船用4ストロークディーゼルエンジンにおけるSCR研究*

平 田 宏 一** 仁 木 洋 一**

1. はじめに

船舶の動力源として使われているディーゼルエンジンからは、NO_x（窒素酸化物）や SO_x（硫黄酸化物）、PM（粒子状物質）などの有害成分が含まれた排ガスが放出されている。これらの有害成分は、人体への影響の他、酸性雨や光化学スモッグの原因となる。そのような背景を受けて、IMO（国際海事機関）では段階的なNO_x削減規制が検討されている。図1はIMOで提案されているNO_x排出規制である。NO_x排出率の規制値はディーゼルエンジンの定格回転数毎に決められており、2011年現在、2次規制（2005年に施行された1次規制に対して20%のNO_x削減）が施行されている。さらに、2016年には1次規制に対して80%のNO_x削減が要求される3次規制が施行される予定である。一般に、2次規制までのNO_x削減は、ディーゼルエンジンの燃焼改善等のいわゆるインエンジン技術で対応されている。一方、3次規制のNO_x削減は、インエンジン技術だけで対応することは難しく、SCR（Selective Catalytic Reduction, 選択式還元触媒）と呼ばれる排ガス後処理装置が必要となる。

本報では、著者らがNO_x削減の実用技術の構築を目指して研究・開発を進めてきた船用4ストロークディーゼルエンジンを用いた尿素SCRシステムの脱硝性能試験及びフィールド試験用SCRシステムの開発状況に

図1 IMOによるNO_x排出規制

*原稿受付 平成23年9月3日。

**正会員 海上技術安全研究所（三鷹市新川6-38-1）。

ついて報告するとともに、船舶搭載のための技術課題について考察する^{1), 2), 3)}。

2. 尿素SCRシステムの基本構成と課題

2.1 SCRの基本構成と原理 図2に尿素SCRシステムの基本構成を示す。排気管中に触媒を取り付け、その上流から尿素水の噴霧を吹き込む。尿素水は排ガスの熱によって分解され、アンモニアに変化する。そして、触媒反応によって、NO_xとアンモニアは無害な窒素と水に変換される。一般に、船舶用SCRには、ハニカム形状をしたチタン・バナジウム系の触媒が用いられる（図3）。

還元剤には、尿素水以外にもアンモニア水、あるいはアンモニアガスを用いることができる。図2中に記載した化学反応式からもわかるように、還元剤にアン

図2 SCRシステムの基本構成

図3 チタン・バナジウム系の触媒の外観

モニア水,あるいはアンモニアガスを用いた場合,尿素水が分解する過程が不要となる.そのため,尿素水を用いる場合と比べて,反応に要する時間を短くでき,SCRシステムの小型化や脱硝性能の点で有利になると考えられる.しかし,船舶にSCRを適用する際には,刺激臭があり有毒なアンモニアを船上で取り扱うのは難しいため,尿素水の使用が有望とされている.

一方,尿素水は,100℃程度の温度で結晶化する他,200℃程度の温度でシアヌル酸などの尿素由来の固形物を生成するなどの特性がある.そのため,噴射ノズルの閉塞や排気管への固形物の付着を防止する等の対策が必要となる.

2.2 船用SCRシステムの技術課題 触媒の脱硝性能は,排ガス温度や触媒の寸法に大きく影響を受ける.船用4ストロークディーゼルエンジンの排ガス温度は300~350℃程度であり,2ストロークエンジンの排ガス温度よりも高く,触媒反応には十分な温度である.一方,SCRを船舶に搭載する場合,その設置スペースを最小限にするために,触媒寸法を可能な限り小さくすることが望まれる.触媒寸法は,触媒脱硝性能や劣化特性,さらには排ガスの圧力損失等を踏まえて,決定する必要がある.

また,触媒で反応しきれないアンモニアや過剰に噴霧されたアンモニアは大気へと放出される(アンモニアスリップ).アンモニアは刺激臭のある有毒ガスであり,その放出を最小限に抑えなければならない.すなわち,アンモニアスリップを防止するための十分な脱硝性能と適切な還元剤噴射制御が必要となる.

さらに,燃料中に含まれる硫黄成分は,触媒の劣化の原因となるため,その対応技術が必要不可欠である.

以上のような技術課題を踏まえて,船用4ストロークディーゼルエンジンを用いた尿素SCRシステムの脱

硝性能試験及びフィールド試験用SCRシステムの研究開発を進めている.

3. SCRシステムの基本性能

著者らは,尿素SCRシステムの基本性能を調べるため,船用4ストロークディーゼルエンジン(定格出力750 kW)にSCRを取り付け,性能評価試験を行ってきた.

図4に示す性能評価設備では,エンジン回転数や出力,排ガス温度などの基本データ,尿素水流量や触媒での圧力損失,触媒前後のNO_x濃度,さらにアンモニアスリップなどを測定している.また,本設備には,触媒上流に冷却水を噴霧する装置が設置されており,低い排ガス温度における触媒性能評価ができるなどの特徴がある.

3.1 触媒寸法が脱硝性能に及ぼす影響 図5は,試験結果の一例であり,ディーゼルエンジンの負荷率

図5 当量比に対する脱硝率の試験結果

図4 SCRシステム性能評価設備の概略

図6 触媒の挿入位置

を75%とし、SV値(排ガス流量[m³/h]と触媒体積[m³との比)を3通りに変化させた場合の当量比に対する脱硝率(反応したNO_x濃度と触媒前のNO_x濃度との比)の試験結果を示している。ここで、当量比とは、排ガス中の全NO_xを変換するために必要な尿素量に対する噴霧した尿素量の割合である。

また、触媒の挿入位置は図6に示す通りであり、長さが異なる触媒を1段または2段に配置している。このとき、排ガス温度は400℃程度であり、SV値が8800 h⁻¹及び17500 h⁻¹のときの脱硝率は理想的な値にほぼ一致していることがわかる。一方、SV値が20000 h⁻¹の場合の脱硝率は、当量比の増加に従って、理想的な値よりも10~20%ほど低下している。触媒単体試験によれば、温度400℃におけるSV値が20000 h⁻¹のときの脱硝率は十分に高いことが確認されており、脱硝率低下の原因は触媒寸法その他、触媒の段数や配置の影響を受けているものと考えられる。すなわち、SCRシステムの小型化のためには、還元剤の分散性向上、流れの均一化、触媒の多段配置などが重要であると考えられる。

図7は、SV値を20000 h⁻¹とした場合の当量比に対するNO_xテクニカルコード(E3モード)で算出されるNO_x排出率の試験結果を示している。本試験において、燃料にはA重油及びC重油、還元剤には尿素水を用いており、それぞれの条件において排ガス温度が400℃及び300℃の場合の試験結果を記している。これより、燃料にA重油、C重油を用いた場合、また、それぞれ排ガス温度を触媒入口で300℃に低減した場合においても、当量比を80%にすることで、SCRの初期性能はIMO 3次規制のNO_x排出率を満足していることがわかる。しかし、図5からわかるように、当量比を80%とした際の脱硝率は70%程度であり、この相違はアンモニアスリップの原因となる。さらに、触媒への酸性硫酸やスートの付着を考えた場合、SV値が20000 h⁻¹の触媒を長期に使用することは難しい。また、触媒の劣化と運転時間の兼ね合いを考えた場合、触媒寸法は船

図7 当量比に対するNO_x排出率の試験結果

舶に搭載できる範囲で可能な限り大きくすることが望ましい。以上を踏まえて、船用4ストロークディーゼルエンジンに適した触媒のSV値は10000 h⁻¹以下であると考えている。

3.2 排ガス温度が脱硝性能に及ぼす影響 図8

は、ディーゼルエンジンの負荷率を75%とし、SV値を12000 h⁻¹とした場合の排ガス温度に対する脱硝率並びにアンモニアスリップの試験結果をまとめたものである。本試験において、燃料にはA重油を使用しており、排ガス温度は触媒上流の冷却水噴霧装置の冷却水量を変化させて調整している。これらの結果より、排ガス温度が低いほど、脱硝率は低下し、アンモニアスリップが増加していることがわかる。特に、排ガス温度が250℃を下回ると脱硝率の低下及びアンモニアスリップの増加が顕著になっている。

上述の通り、船用4ストロークディーゼルエンジンの排ガス温度は300~350℃程度であり、定常状態では十分に高い温度である。しかし、入出港時の過渡状態等には排ガス温度が低下することがある。したがって、過渡状態における尿素量制御方法やアンモニアスリップの対応を検討しておく必要があると考えられる。

(a) 脱硝率の試験結果

(b) アンモニアスリップの試験結果

図8 排ガス温度が脱硝性能に及ぼす影響

(a) 脱硝率
(b) アンモニアスリップ
図9 SCRの劣化試験

図10 36時間劣化試験後の触媒（触媒流路断面）

3.3 SCRの劣化特性 図9は、船用4ストロークディーゼルエンジンによる36時間の連続運転を行い、SCRの劣化試験を行った結果である。本試験において、燃料には硫黄分2.5%のC重油を使用し、排ガス温度は250℃、SV値は12000 h⁻¹、負荷率は75%としている。図9(a)は触媒直後のNO_x濃度の測定値から求めた脱硝率、図9(b)は触媒後の中央部で測定したアンモニア濃度、図10は試験後の触媒（触媒流路断面）の写真である。NO_x濃度は図10に示す2箇所測定しており、測定位置B（触媒の側部）では測定位置A（中央下部）と比べて、触媒の劣化が大きいことがわかる。この原因としては、排ガス流量や尿素水噴霧の不均一さ等が考えられるが、詳細については明らかではない。また、図9(b)より、運転時間の増加、すなわち触媒の劣化に伴って、アンモニアスリップが増加していることがわかる。

本試験で使用した燃料は、船用SCRが実用時に使われると考えられる燃料と比べて、かなり硫黄分が高く、排ガス温度が低い。すなわち、本試験は触媒劣化の加速試験に相当するものと考えており、このような試

図11 尿素量制御の試験結果

験結果を詳細に解析することで、船用SCRの耐久性能を評価できるものと考えている。

3.4 尿素量制御試験 2.2節で述べたように、船用SCRを開発するためには、アンモニアスリップを防ぐための適切な還元剤噴射制御が必要となる。図11は、ディーゼルエンジンの負荷を変化させた場合の脱硝率及びアンモニアスリップの試験結果の一例である。本試験においては、触媒前のNO_x濃度の実測値並びにあらかじめ求めておいたエンジン回転数に対する給気空気量の値から、当量比が80%となるように尿素量を計算・制御をしている。これより、脱硝率は80~100%程度で変動し、スリップアンモニアは2~10ppm程度で変動していることがわかる。本試験結果では過剰なアンモニアスリップや脱硝率の低下は確認されていないが、これらの変動は、触媒表面にアンモニアが吸着する現象の影響を強く受けているものと考えられ、この吸着現象を把握することによって、より高度な尿素量制御が可能になるものと考えられる。

4. フィールド試験用SCRシステムの開発

国土交通省および（社）日本舶用工業会が進めているプロジェクトでは、2010年度から実船実証試験を行っている。著者らは、実船実証試験と並行して、初期トラブル要因の把握及び必要な基本データ取得のための基盤的研究と位置付けた実海域フィールド試験用SCRシステムの研究開発を進めてきた⁴⁾。以下、フィールド試験用SCRシステムの概要並びに主な試験結果について記す。

4.1 SCRシステムの構成 フィールド試験用SCRシステムは、図12に示すセメント運搬船「パシフィッ

図 12 セメント運搬船「パシフィック・シーガル」

表 1 供試エンジンおよびSCR システムの仕様

機関形式 (シリンダ径×ストローク)	立型 4 サイクル (165 mm×210 mm)
定格出力	353kW@1200 min ⁻¹
使用燃料	A 重油
触媒形式	チタン・バナジウム系
触媒寸法	150×150×260 mm
触媒本数	30 本 (15 本×2 段)
セル数	45 (ノ1 辺)

図 13 SCR システムの船内への設置

図 14 フィールド試験用触媒ケースの外観

ク・シーガル」(東海運社所有、総トン数 7800 t) に搭載するために開発した。本船には 1 台の主機および 3 台のディーゼル発電機が搭載されている。フィール

図 15 尿素水噴射システム

図 16 自動運転シーケンスの動作確認

ド試験用 SCR システムは、運航中であっても任意に運転・停止させることができる 3 号ディーゼル発電機(定格出力 353 kW)の排気管に設置している。したがって、SCR システムに不具合が生じて本船の運航への支障はほとんどない。

表 1 に供試エンジン及び SCR システムの主な仕様、図 13 に触媒ケースの船内での設置位置、図 14 に触媒ケースの外観を示す。3 号ディーゼル発電機の燃料には A 重油を使用しており、定格運転時(負荷率 100%)の SV 値は 11000 h⁻¹ である。触媒ケースの長さは約 1.3 m であり、15 本×2 段の触媒を含めた総重量は約 400 kg である。同図に示すように、天井部の I 型鋼にアングル材を溶接し、触媒ケースをつり下げる構造としている。

4.2 尿素水噴射システムの構成 図 15 に尿素水噴射システムの構成を示す。尿素水タンク内の尿素水

図17 尿素水噴射ノズル

はポンプを通じてノズルへと送られる。尿素量はポンプの交流誘導モータに取り付けた汎用インバータにより制御される。船内電力を供給しているディーゼル発電機は実運航中の変動が少なく、負荷率は概ね 50～60 %の範囲で運転されている。そのため、高精度な尿素量制御は不要であり、あらかじめ計測した排ガス温度と NOx 濃度の関係から噴射する尿素量を求めている。また、空気コンプレッサ、尿素水及び洗浄水の配管には電磁バルブを取り付けてあり、これらは PLC (Programmable Logic Controller) 内部のリレー回路により制御される。

図 16 は、本フィールド試験における自動運転シーケンスの動作確認を行った結果である。本 SCR システムは、排ガス温度が 300℃を超えると運転を開始し、運転中は排ガス温度に応じて尿素量を制御する。また、ディーゼルエンジンを停止する際は、機関室の操作によって 5 分間のアイドリング運転を行う。アイドリング運転となり排ガス温度が 300℃を下回ると、尿素水噴射ノズルの洗浄を行い、SCR システムを停止させる。本システムでは、尿素水・洗浄水の配管中に複数の電磁バルブを取り付けており、それらを PLC によって制御することで尿素水噴射ノズルの洗浄時間ができる限り短時間でできるように工夫している。

4.3 尿素水噴射ノズルの開発 図 13 に示したように、本エンジンの排気管の直管部は約 2 m 程度であり、SCR の設置は長さ方向に制限を受けている。尿素水噴射位置と触媒との距離を十分に長くすることができないため、従来と同じ尿素水噴射ノズルでは適切な性能が得られない。そのため、数回の運転を繰り返しながら、尿素水噴射ノズルの構造の見直しなど、様々

図 18 各種ノズルを用いた場合の当量比に対する脱硝率の試験結果

な改良を進めてきた。

図 17 は、フィールド試験のために試作した尿素水噴射ノズルの一例である³⁾。いずれもステンレス鋼管を二重構造としており、内管中に尿素水、外管と内管の間の環状部に空気を流す二流体ノズルである。図 17(a)の Type A は、従来から使われているノズルと同様、尿素水の噴霧を排ガスの流れ方向に噴射する形式である。図 17(b)の Type B は、排気管内の空間を有効に用いるために尿素水の噴霧を排ガスの流れと直角方向に噴射する形式であり、穴数が 4 個と 6 個のノズルを試作している。図 17(c)の Type C は、複数の孔から噴射される噴霧を均一化させるために基本構造を見直した形式であり、大気開放状態で水を噴射し、安定した噴霧が得られることを目視によって確認している。

図 18 は、初期のフィールド試験において、それぞれの尿素水噴射ノズルを用いた場合の当量比に対する脱硝率の測定結果の一例を示している。このとき、ディーゼル発電機の負荷率は 50～60 %程度であり、排ガス温度は 330～360℃程度である。この結果より、Type A および Type B (4 穴) のノズルを用いた場合の脱硝性能は他のノズルを用いた場合と比べてかなり低いことがわかる。また、Type B (6 穴) のノズルを用いた場合、初期性能は高いものの十数時間の運転後、噴霧の状態が不安定になり、脱硝性能が低下するなどの不具合が確認されている。一方、Type C のノズルは比較的良好な脱硝性能が得られている。しかし、約 50 時間の運転後、尿素水に起因する固形物 (シアマル酸) が排気管内部に蓄積していることが確認されている。これは、円周方向に噴射した尿素水噴霧が排気管の内壁に衝突したことで生じる局所的な温度低下、あるいは尿素噴射停止時の液垂れなどが原因であると考えられる。

これらの結果を踏まえて、図 19 に示すような、噴射角度を調整したノズルを試作し、長時間運転を行うこととした。このような特殊なノズルを用いることで、

(a) ノズルの構造

(b) ノズルの外観

図19 多穴式尿素水噴射ノズルによる噴霧

図20 フィールド試験用SCRシステムの脱硝性能

図21 排気管中に堆積した固形物

約2200時間のSCR運転を行った後でも、概ね適切に機能していることを確認している。

4.4 長時間運転における脱硝性能 2009年9月に実運航中の自動運転を開始し、2011年8月までのSCR運転時間は約2200時間（ディーゼル発電機の運転時間は約7500時間）であり、本実海域フィールド試験は引き続き行われている。図20は本実海域フィールド試験における脱硝性能の試験結果であり、図19の尿素水噴射ノズルを用いた場合の当量比に対する脱硝率の関係を示している。若干のばらつきはあるものの、2009年9月の初期脱硝性能に対して、2000時間以上のSCR運転を行った後の2011年5月の脱硝性能はほとんど低下していないことがわかる。ただし、後述するように長時間運転後の触媒表面の損傷は激しく、触媒の耐久性を正確に評価するためには、より詳細な試験が必要である。

4.5 トラブル事例と課題 本実海域フィールド試験では約7500時間のディーゼルエンジンの運転を行っており、この間、配管系・電磁バルブ等のトラブル、尿素由来固形物であるシアヌル酸の析出など、多くの不具合が確認されている。

(a) 約1000時間SCR運転後

(b) 約2200時間SCR運転後

図22 運転後の触媒表面

図 21 は排気管中の尿素水噴射ノズル直後に堆積した固形物である。尿素水は温度条件によって固形物を発生するため、その対策は極めて重要である。

また、図 22 は約 1000 時間の SCR 運転（約 3800 時間の排ガス暴露）及び約 2200 時間の SCR 運転（約 6700 時間の排ガス暴露）を行った後の触媒表面（排ガス上流側）の写真である。これより、1000 時間の SCR 運転後の触媒表面はかなり汚れていることがわかる。また、触媒表面の一部はかなり損傷しており、触媒を長時間使用する場合の機械的強度や熱的強度、さらに触媒の劣化特性については今後の検討課題である。

5. まとめ

本報では、著者らが研究・開発を進めている尿素 SCR システムを紹介した。SCR を取り付けた船用 4 ストロークディーゼルエンジンによる性能評価試験においては、触媒寸法や排ガス温度が脱硝性能に及ぼす影響を詳細に調べ、多くの知見が得られている。フィールド試験用 SCR システムを開発し、長時間の運転を行うことで、尿素由来固形物の対応やシステムの信頼性向上、触媒の耐久性向上等、多くの技術課題を抽出した。

本研究プロジェクトでは、この他にも模擬排ガスをを用いた触媒単体の試験や触媒の劣化特性に関する研究、触媒の劣化・再生シミュレーションの開発などを進めている^{5),6)}。

以下、SCR システムを船用 4 ストロークディーゼルエンジンに適用する際の主な技術課題をまとめておく。

(1) 燃料中の硫黄分による触媒の劣化特性の把握と対策について詳細に調べ、船舶の運航状態に応じた SCR 運転方法を検討する必要がある。

(2) 安価でハンドリング性に優れた実用尿素量制御システムの開発が必要である。

(3) 尿素由来の固形物による尿素水噴射ノズルのつまりや排気管への堆積、スートによる触媒のつまりへの対策など、運用上の技術課題を解決する必要がある。

これらの技術課題を解決することで、長期に安定した性能が得られる船用 SCR システムが開発されるものと考えている。

謝 辞

本研究は、国土交通省及び（社）日本船用工業会が日本財団の助成を受けて行っている IMO NOx3 次規制に

対応するための環境エンジン開発プロジェクトの一環として、新潟原動機（株）殿、三井造船（株）殿、ダイハツディーゼル（株）殿との共同研究により行われた。また、フィールド試験の実施においては東海運（株）殿、太平洋セメント（株）殿に多大なご支援いただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 平田, 海上技術安全研究所 環境エンジン開発プロジェクトチーム, 日マリ学会誌 (2009-9), Vol. 44, No. 5, 149-151.
- 2) 平田, 近づく排ガス規制, その対応技術の動向, 第 10 回海上技術安全研究所講演会講演集 (2010-11), 71-78.
- 3) 平田, 船用 4 ストロークディーゼルエンジンにおける SCR 研究, 日マリ学術講演会 (2011).
- 4) Hirata, K., et al., Development of Marine SCR System and Field Test, Proc. of 8th ISME (Oct. 2009).
- 5) 岸ほか 8 名, 海上技術安全研究所研究発表会, 研究発表会講演集 (2009), 209-216.
- 6) 高木ほか 2 名, SCR 触媒性能劣化における還元剤の分散性の影響, 日マリ学術講演会 (2010), 135-136 など.

著者紹介

平田 宏一

- ・日本マリンエンジニアリング学会 正会員
- ・1967 年生.
- ・(独) 海上技術安全研究所.
- ・埼玉大学大学院理工学研究科.
- ・専門分野: 機械設計, 熱機関.

仁木 洋一

- ・日本マリンエンジニアリング学会 正会員
- ・1983 年生.
- ・(独) 海上技術安全研究所.
- ・東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科.
- ・専門分野: 船用ディーゼル機関.