

尿素SCRシステムにおけるN₂O排出解析と設計指針の検討

Analysis of N₂O Emissions and Design Optimization for Urea-SCR System

米山 香澄*
Kasumi Yoneyama

藤井 謙治*
Kenji Fujii

小澤 恒*
Hisashi Ozawa

石川 直也*
Naoya Ishikawa

阿野田 洋**
Hiroshi Anoda

大堀 鉄平*
Teppei Ohori

要 旨

尿素SCRシステムにおいて、NO_x浄化に伴うN₂O(亜酸化窒素)の副生成が課題である。本研究では、尿素SCRシステムのプラントモデルに含まれる5因子の組み合わせによる感度解析を実施する。N₂O生成要因を解明することで、NO_x浄化率向上とN₂O生成抑制を両立可能な尿素SCRシステムの設計指針を提案する。

Abstract

In urea SCR systems, nitrous oxide (N₂O) by-production during NO_x conversion is an issue. In this study, a sensitivity analysis is performed using a combination of five factors included in a plant model of the urea SCR system. By clarifying the factors that contribute to N₂O formation, we propose a design guideline for the urea SCR system that can both improve the NO_x conversion ratio and suppress N₂O formation.

1 はじめに

ディーゼルエンジンの排出ガスに含まれるNO_x(窒素酸化物)の高度な浄化を目的として、尿素SCR(Selective Catalytic Reduction)システム(図1)が用いられる。尿素SCRシステムは、尿素水の供給部、尿素的加水分解により生じるNH₃(アンモニア)を還元材として排出ガス中のNO_xを浄化するSCR触媒、及び余剰のNH₃を酸化分解するASC(アンモニアスリップ触媒: Ammonia Slip Catalyst)から構成される⁽¹⁾。尿素SCRシステムは、世界的な排出ガス規制に対応するために、触媒材質の改良及びシステム最適化によるNO_x浄化性能の向上が進められてきた。また、尿素SCRシステムは、NO_x浄化の過程でNH₃及びN₂O(亜酸化窒素)を生成することも知られており、それらの排出低減に向けた取り組みも並行して検討されている。このうちN₂OはCO₂に対して273倍の地球温暖係数を持つ強力な温室効果ガスであり、CO₂とCH₄(メタン)に次いで地球温暖化に対して寄与していると言われている⁽²⁾。Clairotteらの調査では、商用車の排出ガスに含まれる温室効果ガスのうちN₂OがCO₂換算で0~7%を占めており、その影響を無視できないと結論付けた⁽³⁾。また、国内においても商用車からのN₂O排出については以前から注目され、実態及び原因が調査されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。更に近年では、規制年次の新しい車両で、N₂O排出量の高い傾向が指摘されている⁽⁷⁾。したがって、尿素SCRを搭載した商用車からのN₂O排出の低減は現在においても重要な課題である。

これまでに尿素SCRシステムにおけるN₂Oの生成メカニズムとして、SCR触媒上でのNO_x浄化反応における副生、NO₂(二酸化窒素)共存下で生じるNH₄NO₃(硝酸アンモニウム)の分解⁽⁸⁾⁽⁹⁾、及びASCのPGM触媒(白金族金属触媒: Platinum Group Metal Catalyst)上でのNH₃酸化反応における副生⁽¹⁾⁽¹⁰⁾などが報告されている。一方、システム設計の観点からは、システムレイアウト、触媒の反応特性、担持量、容量、尿素水の供給制御などがN₂Oの排出量に複合的に影響すると想定されるものの、これらを系統的に解析した事例はほとんどない。そこで本研究では、まず、単体試験とシミュレーションにより走行時の尿素SCRに由来するN₂O排出について解析を行った。次に、主要な設計パラメータに対するN₂Oの排出量の感度解析、NO_x及びNH₃排出量とのトレードオフ関係の解析、更には設計パラメータの網羅的な組み合わせ解析により、NO_x、N₂O、及びNH₃の排出量を同時低減するための設計指針として考慮すべき知見を整理した。

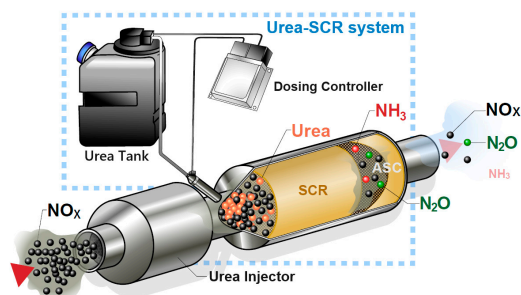


図1 尿素SCRシステム

* (株)いすゞ中央研究所

** エンジン装置設計部

2 実験及び計算手法

2.1 供試触媒と評価条件

単体試験により触媒のN₂O生成特性を評価した。コージェライトハニカム(5mil¹/300cps²)にSCRではCu-SCR触媒(Cuイオン交換ゼオライト触媒)を、ASCではPGM触媒とCu-SCR触媒を複層でコートしたものをを用いた。直径20mm、長さ20mmの試験片を切出し、600℃、10% H₂O/Airの雰囲気下で100時間の水熱処理を施したものを供試触媒とした。試験には触媒評価システム(ベスト測器製CATA5000)を使用し、触媒にNH₃を飽和吸着させてから、表1に示す試験条件を実施した。NO、NO₂、NH₃、及びN₂O濃度の計測はFT-IR(ベスト測器製Bex-1000FT)を用いた。

表1 触媒単体試験条件

	SCR		ASC	
	NO+NH ₃	NO+NO ₂ +NH ₃	NO+NH ₃	NH ₃
Temperature [degC]	150→600			
SV [h ⁻¹]	60,000			
NO [ppm]	300	150	300	0
NO ₂ [ppm]	0	150	0	
NH ₃ [ppm]	300		300	
O ₂ [%]	8			
H ₂ O [%]	10			

2.2 シミュレーション条件

WLTC(Worldwide-harmonized Light vehicles Test Cycle)モードでの過渡走行における排出ガスのシミュレーション解析に、図2に示す構成の尿素SCRシステムモデルを用いた。SCR及びASCのプラントモデルは、既報の触媒モデル⁽¹¹⁾⁽¹²⁾である。触媒モデルの反応速度定数は単体試験の結果に基づいて同定した。尿素水の供給制御は、Opitzらの先行研究⁽¹³⁾を参考に、SCRのNH₃吸着量を制御因子として、SCRのNH₃吸着量が目標値(目標NH₃吸着量)に達するように尿素水の供給量を制御した。シミュレーションの入力には1.9 Lのディーゼルエンジンの排出ガスデータを用いた。

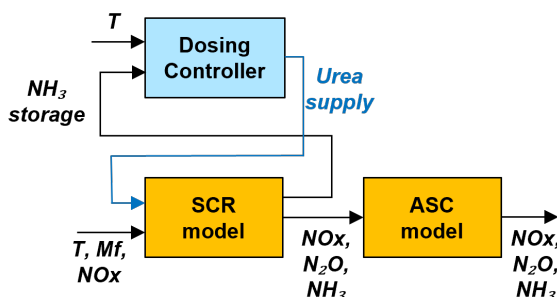


図2 尿素SCRシステムモデル

2.3 設計パラメータの感度解析

尿素SCRシステムでのNO_x浄化性能に影響する因子として、エンジン制御、後処理仕様、尿素噴射制御及び噴霧の一樣度が挙げられている⁽¹⁴⁾。本研究では、後処理における触媒仕様と尿素噴射制御に着目し、表2に示す、①SCR上流のNO₂/NO_x、②目標NH₃吸着量、③SCR容量、④ASC容量、及び⑤ASCのPGM担持量の5つの設計パラメータの感度解析を行った。SCR上流のNO₂/NO_xは、DOCモデルのNO酸化活性を変えることで基準を含む5つの水準を設定し、それぞれの水準でのWLTCモードにおけるNO₂/NO_xの平均値を表2に示した。

目標NH₃吸着量は、温度上昇によってSCRに吸着したNH₃の脱離及び排出を避けるため、各温度でのSCR触媒のNH₃吸着特性を考慮して図3のように設定した⁽¹⁵⁾。また、低温始動時に尿素水を噴射すると尿素、ピウレット、及びシアマル酸などを主成分とするデポジットが生成しやすい⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、SCRの暖機が完了したのちに尿素水を供給する制約条件を与えた。シミュレーションにより得られたNO_x、N₂O、及びNH₃の排出量データについては、基準条件のASC出口の排出量で規格化した。

表2 設計パラメータ

design parameter	Level				
NO ₂ /NO _x at SCR inlet [-]	0.1	0.19	0.36	0.56	0.73
Target storage of NH ₃ [-]	0.5	0.75	1	1.25	1.5
SCR volume [L]	1.25	2.5	5	7.5	10
ASC volume [L]	0.25	1	3	5	10
Normalized PGM loading [-]	0.25	0.5	1	2	4

■ : base condition

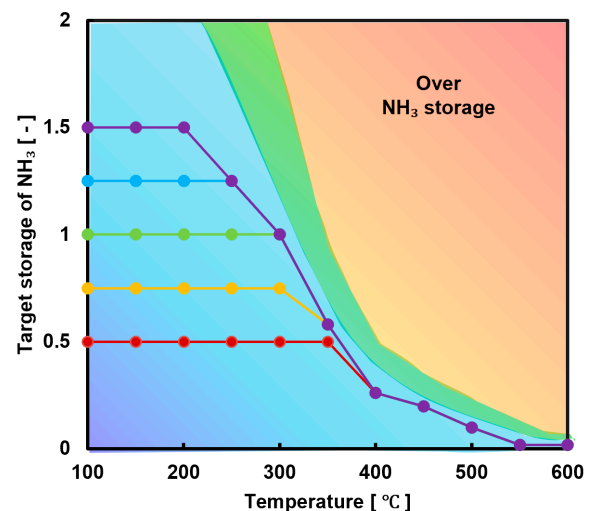


図3 目標NH₃吸着量

*1 mil (インチの 1/1000)

*2 cps (cells per square inch : 平方インチあたりのセル数)

2.4 網羅的な組み合わせ計算と解析

尿素SCRシステムの5つの設計パラメータの網羅的な組み合わせ計算を行った。表2に示す5つの設計パラメータについてそれぞれ5水準を掛け合わせた $3,125(=5^5)$ 通りのシミュレーションを実施した。得られた結果から多目的最適化ソフトmodeFRONTIER(ESTECO社製)を用いて、5つの設計パラメータを説明変数、また、 NO_x 、 N_2O 、及び NH_3 排出量を目的変数とするRSM(応答曲面モデル：Response Surface Methodology)を作成した。この際、RSMの作成手法として、3次の多項式特異値分解を用いた。

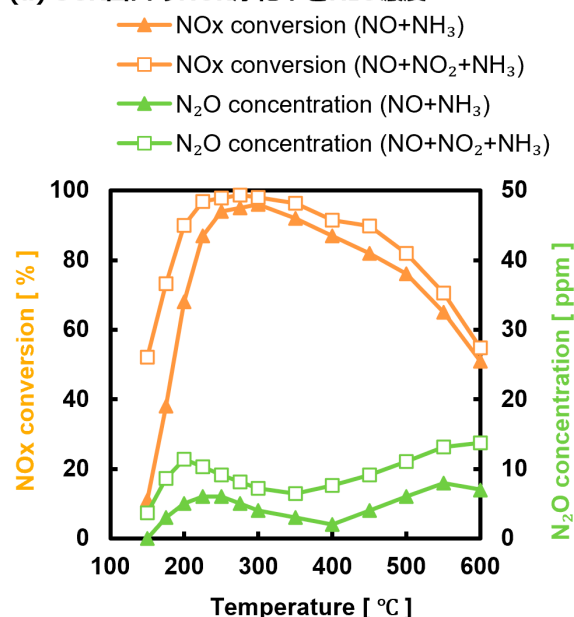
3 結果

3.1 触媒単体における N_2O の副生

SCR及びASCにおける N_2O の副生を把握するために触媒の単体試験を実施した結果を図4に示す。

図4(a)に示すSCRでは、 NO_x と NH_3 の反応に伴い、SCRの実用的な使用温度域である $150\sim 600^\circ\text{C}$ の全域でおよそ $5\sim 15\text{ppm}$ の N_2O が生成した。 NO のみの条件に比べて NO_2 が共存する条件では N_2O の生成濃度は高い傾向を示した。反応収支計算から、 NO_x と NH_3 の $1.5\sim 4.5\%$ に当たる窒素分が N_2O の生成に消費された。図4(b)に示すASCでは、 $200\sim 400^\circ\text{C}$ 付近に N_2O 生成のピークが見られた。 NH_3 の酸化条件(NH_3)に対して、 NO が共存する条件(NH_3+NO)では N_2O の生成濃度はより高い傾向を示した。反応収支計算より、反応物中の窒素分の $7\sim 33\%$ が N_2O の生成に消費された。

(a) SCR出口の NO_x 浄化率と N_2O 濃度



(b) ASC出口の NH_3 浄化率と N_2O 濃度

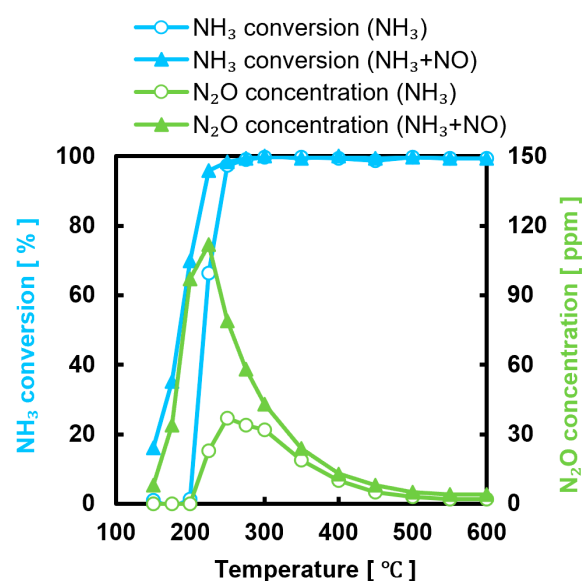


図4 触媒単体試験結果

3.2 過渡モードでの N_2O 排出

実際の使用状況における N_2O 排出量及び N_2O 排出に関わる要因を明らかにするために、尿素SCRシステムモデルを用いてWLTCモード試験条件における排出ガスのシミュレーションを実施した。尿素SCRシステムの初期温度を 25°C 、初期の NH_3 吸着量はゼロとし、表2の基準条件でシミュレーションした結果を図5に示す。図5の「Normalized NO_x 、 N_2O 及び NH_3 」は、 NO_x 、 N_2O 及び N_2O 排出量をWLTCモード終了時におけるASC出口の排出量でそれぞれ規格化した値である。低速域では暖機が未完了で尿素水は供給されないため N_2O は排出されないが、中速域から高速域では N_2O が排出された。これは、SCRに供給された尿素的分解で生じる NH_3 と排出ガス中の NO_x の反応に伴い、 N_2O が副生したと考えられる。また、超高速域では N_2O の排出量は急激に増加したがSCRと併せてASCでも N_2O が生成した。これはSCRで余剰となった NH_3 がASCで酸化されて N_2O を生成したことが原因と考えられる。モード全体における N_2O 排出量のうち、75%はSCR、残りの25%はASCに由来した。

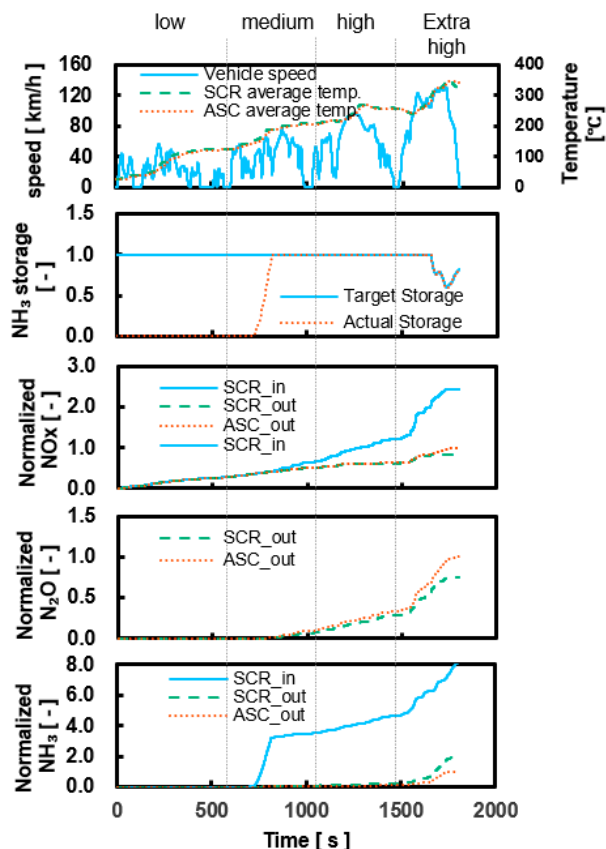


図5 WLTCモードでのシミュレーション結果

3.3 設計パラメータに対する N_2O 排出量の感度解析

N_2O の排出量に対する尿素SCRシステムの設計パラメータの影響について感度解析を実施した。

①SCR上流の NO_2/NO_x 、②目標 NH_3 吸着量、③SCR容量、④ASC容量、及び⑤ASCのPGM担持量を選択してシミュレーションで評価した。基準条件からそれぞれの設計パラメータを表2の5つの水準に変更した際の NO_x 、 N_2O 、及び NH_3 の排出量の結果を図6に示す。

図中にはSCR、及びASCの下流での排出量をそれぞれ示す。①のSCR上流の NO_2/NO_x が0.5前後で NO_x の排出量は低下するが N_2O の排出量は逆に増加した。②の目標 NH_3 吸着量を高くすると、 NO_x の排出量は低減するが N_2O と NH_3 の排出量は逆に増加した。③のSCR容量を増やすと、 NO_x 、 N_2O 、及び NH_3 の排出量は共に低減した。④のASC容量若しくは⑤のASCのPGM担持量を増やすと、ASCでの NH_3 分解が促進されて NH_3 の排出量は低減するが NH_3 分解により副生する NO_x と N_2O の排出量は増加した。感度解析の結果から、尿素SCRシステムの5つの設計パラメータはすべて N_2O の排出量に感度を持つことがわかった。また、③のSCR容量を増やすと NO_x 、 N_2O 、及び NH_3 の排出量を同時に低減することができるが、それ以外の4つの設計パラメータでは N_2O の排出量に対して NO_x または NH_3 の排出量がトレードオフの関係にあることがわかった。

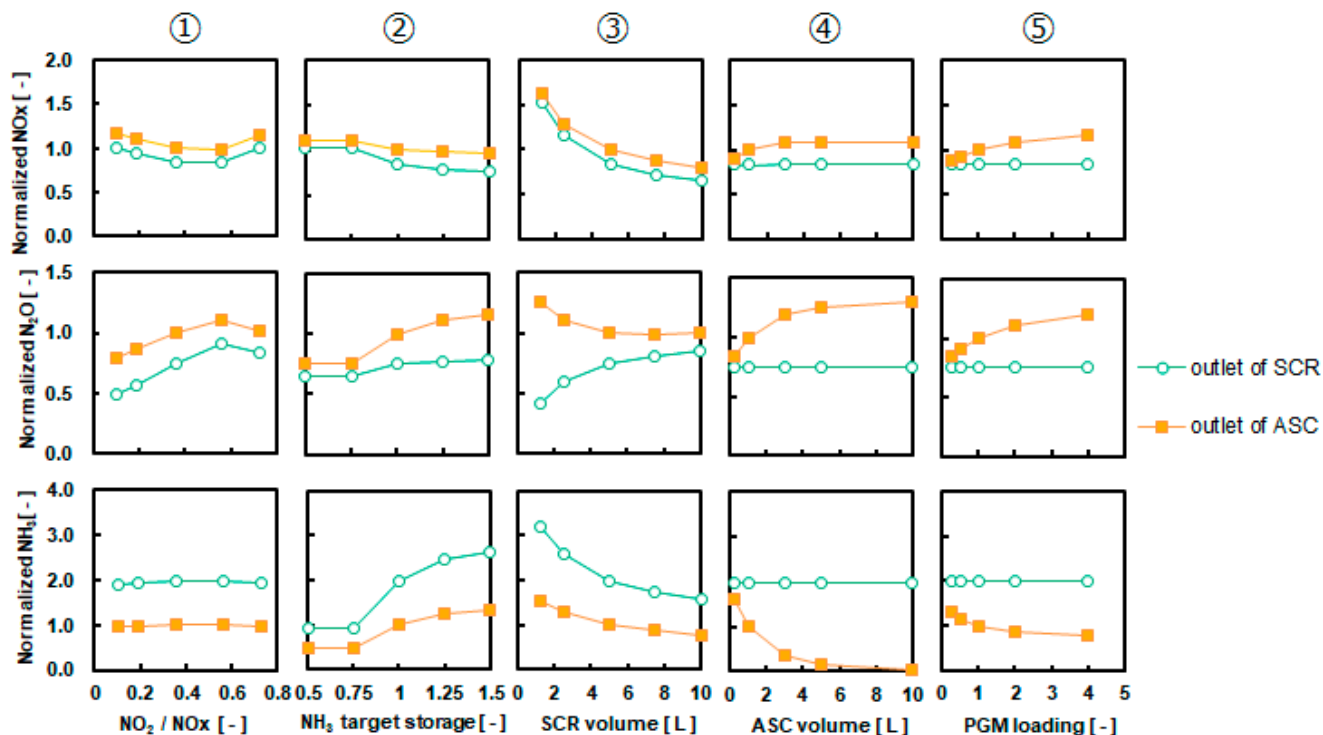


図6 設計パラメータの感度解析結果

3.4 設計パラメータの組み合わせ最適化

前節における尿素SCRシステムの各設計パラメータの単独の効果の検討に続き、複数のパラメータの組み合わせ最適化を試みた。表2に示す5つの設計パラメータについてそれぞれ5水準を掛け合わせた3,125(=5⁵)通りのシミュレーション結果を説明因子として、WLTCモード試験条件でのNO_x、N₂O、及びNH₃排出量を推定するRSMをそれぞれ作成した。得られたRSMの決定係数はすべて0.95以上と良好であった。この際に、尿素SCRシステムの設計にあたり、触媒容量は車載性や経済性といった制約を受けるため、SCRとASC

の容量の合計を6 L以下に限定し、RSMを用いてNO_x、N₂O、及びNH₃の排出量を算出した結果を図7に示す。得られた解のうちNO_xとNH₃排出量が基準条件以下でN₂O排出量が最も少なかった上位10の解を最適解として抽出した。最適解の一例における5つの設計パラメータを用いてシミュレーションを行い、得られたNO_x、N₂O、及びNH₃排出量を表3に示す。シミュレーション結果におけるN₂O排出量は、RSMによる算出結果より増加したが、基準条件に対して22%低減していた。

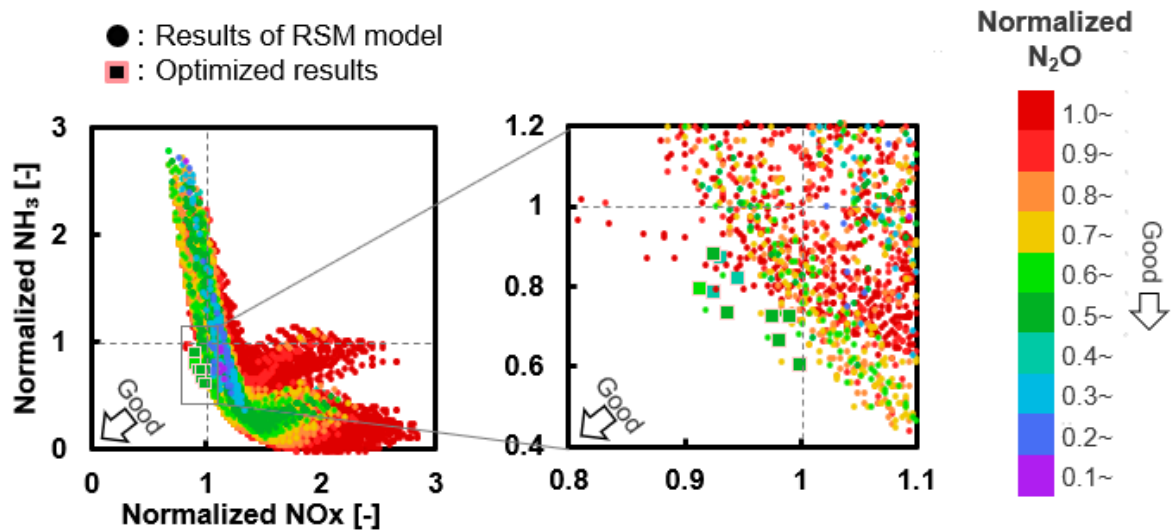


図7 RSMによるNO、N₂O、NH₃排出量のトレードオフ解析

表3 基準条件と最適解の排出量比較

		Base condition	Optimized
Design Parameters	NO ₂ /NO _x [-]	0.36	0.36
	NH ₃ storage [-]	1	0.63
	SCR volume [L]	5	5.7
	ASC volume [L]	1	0.3
	PGM loading [-]	1	3
Emissions	Normalized NO _x [-]	1.00	1.00
	Normalized N ₂ O [-]	1.00	0.78
	Normalized NH ₃ [-]	1.00	0.74

4 考察

4.1 触媒でのN₂O生成

Cu-SCR触媒は、高いNO_x浄化性能を示すことから近年は尿素SCRシステムへの採用が進んでいる一方で、N₂Oの副生量が比較的多いことが知られている⁽¹⁸⁾。

図4(a)のSCRの単体試験の結果から、N₂Oの生成濃度は温度及びNO₂の共存に影響を受けたことが推測される。Cu-SCR触媒上でN₂Oが生成するメカニズムとして、300℃以下の低温ではブレンステッド酸点に生成するNH₄NO₃(硝酸アンモニウム)の分解が主な原因であると言われている⁽¹⁹⁾。また、近年ではCuサイト上でのニトロソアミド(H₂NNO)を介した経路も提案されている⁽²⁰⁾。300℃以上の高温ではNH₃酸化及びSCR反応での副生が主な原因と考えられている^{(11) (21) (22)}。SCR上流のNO_xにおいて、NOのみが存在する場合に対してNO₂が共存する場合にN₂O生成濃度が高くなるのは、硝酸アンモニウムが生成しやすいこととSCR反応での副生が増えることが原因と考えられる。

図4(b)のASCの単体試験の結果から、ASCでは200～400℃でN₂Oを生成したことが確認された。

ASCはPGMとCu-SCRを複層でコートした触媒であるが、このうちN₂O生成に対してはPtなどのPGMが強く寄与することが先行研究から知られている⁽²³⁾。PGM触媒上でのNH₃の酸化分解では、200～400℃でN₂Oが副生しやすい⁽¹⁾。これは、NH₃が酸化する過程において、PGM表面では低温ではNが、高温ではNOが吸着種として高い比率となるが、200～400℃の中間的な温度域ではNとNOが混在して吸着するために、それらが結合・脱離してN₂Oを生成すると考えられている⁽²⁴⁾。また、NOが共存する条件(NH₃+NO)ではN₂Oの生成濃度はより高い傾向を示すのは、低温でPGM表面にNが吸着した状態で気相よりNOが供給されるとそれらが反応してN₂Oを生成するためである⁽²³⁾。

4.2 NO_x、N₂O、及びNH₃の排出量のトレードオフ関係

設計パラメータの感度解析の結果(図6)から、SCR容量以外の4つの設計パラメータではNO_x、N₂O、及びNH₃の排出量がトレードオフ関係となったメカニズムについて考察する。

一つ目として、fast SCR反応によるNO_x浄化とN₂O副生の関係が影響していると考えられる。排出ガス中のNO_xの一部にNO₂が共存すると、SCRではNO_x浄化活性が高いfast SCR反応が進行することが知られている⁽¹¹⁾⁽²⁵⁾。一方で、20℃以下の低温ではNH₄NO₃が触媒表面に生成・蓄積し、温度上昇に伴い分解する過程でN₂Oを生じる。このため、SCR上流のNO₂/NO_xを高くした場合にはfast SCR反応によりNO_x浄化活性が向上してNO_x排出量は低減するが、N₂O排出量は増加するトレードオフ関係が生じると考えられる。

二つ目として、尿素水供給量によるNO_x浄化活性とNH₃排出量の関係が影響していると考えられる。Cu-SCRではNH₃吸着量が増加するとそれに比例してNO_x浄化活性は高まる⁽²⁶⁾。その一方で、NH₃吸着量を高くすると、触媒温度が上昇した際に吸着したNH₃が飽和脱離しやすくなるためにNH₃排出量は増加する。SCRに対する目標NH₃吸着量を高くした場合にNO_xの排出量は低減するのに対してNH₃排出量が増加するトレードオフ関係が生じるのはこのためと考えられる。

三つ目として、ASCにおけるNH₃酸化活性とN₂O若しくはNO副生量の関係が影響していると考えられる。SCRから脱離した余剰のNH₃がASCのPGM触媒で酸化分解される場合、N₂の他にNO_x及びN₂Oを副生することが知られている⁽¹⁾⁽¹⁰⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾。ASCに流入するNH₃量が多い場合、もしくはASCのNH₃酸化活性が高い場合に、ASCにおけるN₂O若しくはNO副生量は増加する。ASC容量、及びASCのPGM担持量を増加させた場合では、ASCのNH₃酸化活性が増加するため、NH₃排出量は減少しNO_x及びN₂Oの排出量は増加するトレードオフが生じると考えられる。

4.3 システムの設計パラメータの最適化指針

WLTCモードでの排出ガスシミュレーション結果から、尿素SCRシステムの主要な5つの設計パラメータのうち、SCR容量の増加がNO_x、N₂O、及びNH₃の排出量の同時低減に有効であった。これはSCR容量の増加により、NO_xの浄化性能が高まりつつ、NH₃の吸着能力も増加することでASCへの余剰なNH₃の流入量とN₂O生成が低減するためである。

SCR上流のNO₂/NO_xは、NO_x浄化の観点では低温活性の高いfast SCRを最大限利用するために0.5程度が最適とされてきた。一方で、NO₂/NO_xは高いほどN₂Oの排出量が増加する傾向があり、N₂Oの排出量まで考慮した場合には従来の考え方よりもNO₂/NO_xを低く設定すべきである。システム設計においてはディーゼル酸化触媒(DOC)及びス捕集フィルター(DPF)の酸化触媒の触媒種並びに担持量などで最適化できる。

SCRの目標NH₃吸着量を高めると、排出ガス中のNO_x浄化反応が促進されNO_xの排出量は低減できる。一方で、ASCへの余剰なNH₃の流入が起きやすくなることから、ASCでのN₂O生成とNH₃排出量が増加する。NO_xの排出量に対するNH₃とN₂Oの排出量のトレードオフ関係から、目標NH₃吸着量にはそれらのバランスを考慮した設計が必要と考えられる。

ASCの容量若しくはPGM担持量を高くすると、ASCでのNH₃分解活性が高くなるため、NH₃の排出量は低減できるがその分解生成物であるNO_xとN₂Oの排出量は増加する。NH₃の排出量に対するNO_xとN₂Oの排出量のトレードオフ関係から、ASC容量若しくはASCのPGM担持量にはそれらのバランスを考慮した設計が必要と考えられる。

4.4 N₂Oを低減するシステム設計の考察

本検討ではSCR容量とASC容量の合計を6 L以下とする制約条件を設定して、設計パラメータの最適解を探索した。その結果、基準条件に対してNO_xとNH₃の排出量を同等以下としつつ、N₂Oの排出量を約22%低減する解が得られた。表3の最適解に関して、排出ガスのシミュレーション解析によりN₂Oの低減要因を解析した結果、SCR容量を大きく、また、SCRの目標NH₃吸着量を低く設定することでSCRからASCへのNH₃の流入量が低下し、ASCでのN₂O生成量は、基準条件と比較して約70%低減した。一方で、SCRでのN₂O生成量は基準条件に比べて約6%低減した。設計パラメータの最適化は、ASCでのN₂O排出量低減に対して有効であったが、SCRでのN₂O排出量低減に対して効果が小さいことが確認できた。

本検討の結果は、近年に主流となったCu-SCRを利用した尿素SCRシステムにおけるN₂Oの排出量の低減に関するシステム設計の指針を示すと同時に、NO_x、N₂O、及びNH₃の排出量のトレードオフに由来する性能限界を示したと言える。一方、実際の製品開発では

重要となる様々な実路での走行条件、及びNH₃吸着量を制御因子とした尿素供給制御で生じる誤差要因(NH₃吸着量の推定値、NO_xセンサの個体差・劣化、尿素供給量など)を考慮していない点は今後の課題である。

今後の更なる尿素SCRシステムの改良に向けて、まず、触媒材質の改良が重要と考えられる。具体的には、SCRではCu-SCRのN₂選択率の向上、若しくはN₂Oを副生にくい酸化バナジウム触媒及び鉄イオン交換ゼオライト触媒の性能改良を挙げることができる。ASCにおけるNH₃酸化反応のN₂選択率の向上も効果的であろう。次に、ディーゼルエンジンからのNO_xの排出量を減らすことで、その浄化に伴うN₂O副生を低減させることが重要と考えられる。更に、様々な実路での走行条件とNH₃吸着量を制御因子とした尿素供給制御で生じる誤差要因を考慮した尿素SCRシステムのロバスト最適化により、リアルワールドでの排出ガス低減にも取り組む必要がある。この課題に対しては、本検討で用いたシミュレーションによる解析手法が適用できると考えられる。以上のような技術開発により本検討で示した性能限界を超える、優れたディーゼル後処理システムの実現が期待される。

5 おわりに

本報告では、尿素SCRシステムでのN₂Oの生成要因の明確化とNO_x、N₂O、及びNH₃の排出量を同時低減する設計指針の検討を目的として以下の知見を得た。

- (1) Cu-SCRを利用した尿素SCRシステムにおけるN₂O排出の主な要因はSCR触媒でのNO_x浄化に伴うN₂O副生で、次いで、ASCでのNH₃酸化に伴うN₂O副生である。
- (2) 尿素SCRシステムの設計パラメータのうち、SCR容量を増加することでNO_x、N₂O、及びNH₃の排出量を同時に低減できた。一方で、それ以外の4つの設計パラメータではN₂Oの排出量に対してNO_x、もしくはNH₃の排出量がトレードオフの関係となった。
- (3) 尿素SCRシステムの設計最適化により、ASCでのN₂O副生を最小化できる一方で、SCRにおけるN₂O副生の低減は困難である。
- (4) 今後は触媒材料の改良及び本検討の解析手法を応用した実使用環境でのロバスト設計手法の確立が望まれる。

本文献は自動車技術会論文集Vol.56、No.3に掲載された論文を加筆修正の上報告するものである。

参考文献

- (1) L. Chmielarz et al. : Jabłońska : Advances in selective catalytic oxidation of ammonia to dinitrogen: a review, RSC Advances, Vol. 5, No. 54, (2015), p.43408-43431
- (2) H. Zhang et al. : Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity, Advances in Climate Change Research, Vol. 17, No. 6(2021), p.691
- (3) M. Clairotte et al. : Exhaust emission factors of greenhouse gases (GHGs) from European road vehicles, Environmental Sciences Europe, Vol. 32(2020), p.1-20
- (4) 鈴木央一 ほか：尿素 SCR 車の規制および未規制成分の排出特性解析, 自動車技術会論文集, Vol. 39 (2008), p.161-166 (2008)
- (5) 鈴木央一 ほか：尿素 SCR における亜酸化窒素の排出及び生成要因に関する考察, 自動車技術会論文集, Vol. 40(2009), p.991-996
- (6) 山本敏朗 ほか：尿素 SCR システム搭載貨物車の路上走行時におけるNO_x,NH₃およびN₂Oの排出挙動, 自動車技術会論文集, Vol. 44(2013), p.1489-1496
- (7) 使用過程車からの亜酸化窒素の排出実態について, 東京都環境公社,
<https://www.tokyokankyo.jp/kankyoken/wp-content/uploads/sites/5/2024/01/b087827485d8b893711a93556342c393.pdf>
- (8) K. Kamasamudram et al. : N₂O Formation and Mitigation in Diesel Aftertreatment Systems, SAE International Journal of Engines , Vol.5(2012), p.688-698
- (9) A.Grossale et al. : Role of Nitrate Species in the "NO₂-SCR" Mechanism over a Commercial Fe-zeolite Catalyst for SCR Mobile Applications, Catalysis Letters, Vol.130(2009), p.525-531
- (10) A. Scheuer et al. : NH₃-Slip Catalysts : Experiments Versus Mechanistic Modelling, Topics in Catalysis, Vol.52(2009), p.1847-1851
- (11) 田口将宏 ほか：高NO₂/NO_x領域におけるSCRモデルの予測精度向上, 自動車技術会論文集, Vol.51(2020), p.280-285
- (12) 田口将宏 ほか：アンモニアスリップ触媒のプラントモデル構築検討(第3報)－混合触媒モデルの複層触媒の性能予測への適用－, 自動車技術会論文集, Vol. 52(2021), p.226-231

- (13) B. Opitz et al. : Simulation study of SCR catalysts with individually adjusted ammonia dosing strategies, Chemical Engineering Journal, Vol.264(2015), p. 936-944
- (14) I.Nova et al. : Urea-SCR Technology for deNO_x After Treatment of Diesel Exhausts, Fundamental and Applied Catalysis. Springer, New York(2014)
- (15) 阿野田 洋 ほか : MBD(Model Based Development)を活用した近接SCRシステムの設計, 自動車技術会秋季大会 2024, JSAE20246289, 2024
- (16) J. Ball : A toxicological evaluation of potential thermal degradation products of urea, SAE Technical Paper, No.2001-01-3621(2001)
- (17) L. Xu et al. : Laboratory and engine study of urea-related deposits in diesel urea-SCR after-treatment systems, SAE Transactions, 202-209(2007)
- (18) H.Többen et al. : Formation of N_2O in the Exhaust Line of Combustion Engines, SAE Technical Paper, No.2023-01-5045(2023)
- (19) J. Han et al. : N_2O formation during NH₃-SCR over different zeolite frameworks : effect of framework structure, copper species, and water, Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol.60(2021), p.17826-17839
- (20) Y.Feng et al. : The role of H⁺-and Cu⁺-sites for N_2O formation during NH₃-SCR over Cu-CHA, The Journal of Physical Chemistry C, Vol.125(2021), p.4595-4601
- (21) M. Jabłońska : Review of the application of Cu-containing SSZ-13 in NH₃-SCR-DeNO_x and NH₃-SCO, RSC Advances, Vol.12(2022), p.25240-25261
- (22) S. Li et al. : Experimental and kinetic modeling study for N_2O formation of NH₃-SCR over commercial Cu-zeolite catalyst, Advances in Mechanical Engineering , Vol.13(2021), p.1-12
- (23) 大堀鉄平 ほか : アンモニアスリップ触媒のプラントモデル構築検討, 自動車技術会論文集, Vol.49(2018), p. 587-592
- (24) R.Kraehnert et al. : Kinetics of ammonia oxidation over Pt foil studied in a micro-structured quartz-reactor , Chemical engineering journal, Vol.137(2008), p.361-375
- (25) M.Iwasaki et al. : A comparative study of "standard", "fast" and "NO₂" SCR reactions over Fe/zeolite catalyst, Applied Catalysis A: General, Vol.390(2010), p. 71-77
- (26) K.Kamasamudram et al. : Why Cu-and Fe-zeolite SCR catalysts behave differently at low temperatures, SAE International Journal of Fuels and Lubricants, Vol.3(2010), p.664-672

◇いすゞ歴史の一こま



藤沢工場事務棟玄関前(1962年ごろ)