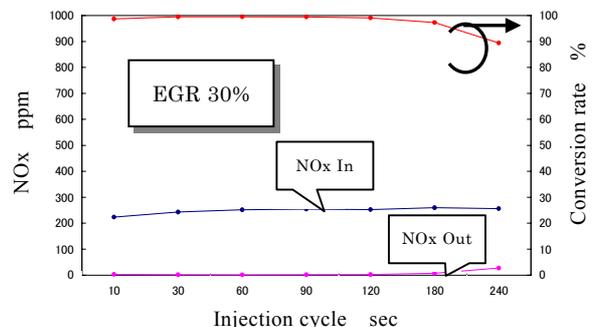
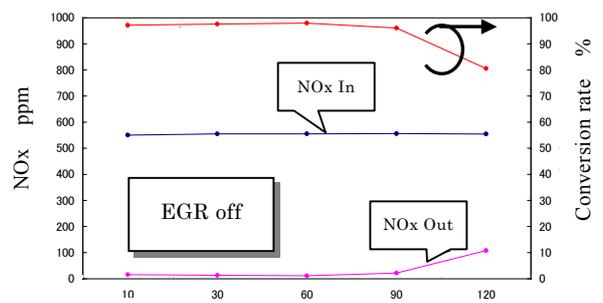


Fig.7 Characteristic of type B catalyst

4. 4. EGR 時の浄化特性

図 8 に EGR の有無による NO_x の浄化率を示す。EGR なしの条件では、NO_x の浄化率は噴射周期が 90 秒を超えると低下し始まるが、EGR ありの条件では、リッチスパイクの投入周期が 2 倍である 180 秒を超えても NO_x は 90% 以上の高い浄化率が得られた。



1280 RPM, 100% Load, Inj_{duration} 15 ms

Fig.8 Effect of EGR on NO_x conversion rate

つまり、EGR を適用することでスパイクの投入周期を伸ばすことができ、燃費の悪化を抑える面でも非常にメリットがあると考えられる。これはEGRによりエンジンから排出されるNO_x排出量が半分近く低減され、単位時間あたりで触媒に吸蔵されるNO_x量が減ったためである。以上の結果から、EGRは排気中のNO_xを減らすだけではなくNO_x吸蔵触媒の性能にも重要な役割を果たしていることがわかった。

4. 5. リッチスパイク時の THC 挙動

図 9 にリッチスパイクを与えたときの触媒入口、出口のNO_xおよびTHCの変化の一例を示す。触媒入口におけるTHCは1000ppm近い値を示しているが、触媒の酸化反応によりおよそ4分の1まで下がる。しかし、酸化反応により低減されてもまだ、初期段階では200ppmを超える高い濃度を示しており、今後、スパイクの制御によりスリップする未燃炭化水素の最小化とともにNSR触媒後に酸化触媒の装着などの対策が必要であると考えられる。

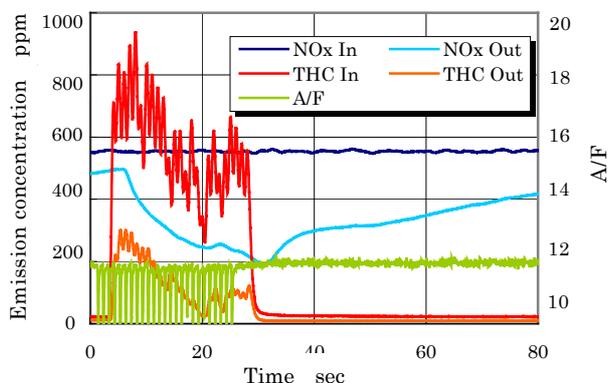


Fig.9 Effect of rich spike on slipped THC

5. ま と め

単気筒 DME エンジン試験により吸蔵還元型触媒の NO_x 低減効果に関する基礎調査を行った結果、次のような結果が得られた。

1. 吸蔵還元型 NO_x 触媒を利用し DME エンジンから排出される NO_x を低減できることがわかった。しかしながら、80%以上の NO_x 浄化率を得るための触媒の温度は 300℃以上である。
2. EGR を適用すると排気中の NO_x 排出量が低減し、さらに CO および未燃ガスの増加によりリッチスパイクの回数を減らすことができる。
3. 還元剤噴射による燃費のロスを考慮すると、EGR を含むエンジン制御が必要である。

謝 辞

本研究にあたり多大な協力を頂いた小林 啓樹氏に紙面を借りて深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) S.C. Sorenson and Svend-Erik Mikkelsen; Performance and Emissions of a 0.273 Liter Direct Injection Diesel Engine Fuelled with Neat Dimethyl Ether, SAE Paper 950064.
- (2) Kiyomi Nakakita; Research and Development Trends in Combustion and Aftertreatment Systems for Next-Generation HSDI Diesel Engines, R&D Review of Toyota CRDL Vol. 37 No. 3
- (3) Y. Sato, A. Noda, T. Sakamoto and Y. Goto; Performance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine Operated on Dimethyl Ether Applying EGR with Supercharging, SAE 2000-01-1809
- (4) S. Kajitani, C. L. Zhen, M. Konno and K. T. Rhee; Engine Performance and Exhaust Characteristics of Direct-Injection Diesel Engine Operated with DME, SAE Paper 972973.