

大型DMEトラックの開発プロジェクト（第2報）

— NO_x 低減触媒システムの開発 —

環境研究領域 ※ 李 晟旭 佐藤 由雄 高柳 智光 鈴木 央一 安 乗一
日産ディーゼル工業(株) 中村 明 土屋 孝幸 戸田 憲二

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利な半面、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、ディーゼルの低公害代替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一方、排出ガス中には黒煙や硫酸化物を含まず 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。すすを発生しない DME エンジンの NO_x 対策として大量 EGR が有効であるが、今後の厳しい排出ガス規制を考慮し、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 6 気筒大型 DME エンジン用の吸蔵還元型の NO_x 触媒システムを試作し、還元剤の噴射方法及び制御アルゴリズム等を検討した。これらの噴射方法とアルゴリズムの最適化により本プロジェクトの目標値である NO_x レベル 0.5g/kWh（JE-05 過度運転モード）以下を達成することを狙いとした。

2. NO_x 吸蔵還元触媒のメカニズム

通常のエンジン運転条件である希薄（以下リーン）な状態では、NO_x は NSR 触媒の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）な雰囲気を形成させると、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 6.9 L の 6 気筒ディーゼルエンジンを DME 用に改造したエンジンを用いた。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。実験システムは列型ジャーク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 にその概略図を、図 2 に写真をそれぞれ示す。

Table 1 Engine Specifications

	DME engine	Diesel engine
Type	4-stroke, 6 cylinder Turbo, Intercooler	<- <-
Bore & Stroke mm	108×126	<-
Displacement L	6.925	<-
Compression ratio	17.5	<-
Injector hole dia. mm	φ 0.37×6 holes	φ 0.2×5 holes
Target performance	199kW/2700 rpm 716Nm, /1400 rpm	<-

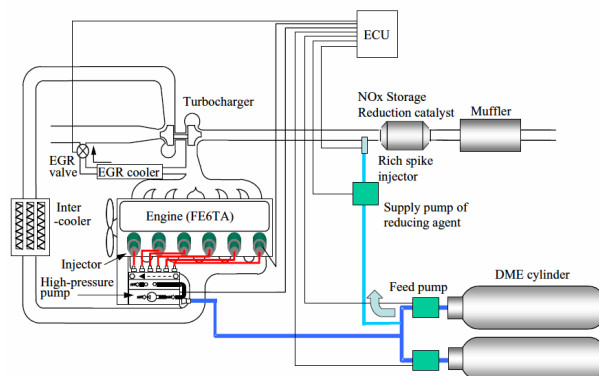


Fig.1 Experimental apparatus

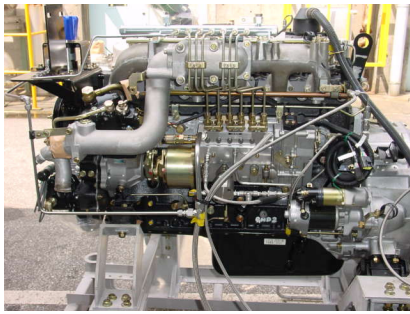


Fig.2 DME Engine

3. 2. NOx 吸蔵還元 (NSR) 触媒システム

表 2 と図 3 に触媒の諸元と温度に対するその浄化特性を示す。本触媒は前年度単気筒エンジンを
用いた触媒選定試験の結果から Pt/Rh 系の触媒を
使用することにした。この触媒は比較的広い温度
範囲で良い浄化率が得られており、エンジンの排
気量を考慮して触媒の容積を 8.1 L にした。NSR
触媒を設置するにはリッチスパイク制御による
スリップする HC を抑制するため、容量 5L の
酸化触媒を NSR 触媒後に設置した。リッチスパ
イク用インジェクターは多量の還元剤を瞬時に
投入するため、4 本を配管中に取り付けた。

エンジンベンチ試験に用いた NSR システムは
図 4 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、リッチスパイクの制御とデータ
収録のためのパソコンで構成されている。ジルコ
ニア (ZrO₂) センサーを用いて空燃比 (以下 A/F)
を、NDIR, CLD, HFID 分析装置を利用して CO,
NOx および THC の濃度を触媒前後でそれぞれ
計測した。

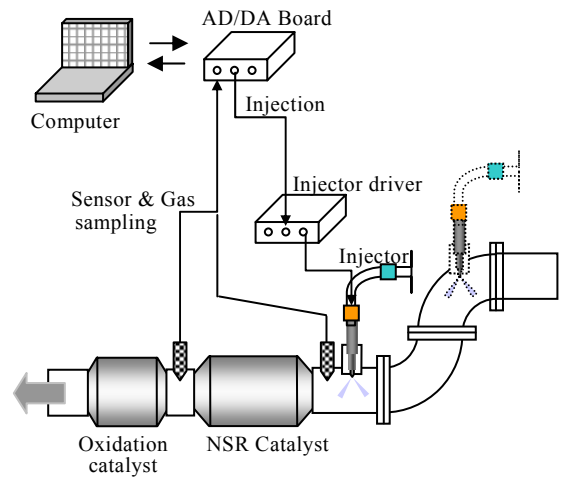


Fig.4 NSR System

3. 3. 実験方法

実験では、まず、NOx を効果的に低減させるた
め、リッチスパイク位置 (図 4 参照) や噴射圧力
による NOx 低減効果を調査した。これらの結果
をもとに NSR システムを構築し、燃費悪化を最
小限に抑えながら NOx を効果的に減らすための
リッチスパイクの制御アルゴリズムを作成しそ
の評価を行った。

2005 年度からは 3.5 t を超える重量車について
従来の 13 モード試験に代わり、図 5 に示す走行
パターンをベースとした過度運転モードに変更
する予定である。排出ガス試験は、走行パター
ンをエンジンごとに回転数と負荷率のパターンに
変換することによりエンジンベース試験を行い、
その排出ガスの評価を行った。

Table 2 Specifications of NSR catalyst

Component & Size	Characteristics
Pt / Rh 144×152 (φ×L)	-Low temperature activity -Improvement of NOx reaction

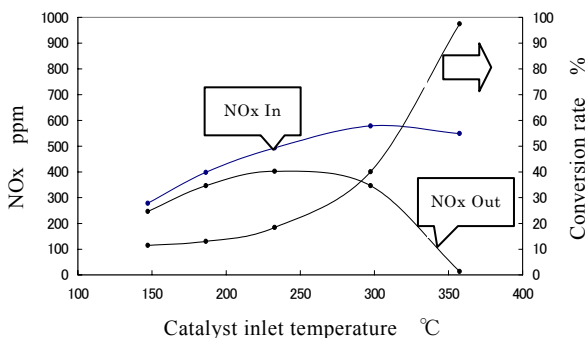


Fig.3 Characteristic of NSR catalyst

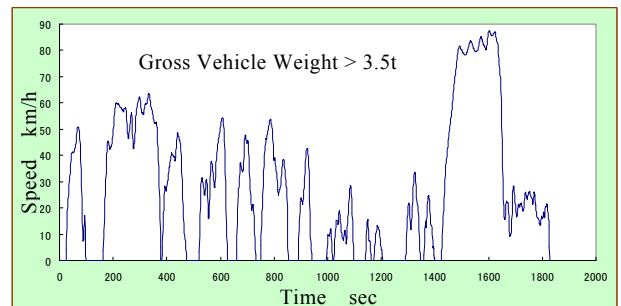


Fig.5 Transient driving test mode (JE-05)

試験の順番は表 3 に示すように最初は DME エ
ンジンのベース試験、EGR を適用した試験
(NSR, 酸化触媒なし)、EGR と NSR 触媒のリッ
チスパイク制御による試験の流れで行った。制御
1 から 4 に行くほど、リッチスパイク噴射量と噴

射間隔を精密化した制御であり、さらに触媒の活性化を図るため、排気系の保温を行ったのが制御5になる。リッチスパイク制御試験ではNSR触媒に還元剤としてDME燃料を間欠的に投入しているため、燃費への影響が懸念される。そこで、リッチスパイクの投入量を最小限抑制しながら高いNOx浄化率を得るためのアルゴリズムを制作し、そのフローチャートを図6にまとめた。

エンジンからは回転速度、アクセル開度を、触媒からは温度およびNOx濃度のデータをNSR触媒のリッチスパイク制御に用いた。これらのデータはパソコンに読み込まれた後、リッチスパイクの可否を判定し、還元反応が起こりうる条件を満たした場合はエンジンと触媒の条件に応じて噴射量および噴射間隔を制御するような仕組みになっている。この制御により行った過度運転試験後には、燃費、NOx、NMHCへの影響を評価し、制御アルゴリズムの再設定と試験を繰り返し行い、制御アルゴリズムの最適化を図った。

Table 3 Experimental method

Base	Base engine condition	without NSR & oxidization catalyst
EGR	EGR Control	
Rich spike control (with NSR + Oxidization catalyst)		
Control 1 -> 4	Optimization in an injection quantity & interval	
Control 5	Thermal insulation in exhaust system and intake throttle	

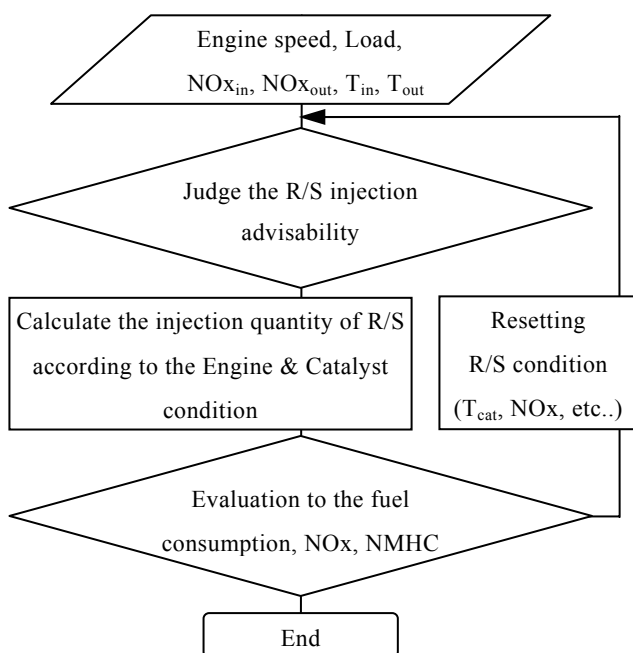


Fig.6 Experiment flow chart

4. 実験結果および考察

4. 1. 過度運転モードでのエンジン基本特性

図7に過度運転試験におけるDMEエンジンのエンジン回転、負荷、エンジンからのNOx濃度、触媒平均温度、空燃比をそれぞれ示す。これらはNSR触媒前の結果であり、NSRシステムのリッチスパイクは行わなかった。これらの結果からNOxはエンジン負荷と類似した挙動を示しており、それに伴って触媒の温度も変化している。触媒の温度は1500秒付近で最大350℃まで上昇するが、それ以外の運転ではほとんどが250℃以下の低い温度を示した。空燃比に関しては大量EGRによりDMEの理論空燃比近くに達していることがわかる。

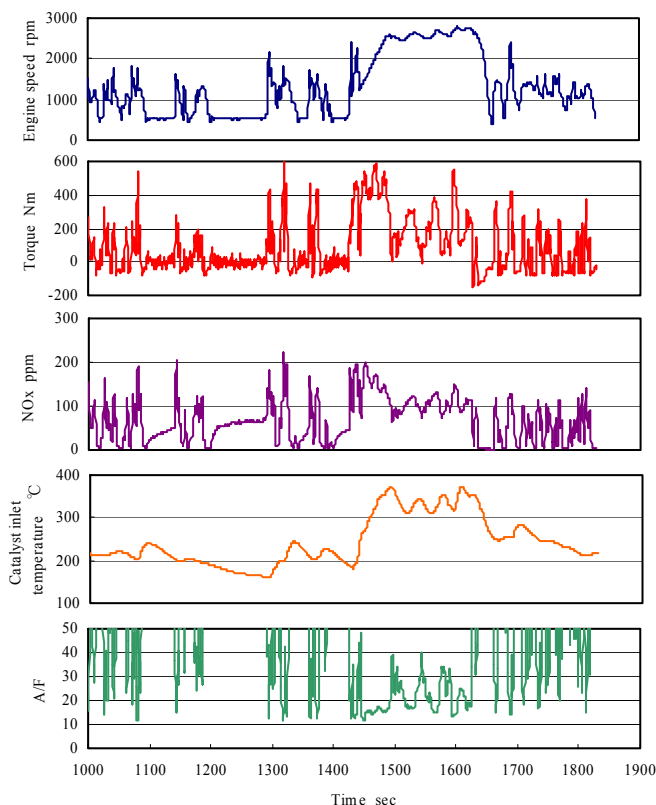


Fig.7 Results of JE-05 transient driving mode (Second half, Without NSR system and control)

4. 2. NSRシステムの構築

4. 2. 1 リッチスパイク噴射圧力の検討

NSRシステムを構築するにあたり、リッチスパイクの噴射圧力、投入位置によるNOx浄化率への影響を調べた。図8にリッチスパイクの噴射圧力によるNOx浄化率とTHCの濃度を示す。まだ、試験途中であるため、それほどNOx浄化率が得

られていないが、噴射圧力による結果からは 12MPa の高圧でリッチスパイクを噴射すると明らかに NOx 浄化率が高いことがわかる。これは高い噴射圧力ほど時間当たり投入される還元剤の量が増え、理論空燃比より深くリッチスパイクが可能となり、効果的に NOx が還元されるためである。一方、噴射圧力が低い 2 MPa では噴射期間を 100, 200, 300msec まで延ばし噴射してもリッチスパイクによる空燃比が理論空燃比まで到達せず十分な還元雰囲気を作れなかったと考えられる。したがって、リッチスパイクは短い時間に多量の還元剤を投入することが必要である。

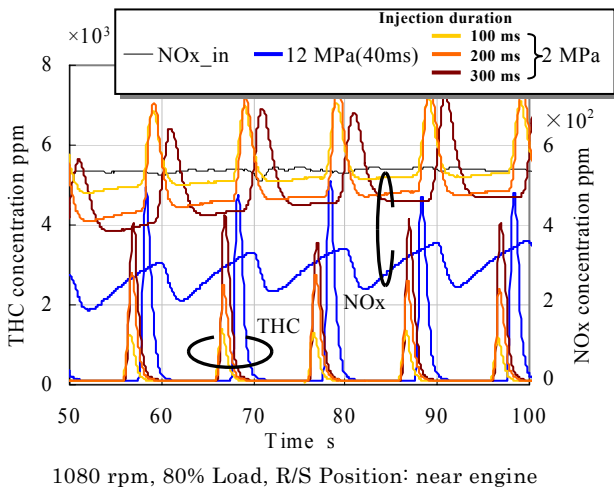


Fig. 8 Effect of rich spike injection pressure

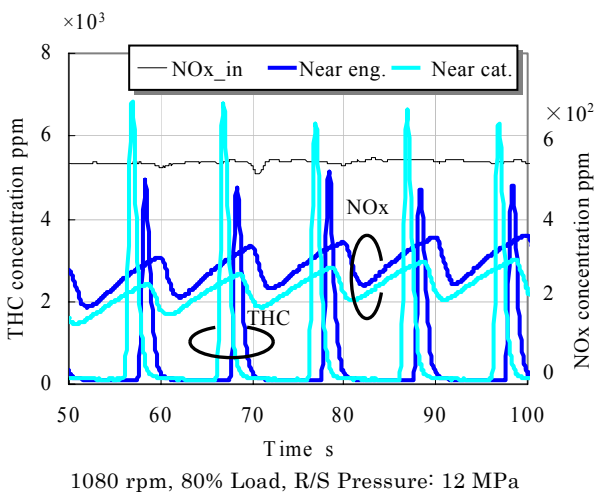


Fig. 9 Effect of rich spike injection position

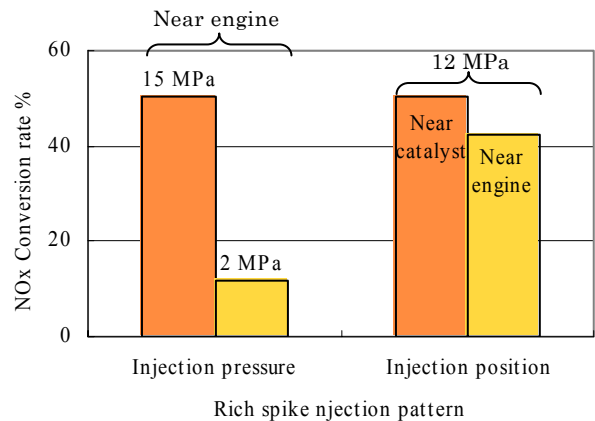
4. 2. 2 リッチスパイク噴射位置の検討

図 9 はリッチスパイクの投入位置 (NSR 触媒直前, エンジン排気マニホールド直後) による結果を示す。NOx 浄化性能は触媒付近でリッチスパイクを噴射した方が多少改善されている。これは触媒から離れた排気マニホールド直後で投入すると噴射された燃料の酸化と排ガスとの攪拌とが促進され触媒入り口での THC 濃度が薄まり、これによって NOx 浄化率も多少悪化している。THC のピーク濃度の低下もこのことを示唆している。

以上の結果を図 10 に NOx 浄化率としてまとめた。ここで NOx 浄化率は

$$(\text{NOx}_{\text{触媒入り口}} - \text{NOx}_{\text{触媒出口}}) \times 100 / \text{NOx}_{\text{触媒入り口}}$$

と定義した。リッチスパイクは高圧, 触媒近い位置で投入した方がより高い NOx 浄化率が得られることから NSR システムを設置し, 過度運転試験で各制御アルゴリズムにより最適化を行った。



1080 RPM, 80% Load

Fig. 10 Effect of rich spike injection pattern

4. 3. 過度運転モード試験

新長期規制に適用予定の過度運転モード試験 (JE-05 モード) における DME エンジンの排出ガスの評価を行った結果を図 11 と 12 に示す。

図 11 に一連の試験をグラフ化した結果を示す。NOx と燃費との関係からは EGR を適用することにより燃費は多少悪化するが, NOx は半分以上低減された。その後, リッチスパイク制御を行うと NOx は減る傾向を示すが, リッチスパイク分を含む燃費とのトレードオフ関係になる。しかしながら, リッチスパイク制御を精密化, 最適化することで最終的には本研究で設定した目標値を達成した。一方, CO に関してはベース運転条件から

NSR 触媒と酸化触媒を装着するだけで、目標値である 2.22g/kWh には十分満足する結果となった。しかしながら、NMHC に関しては目標値である 0.17g/kWh に近づいているものの、目標値を満足していない。今後、エンジンの燃焼系および排気系での NMHC 対策が必要であると考えられる。

図 12 に過度運転モードにおける触媒温度および NOx の濃度を時間履歴で示した。EGR 運転条件から制御アルゴリズム 1~4 に行くほど触媒の平均温度は高く、NOx の浄化も向上していることがわかる。吸蔵は可能であるが、還元反応は起こらない運転領域、つまりアイドルおよび負荷が低い運転領域では触媒を吸蔵に働かせる一方、還元反応がおこる 300℃以上ではエンジンの運転条件に応じて還元剤を投入するような制御を行った。そのため、触媒の平均温度は上昇し NOx の浄化率も改善されたと考えられる。また、排気系の保温とそれに合わせて制御を行うことにより触媒はさらに活性化され、NOx は目標値 (0.5g/kWh) を下回る 0.35g/kWh まで低減することが可能となった。

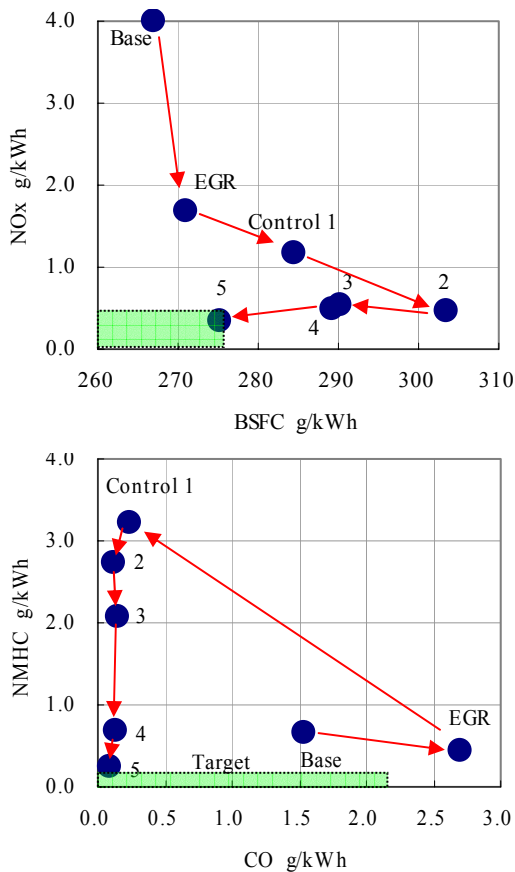


Fig.11 Exhaust emissions & fuel consumption

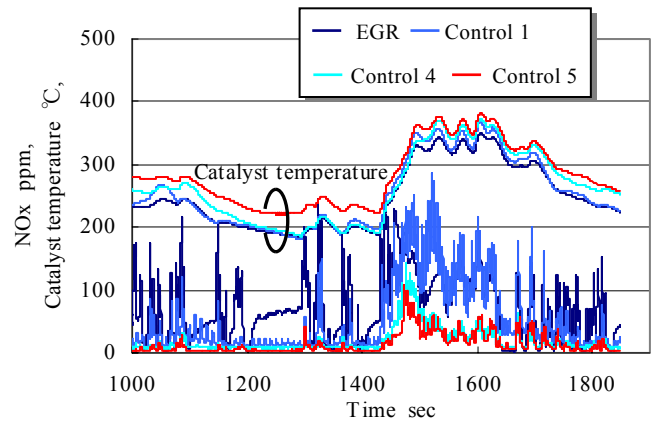


Fig. 12 Effect of rich spike injection pattern (JE-05 second half)

4. 4. リッチスパイク時の HC 挙動

以上、製作した NSR システムおよび制御アルゴリズムにより、NOx, CO の目標を達成することが可能になった。しかし、NMHC については目標値 (0.17g/kWh) に近づいているものの目標達成には、今後、燃焼系および排気系での対策が必要とされる。そこで、エンジンおよびリッチスパイク制御を行ったときの HC 挙動について詳しく調べた。

図 13 にリッチスパイク制御を行ったときの触媒出口での THC 濃度を示す。制御 1 の場合、リッチスパイクを一定の間隔で噴射する一番単純な制御であり、その場合、1%を超える多量の THC がスリップされる。制御の精密化、最適化を進むにつれてスリップされる THC の濃度は激減していることがわかる。しかしながら、精密に制御を行っても触媒出口における THC 濃度はまだ 1000ppm を超える高い濃度を示しており、今後、スリップされる未燃炭化水素の最小化および除去などの対策が必要であると考えられる。

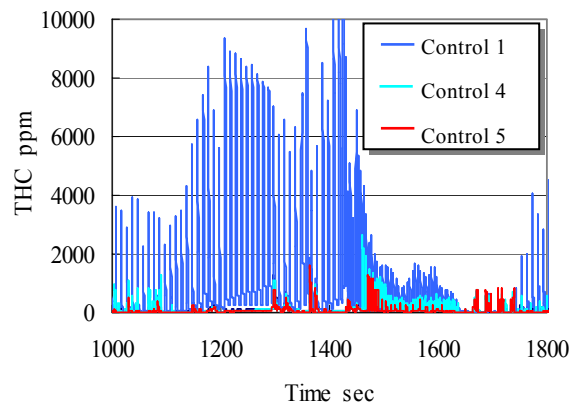


Fig.13 THC on NOx conversion rate (JE-05 second half)

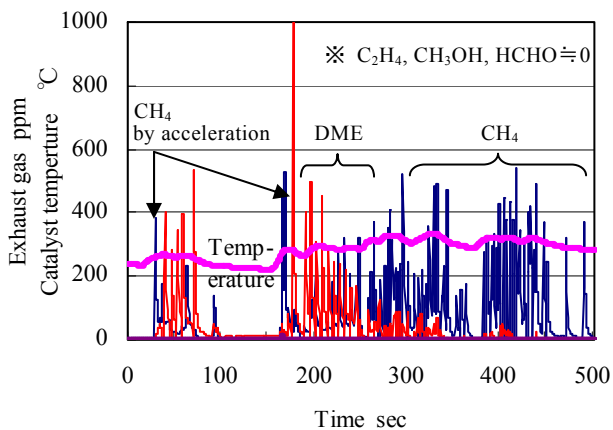


Fig.14 Effect of EGR on NOx conversion rate

さらに、FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer) を用いてスリップされるTHCの詳細成分を調べた。その結果を図15に示す。モード試験開始から30秒経過すると発進と同時にエンジンから多量のCH₄が発生する。エンジンの加速により触媒の温度が上昇するとリッチスパイクが開始されるが、そのほとんどは反応せずにDMEそのままがスリップされる。その後、アイドルを挟んで再び発進が開始すると前回と同じくCH₄が最初に発生する。また、リッチスパイク制御が開始されると初期にはDMEがスリップされるが、触媒温度が300°Cを超える250秒付近からはほとんどがCH₄に変化して排出される。つまり、還元剤として噴射されたDMEはNSR触媒温度300°C付近で酸化反応が起こり、そのほとんどがCH₄として変換されるため、本リッチスパイクを噴射する触媒温度として重要な温度である。一方、それ以外のC₂H₄, CH₃OH, HCHOに関してはほぼ0に近い値を示し、他有害成分への変化は見られなかった。

5. ま と め

大型 DME エンジン用の NSR システムを試作し、排ガス低減効果を調べた結果、次のような知見が得られた。

1. NSR システムのリッチスパイクの噴射圧力は高く、触媒の近くに投入した方が効果的である。
2. 試作した NO_x 吸蔵還元型触媒 (NSR) システムにより NO_x および CO 排出量をそれぞれ目標値である 0.5g/kWh, 2.22g/kWh 以下に低減することが可能となった。
3. NMHC の目標達成には今後エンジン燃焼系と排気系における対策が必要である。
4. 燃費ロスを最小限に抑えるため、アルゴリズムの更なる最適化を実施する。

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.
- (5) 李 晟旭; 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-, 交通安全環境研究所, 2003年

