13

SKYACTIV-D用NO_X後処理システムの開発
Development of NO_X Aftertreatment System for SKYACTIV-D

中野　洋平*1　Yohei Nakano
上杉　康範*2　Yasunori Uesugi
荒木　崇至*3　Takashi Araki
勝田　真斗*4　Masato Katsuta
藤井　皓平*5　Kohei Fujii
佐藤　義志*6　Yoshiyuki Sato

要　約

ディーゼルエンジンは，CO_2排出量が少ない内燃機関として，欧州を中心に技術進化しながらシェアを拡大してきた。同時に窒素酸化物（NO_X）による大気汚染抑制のために，NO_X低減技術開発が盛んに行われている。欧州では長年運用されてきたNew European Driving Cycle（NEDC）による規制が，実用と乖離があることが勘案され，排出ガス規制の国際調和を目指す世界統一試験サイクル Worldwide harmonized Light duty Test Cycle（WLTC）に加えて，Real Driving Emissions（RDE）規制が2017年9月から施行された。2012年に発売したSKYACTIV-D 2.2は，低圧縮比と高効率過給をキーイネーブラとした燃焼コンセプトにより，トルクフルで伸びやかな加速性能，クラストップレベルの低燃費，NO_X後処理を必要としない環境性能を実現した。本稿では，SKYACTIV-Dのコンセプトを継承しつつ，更なる低エミッション化を目指して導入したNO_X低減技術とモデルを活用した開発プロセスについて，またモデルベース開発（以下MBD）を実現するために構築したSelective Catalytic Reduction（以下SCR）モデルについて報告する。

Summary

As internal combustion engines emitting low CO_2, diesel engines have expanded the market share mainly in Europe. At the same time, aiming to control air pollution caused by NO_X, NO_X reduction technologies have been actively developed. As the gap between the contents and reality of the long-time used NEDC was indicated in Europe, RDE regulation came into force in September 2017 in addition to the WLTC. The 2012 SKYACTIV-D 2.2 adopts a low compression ratio and efficient supercharging technology as key-enablers to realize strong and expansive acceleration, class-top fuel economy and clean emissions without the after-treatment system of NO_X. This paper reports on the NO_X reduction technology and a model-based development process to achieve further low emission, and SCR model constructed to realize the model-based development.

1. はじめに

SKYACTIV-D 2.2は，低圧縮比と高効率過給をキーイネーブラとした燃焼コンセプトにより，トルクフルで伸びやかな加速性能，クラストップレベルの低燃費，NO_X後処理を必要としない環境性能を実現した(1)。本稿では，そのコンセプトを継承しつつ，更に進化した新型エンジン(2)での，NO_X低減技術について報告する。またMBD実現のために構築したSCRの物理化学1Dモデルについて報告する。

2. RDEについて

2.1　RDE規制の特徴

従来の排出ガス規制であるNEDCに対する主な変更点は，テストサイクルと環境条件の適用範囲である（Table 1）。特にRDEのテストサイクルは，要件適合し認可されたさまざまなコースが設定でき，車載式排出ガス測定システム（PEMS）を用いた路上走行でのNO_X排出量の精査が特徴である。そのため，さまざまな運転状況や環境面での外乱を前提としたNO_X低減能力が必要とされる。

*1，4　走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance Development Dept.
*2，3　エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.
*5　エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.
*6　技術研究所
Technical Research Center

Table 1　Emissions Regulation in Europe

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Standard	Euro 6c	Euro 6d-TEMP			Euro 6d		
Test Cycle	NEDC	WLTC/RDE					
NOx Standard (mg/km)	80	80/168(CF2.1)			80/114(CF1.43)		
Air Temp. (degC)	25±5	3～30 (Moderate)			0～30 (Moderate)		
		-2～below 3, 30～35 (Extended)			-7～below 0, 30～35 (Extended)		
Altitude (m)	-	0～700m (Moderate)					
		700～1300m (Extended)					

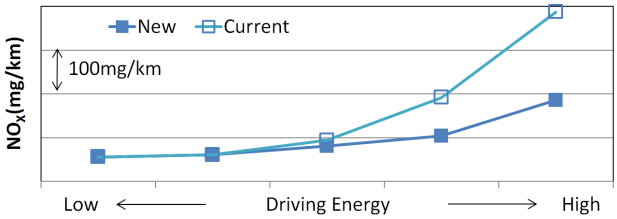


Fig. 2　Raw NO_X Potential of New Engine

2.2　欧州市場における加速の強さ

Fig. 1 に各エミッションテストサイクルでの，車速と加速度の関係を示す。Artemisは，欧州のさまざまな機関によるプロジェクトにより作成されたテストサイクルで，RDEの開発に広く活用されている。また過去，欧州市場走行データを解析した結果を併せてプロットしている。この加速度は常用での上限に相当するが，RDE（Artemis）の加速度は，これと同等レベルであることが分かる。

RDE規制には，運転のアグレッシブ度合い（加速度の大小）を制限するために，車速に加速度を乗じた指標がガイドラインとして設定される。Artemisはこのガイドライン内にあり，更に激しい加速度も頻度によっては許容される。そのため欧州市場においては，市街地から高速道路まで全面的にNOx低減可能な技術が必要である。

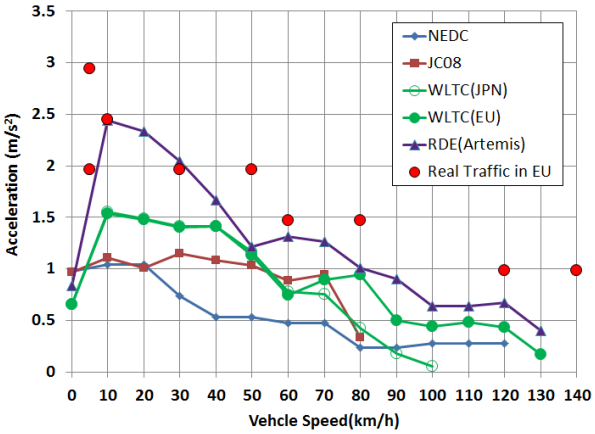


Fig. 1　Vehicle Speed vs Acceleration

3. 開発コンセプト

前記の全面的なNOx低減と，SKYACTIV-Dの更なる進化を目指して，下記コンセプトにて開発に取り組んだ。

① SKYACTIV-Dのコンセプトの進化 － 人間中心の走りと更なるNOx低減

② SKYACTIV-Dに最適な欧州市場向けUrea-SCRシステムの開発

③ モデルベース開発（MBD）の活用

新型エンジンでは，CO_2を低減し，走り性能と静粛性を改善しながら，更なるエンジン排出NOx（以下Raw NOx）低減を実現した（Fig. 2）。横軸は各エミッションテストサイクルを走行エネルギーが低い順に左から並べている。

しかし2章で述べたように，欧州市場での運転や環境因子のダイナミックレンジを考慮すると，更にNOxは増加する。更なるEGR増量や燃焼時期の遅角によるNOx低減は，今回実現した走り性能，静粛性及び燃費性能の低下につながる。これら商品性を妥協しないために，欧州向けにはNOx後処理システムを採用した。

SKYACTIV-Dの強みである低NOx排出領域と，欧州特有の高回転高負荷領域でのNOx低減機能の強化を勘案して，高い排ガス温度域で優れたNOx浄化性能を発揮するUrea-SCRシステムを選択した。

4. MBDによるNO_X機能配分

4.1　機能展開とモデル構築

NOx低減機能をエンジン側とSCR側で配分するため，Raw NOx，SCRへの流入ガス条件，SCR浄化効率について機能展開を行った。Fig. 3に示すとおり，多くの影響因子に支配される。

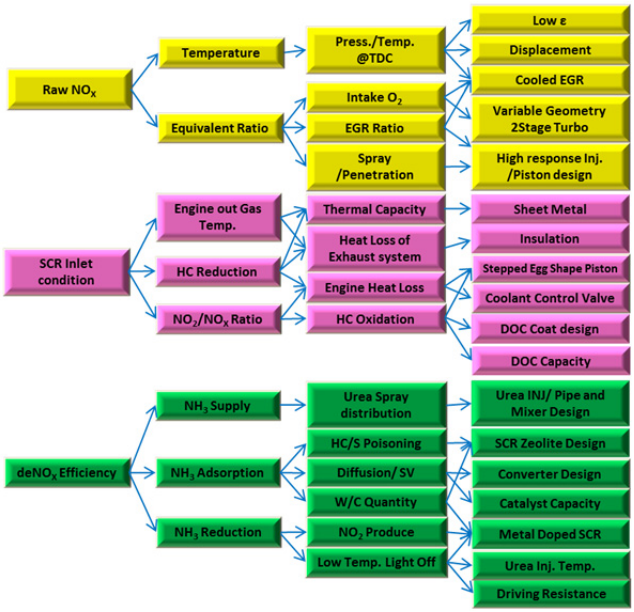


Fig. 3　Exploded Views of Function for NO_X

欧州の実路走行条件，加速度の大きさ，環境条件において，各因子を考慮し，高性能なSCRシステムの仕様を決定しなければならない。新型エンジンの開発では，この際の重要な影響因子への要求を，機能目標として管理しながらシステムの仕様決定を行うため，Fig. 4に示すモデル環境を構築した。

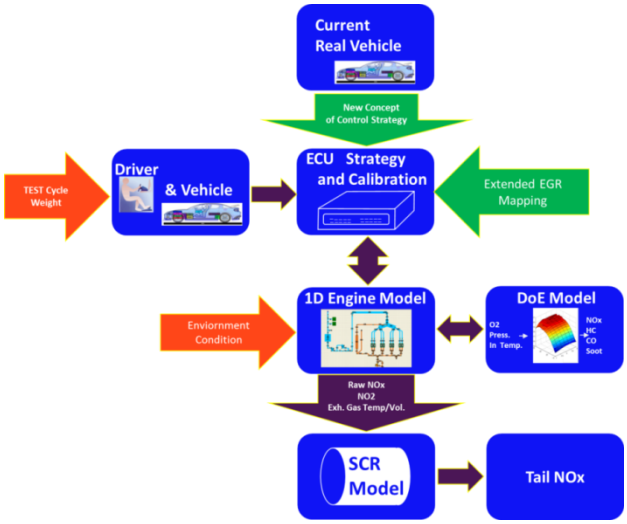


Fig. 4　Model Based Development Image

モデルは車両，エンジン，SCR，制御の各ユニットで構成される。エンジンユニットは，部品設計の要件検討が可能なように，1Dモデル（GT-POWER）にてモデル化し，排ガス温度，流量及びNO_2/NO_X比率を算出する。Raw NO_X量については実験計画法（DoE）により構築した統計モデルで計算される。これら計算結果をSCRモデルに受け渡すことで，テールパイプ NO_X（以下Tail NO_X）が見積もられる。制御ユニットは，実車と同等のロジックにEGRや過給制御の最新技術を反映したものを構築し，エンジンユニットと連成した。これにより，部品・制御一体での機能目標の検討が可能となっている。

4.2　機能目標検討

RDEにおいては，テストサイクル全体とUrban（市街地）セクション単独のそれぞれにNO_X排出規制値が適用される。SCRの低温NO_X浄化性能に対しては，エンジンからSCR入口までの熱損失と，SCR流入ガスのNO_2/NO_X比率の影響が大きいため，その影響をモデルにて検証し，性能目標であるUrbanセクションでのNO_X浄化率62%に対して，各ハードウエアでの実現性を勘案しながら，排気ガスの熱損失低減，SCR流入ガスのNO_2/NO_X比率のそれぞれに，機能目標値をモデル上で設定した。Raw NO_XとTail NO_Xのモデル算出結果をFig. 5に示す。

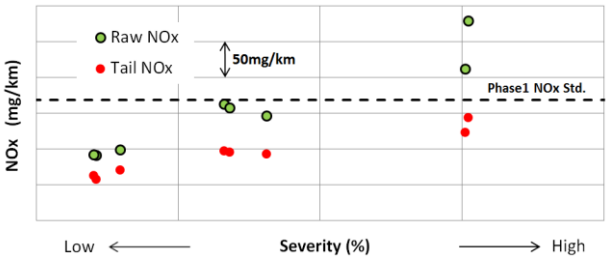


Fig. 5　Simulation of Urban NO_X with Function Target

横軸のSeverityはWLTCのCO_2値を基準に算出される無次元数で，走行エネルギーに相当する。このSeverity値が±25%以内に収まることがRDEのテスト要件となっている。排ガスの熱損失低減によりSCRシステムが早期活性し，低Severityから高Severityに至るまで低NO_Xを実現できる機能目標を立案した。

4.3　SCRモデル

(1) モデルの概要

前節で述べたMBDを実現するために構築したSCRモデルについて紹介する。MBDによる開発構想段階でのNO_X機能配分と機能目標値の検討を主目的とし，Fig. 3で示した機能を表現できることを前提に考えて，市販ツール（GT-POWER）をベースとした1Dモデルを開発した。

モデルでは，ガスの移流，化学反応，成分の拡散を考慮している。化学反応は下記に示すNO_X還元反応の総括式(1)，(2)，(3)の他に，NH_3の吸着・脱離，NH_3及びNOの酸化を考慮し，当初は約10式を定義していたが，以降記載する検討を進める中で約30式まで拡張した。

$$4NH_3 + 4NO + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O \quad (1)$$

$$2NH_3 + NO + NO_2 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O \quad (2)$$

$$8NH_3 + 6NO_2 \rightarrow 7N_2 + 12H_2O \quad (3)$$

(2) モデル同定と精度検証

まず，SCR触媒の詳細な特性を把握するために，Table 2に示す単体性能評価を，Synthetic Gas Test Benchにて実施した。

Table 2　Experiments on Synthetic Gas Test Bench

Experiment	Feed gas composition	Temperature	SV
NH_3 adsorption	200ppm NH_3, 0%/7% H_2O	100/200/300℃ heat up to 600℃	15k/48k/ 120k h^{-1}
NO oxidation	100ppm NO, 10% O_2, 7% H_2O	180 to 500℃	48k h^{-1}
NH_3 oxidation	200ppm NH_3, 10% O_2, 7% H_2O	100 to 400℃	48k h^{-1}
NO_X reduction steady-state	200ppm NH_3, 100ppm NO_X, 10% O_2, 7% H_2O with NO_2/NO_X=0/0.25/0.5	140/180/220/ 300℃	48k h^{-1}
NO_X reduction temp. step	200ppm NH_3, 200ppm NO_X, 10% O_2, 7% H_2O with NO_2/NO_X=0/0.25/0.5	100 to 400℃	48k/120k h^{-1}

評価条件は，市場で使用頻度の高い運転条件より決定した。反応ごとに個別の単体性能評価を実施し，各反応モデルの活性化エネルギーなどの反応パラメータを同定した。同定した結果について下記に述べる。

① NH_3の吸着・脱離

Table 2に従い，まずNH_3とN_2のみを単体に流通させ，NH_3吸着脱離の温度，空間速度（SV）違いに対する特性を得た。これに加え，NH_3とH_2Oはゼオライト上に競合吸着することからH_2Oの吸着・脱離反応を新たにモデル化した。NH_3吸着に対するH_2Oの影響を考慮する前後でのモデル検証結果をFig. 6に示す。H_2O吸着を考慮しない場合（左図）は実測に比べて脱離が不足し，NH_3濃度が低く算出されるが，H_2O吸着を考慮することで相対的に空き吸着サイト数に対するNH_3吸着サイト数の割合が高くなり，脱離が促進されることで精度改善につながった。

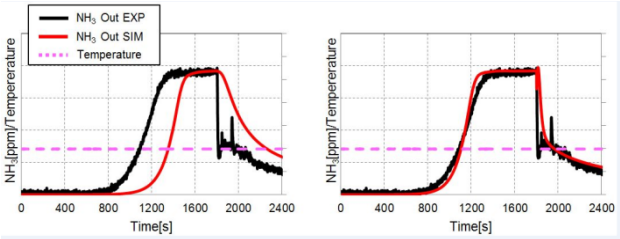


Fig. 6　NH_3 Adsorption and Desorption Model Accuracy, without H_2O (left) and with H_2O (right)

また，吸着サイト数は当初1サイトでモデル構築を進めていたが，昇温中の出口NH_3濃度の減衰が緩慢になる挙動から，温度に対する脱離特性が異なる複数の吸着サイトの存在が示唆され，最終的に3サイトでモデル化した。サイト数違いでのモデル精度検証結果の一例をFig. 7に示す。従来の1サイトモデルでは，3,500秒付近の濃度の減衰は直線的である一方，3サイトモデルでは温度に対する脱離特性が異なる山が重なることで精度が向上した。

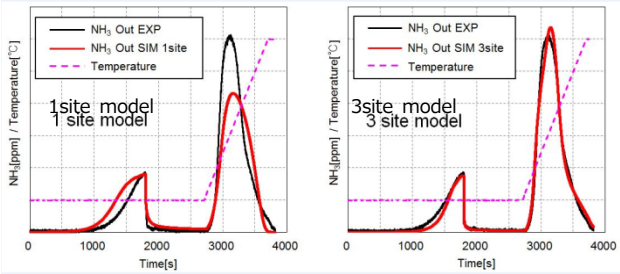


Fig. 7　NH_3 Adsorption and Desorption Model Accuracy

② NH_3酸化反応とNO_X還元反応

NO_X還元反応は前述した(1)，(2)，(3)式にてモデル構築を進めていたが，当該モデルだけでは高温域におけるNO_XとNH_3消費の挙動を正しく表現できなかったため，SCR内部でのNH_3酸化反応をモデルに追加した。最終的に3つのNH_3酸化反応式を考慮することで，高温領域でのNH_3酸化に起因するNO_X還元率の低下を再現できるようになった。NH_3酸化を考慮する前後でのモデル検証結果をFig. 8に示す。

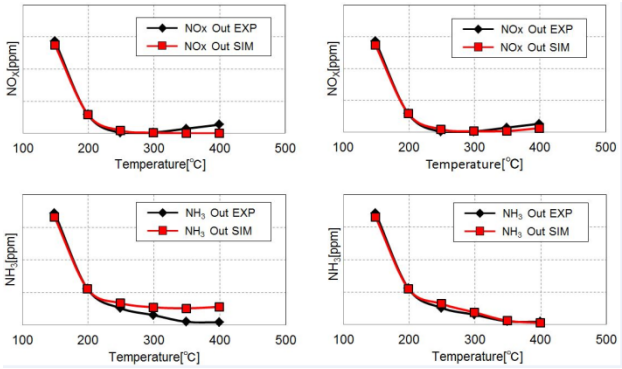


Fig. 8　NO_X Reduction with NH_3 Oxidation Model, without NH_3 Oxidation(left) and with NH_3 Oxidation(right)

④　実機でのモデル精度検証結果

触媒単体評価にて構築したモデルの実機適用性を検証するために，SCRシステムを搭載した実機でのNO_X実測値とモデル計算値の比較を行った。モデルには供給NH_3量をコントロールするロジックを織り込んだ。このコントロールロジックには，NO_X還元率・NH_3酸化・NH_3脱離及び目標NH_3吸着量を考慮している。

この結果より，実機においても十分なモデル精度を確保しており，MBDへの適用性が確認できた（Fig. 9）。

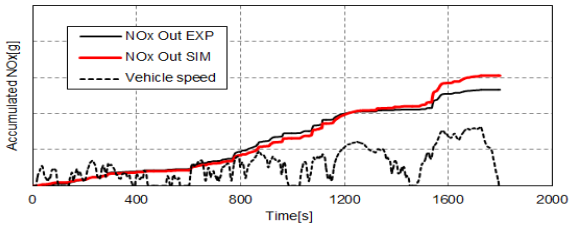


Fig. 9　WLTC SCR out NOx Model Accuracy

5. 導入技術

5.1　排気システムでの熱損失低減

現行エンジンでは，シリンダーヘッド一体型の水冷エギゾーストマニホールドを採用していた。新型ではターボハウジングの耐熱性基準をUPさせることで，空冷式に変更し，熱損失を低減した。次に大ターボのハウジングを板金化した。可変容量機構部の精度や剛性確保が必要な部位は鋳物とし，熱損失の大きいガス通路については薄肉板材を採用した。鋳物と板金部は，TIG溶接にて一体化されている。板金ハウジング部は2重管化されており，昇温と保温性能機能を実現した（Fig. 10）。

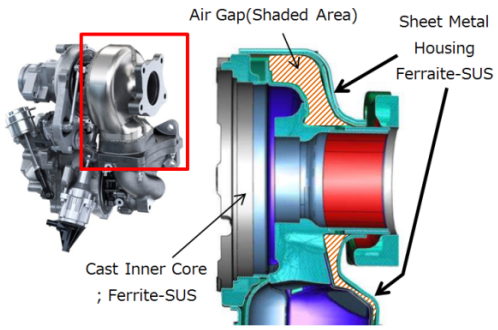


Fig. 10　Double Layer Sheet Metal Housing Technology

ターボ下流のDOCコンバーターでは，入口部を2重管による空気断熱層構造とし，また板厚0.8mmのSUS材でターボとの締結部シール機能を併せもつ構造を採用した。

コンバーター出口部では，ディーゼルパティキュレートフィルター出口～SCR入口間の放熱低減のために保温カバーを採用した。

以上の施策により，SCR入口までの熱損失低減について，機能目標値を実現できた。

5.2　NO_2生成能改善によるSCR反応促進

SCRにおけるNO_X還元の総括反応は，4章に示した(1)，(2)，(3)式で表され，このうち(2)式はFast SCR反応と呼ばれ低温から反応速度が速く，またこの反応を促進するためには，SCR前ガスのNO_2/NO_X比率を50%程度にするのが有効であることが知られている。市街地走行のような排ガス温度が低い運転シーンでは，Fast SCR反応を促進することが有効である。そのために，SCR前ガスのNO_2/NO_X比率を改善させる設計を採用した。

まずDOC容量を約20%UPし，空間速度を低下させた。またDOC触媒では，触媒劣化抑制とHC・COによるNO_2消費の抑制及びNO_2生成能改善をねらい，貴金属種の割合とウォッシュコート内部の貴金属配置を最適化した。実機での性能改善効果をFig. 11に示す。新設計のDOCにおいて，200℃以上の低温度域で約20～30%のNO_2/NO_X比率改善を実現した。ディーゼルパティキュレートフィルター触媒では，DOCで生成されたNO_2の消費抑制のため，貴金属の高分散化及び活性O_2量の最適化を行った。

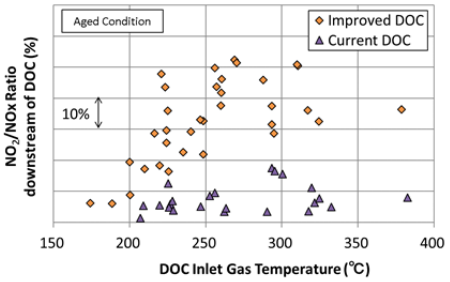


Fig. 11　Improvement of NO Oxidation on DOC

5.3　SCR触媒種の選定

SCR触媒には，金属添加されたゼオライトタイプを採用した。添加金属とゼオライトについて，Table 3に示す二つの仕様にて，機能検証を実施した。触媒A及び触媒BのNH_3吸着量とNO_X浄化率の特性をFig. 12に示す。

Table 3　SCR Catalyst Specifications

	Catalyst A	Catalyst B
Doped Metal	Metal A	Metal B
Zeolite	Structure I	Structure II

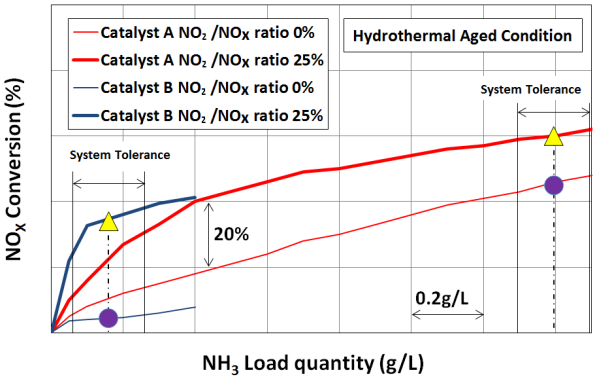


Fig. 12　Comparison of NO_X Conversion Characteristics

SCR温度は180℃，市街地走行相当の空間速度での特性であり，図中の三角及び丸印は安定したNH_3吸着量での浄化率を示す。NO_2/NO_X比率=25%の場合（三角印），触媒Aは内部にNH_3をしっかりと吸着してNO_X還元反応を行うのに対し，触媒Bでは少ないNH_3吸着量で高いNO_X浄化率を示す。NO_2/NO_X比率=0%の場合（丸印），触媒Bは触媒Aに対して浄化率の低下が著しく，SCRに流入するNO_2/NO_X比率に高く依存していることが分かる。

また関連する部品公差などを勘案したNH_3吸着量のシステムバラツキ（System Tolerance）を，Fig. 12に示している。SCRシステムは，触媒内部のNH_3吸着量を直接計測することができないため，NH_3吸着量のバラツキに対してNO_X浄化率が緩慢な特性をもつ触媒が望ましいが，触媒Bは浄化率変化が大きく，ロバスト性が劣る。

またゼオライトタイプのSCR触媒では，その多孔構造にHCが吸着し，SCRの機能を阻害することが報告されている[3]。吸着HCは，NH_3の酸点への吸着を阻害し，またディーゼルパティキュレートフィルターの再生制御作動時のような高温ガスにより，吸着HCが一気に酸化した場合，酸化反応熱でゼオライトが破損するなど，耐久性の課題につながる。SCR用ゼオライトの改良が研究[4]され，孔径と気体分子の大きさから，SCRに適した材料選択が可能となっている（Fig. 13）。

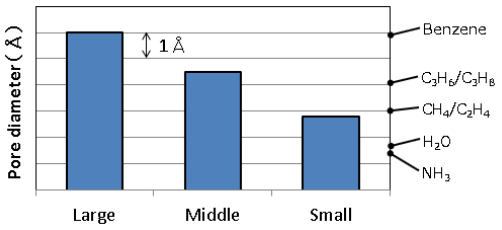


Fig. 13　Pore Size of Zeolite for SCR Catalyst

触媒Aと触媒Bにて，HC吸着時のNOx浄化率への影響を確認した結果をFig. 14に示す。

触媒Aは，SCRにHCを8g供給しても，NOx浄化率に影響がないのに対して，触媒BではHCを8g供給した場合，約半分までNOx浄化率が低下する。またNH_3吸着量が少ない段階でNOx浄化率への影響が現れ，NH_3の吸着点をHCがふさいでいることが示唆される。

以上の性能特性から，触媒Aを選定した。

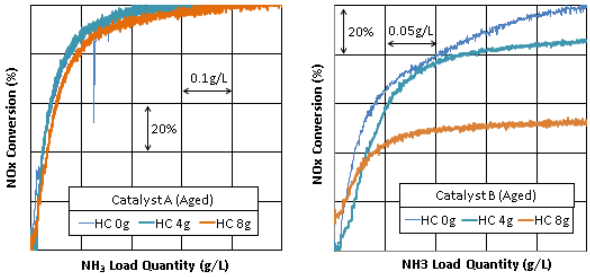


Fig. 14　HC Influence to NO_X Conversion

6. RDE NOx結果

開発車両でのNOx検証結果をFig. 15に示す。走行エネルギーに相当するSeverityに応じて，Raw NOxが増加するが，NOx規制値を超えるよりも低いSeverityから，SCRシステムの有効性が発揮されはじめ，高Severityに至るまでTail NOxを抑制することができている。

適用したRDE規制値に対して，Severityを考慮してもNOx後処理と燃焼との組み合わせにより，ロバストなシステムを構築した。

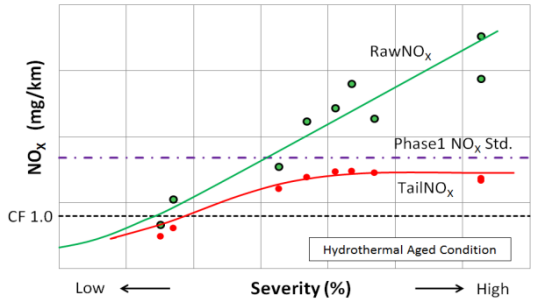


Fig. 15　Result of Actual Vehicle in RDE Several Cycles

7. おわりに

SKYACTIV-Dコンセプトを更に進化させ，エンジンポテンシャルを最大限生かしたエミッションシステムを実現できた。また本開発プロセスでは，エンジンのRaw NOxと後処理の機能配分，更にSCRシステム内でのNOx還元反応の機能配分の構想を描き，それを実現するというモデルベース開発プロセスを本格的に導入した。

効率的な開発はもちろんのこと，複雑なシステムの仕様決定に，MBDはますます有効であることを立証できた。

参考文献

(1) 森永ほか：SKYACTIV-D エンジンの紹介，マツダ技報，No.30，pp.9-13（2012）

(2) 山谷ほか：クリーンディーゼルエンジン新型SKYACTIV-D 2.2の開発，マツダ技報，No.34，pp.133-138(2017)

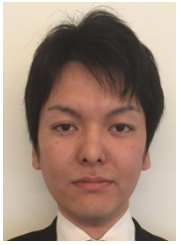
(3) James Girard et al.：Influence of Hydrocarbon Storage on the Durability of SCR Catalysts,SAE Technical Paper (2008), 2008-01-0767

(4) Isabella Nova：Urea-SCR Technology for deNOx After Treatment of Diesel Exhaust,Fundamental and Applied Catalysis, Springer, New York,2014, doi:10.1007/978-1-4899-8071-7

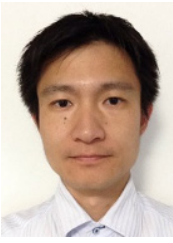
■著　者■

中野 洋平

上杉 康範


荒木 崇至

勝田 真斗


藤井 皓平

佐藤 義志