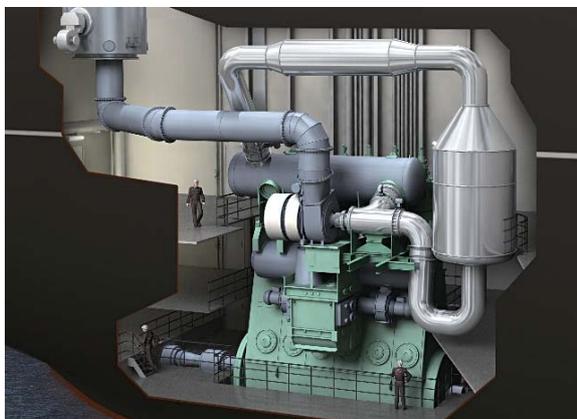


船舶 SCR 蒸発器内蒸発現象の可視化

Spray Visualization Experiments in SCR Vaporizer



藤本 恵美子	Emiko Fujimoto	①
得津 裕太郎	Yutaro Ezu	②
小林 諒平	Ryohei Kobayashi	②
田中 博仲	Hironaka Tanaka	③
馬場 真二	Shinji Baba	④
古賀 重雄	Shigeo Koga	④

あ ら ま し

IMO（国際海事機関）が制定した船舶の排気ガス規制である Tier III に対応するシステムとして、当社では脱硝触媒を用いた船用 SCR を開発した。当社の船用 SCR は、蒸発器と反応器で構成されており、蒸発器内では、尿素水を噴霧かつ加水分解させて還元剤であるアンモニアを生成させる。反応器内において、窒素酸化物 (NOx) とアンモニアを触媒で還元反応させて無害な窒素と水に戻している。本開発では、船用エンジンの排ガスを通じた蒸発器の内部で尿素水液滴の蒸発や加水分解がどのように進んでいるのかを確認するために、可視化実験を行い、設計データを取得した。船用 SCR エンジンを用いた蒸発器の可視化には、強振動・高温・高圧に耐えること、容易に覗き窓の掃除や交換が行えること、無人で計測が可能であることが装置設計の重要なポイントとなる。これらの技術課題を解決して、得た結果を報告する。

Abstract

Hitachi Zosen Corporation developed a marine SCR system that satisfies Tier III by using a denitration catalyst. Tier III is a regulation regarding the exhaust gas of ships set by the International Maritime Organization (IMO). Our SCR system, which is composed of an evaporator and a reactor, produces ammonia as a reducing agent via spraying and hydrolysis of a urea-water solution. In the reactor, NOx and ammonia are converted to harmless nitrogen and water by the reductive reaction using the catalyst.

During development, we obtained the design data through the visualization of experiments to confirm the process of the evaporation and the hydrolysis of the urea-water solution droplets in the evaporator occupied by the exhaust gas of marine diesel engines. For the visualization, it was important that the experimental equipment could bear vibration, high pressure and high temperature. Additionally, the easy maintenance of the sight glass of the equipment and an automatic measuring were also key points. In this paper, we explain how these problems were dealt with, and the results of the experiments.

1. 緒 言

大気汚染防止法の施行は船舶の世界にも波及しており、国際海事機関 (IMO) の定めるMARPOL条約付属

書VIでは、窒素酸化物 (NOx) および硫黄酸化物 (SOx) の排出に制限を課している。2016年施行予定である第三次規制、いわゆるTierIIIでは、2000年施行の第一次規制値よりNOx排出量を80%削減することを義務付けている。

これを受け、当社では世界最大級のエンジンライセンスであるMAN Diesel & Turbo社とTierIII対策向けエンジンシステムの共同開発を行った。^{1) 2)}

TierIIIに対応するにはSCR (選択的還元触媒反応装

① Hitz日立造船(株) 技術開発本部 環境・プラント研究室
 ② Hitz日立造船(株) 技術開発本部 機械・インフラ研究所
 ③ Hitz日立造船(株) 機械・インフラ本部 脱硝ビジネスユニット 設計部
 ④ Hitz日立造船(株) 機械・インフラ本部 原動機ビジネスユニット 技術部

置)かEGR(排ガス再循環システム)の適用が必須と考えられている。当社がすでに保有する陸上プラント施設向け脱硝技術はSCRであり、ハイレベルで実績も豊富である。したがって、この技術を応用して船用SCRの構築を行うことにした。

船用SCRはT/C(ターボチャージャ)の前置きタイプと後置きタイプに分けられる。T/C後置きでは排ガス温度が低くなるため、排ガスの再加熱が必要となり、コストが増大することが懸念される。一方、T/C前置きにすると、排ガスが高温であるため脱硝性能を十分有することは自明である上、高圧であるために体積に比例する必要触媒量は、T/C後置きに比べて少量に抑えることができ、コストや装置の大きさが小さくなるというメリットが上げられる。したがって、当社ではT/C前置きタイプの船用SCRの開発に取り組んだ。

図1に2ストロークエンジンにSCRを搭載した模式図を示す。排気ガスは排気マニホールドからダクトを介して、蒸発器・反応器を通り、T/Cに戻る。

SCRにはNO_xを還元するためにアンモニアを注入する必要があるが、船内でのアンモニア生成方法の確立は開発課題の一つとして上げられる。国内の陸上プラントではアンモニア水を蒸発させて生成する方法が一般的であるが、常温でも性状が不安定なアンモニア水を悪天の中を航海する外洋船に貯蔵することは、開発時間に制限がある中、解決しなければならない事項が多い。

したがって当社では、陸上車両用の脱硝装置還元剤として用いられている尿素水を船用エンジンに利用することにした。尿素水は常温で安定であり、高温条件において加水分解反応をおこしアンモニアと二酸化炭素になる物質である。

つまり、蒸発器と呼ばれる容器の中で尿素水を噴霧し加水分解させることでアンモニアを生成させる方法を採用した。しかし、船用エンジンにSCRを搭載した実績はほとんどなく、温度条件や噴霧条件、必要蒸発距離など最適設計に必要なデータが十分ではなかった。特に、高圧下での蒸発器内噴霧液滴の挙動に関しては、これまで、可視化実験を行った経験はなかった。

そこで、MAN Diesel & Turbo社の協力を得て、当社有明工場のテスト用エンジンにおいて、強振動・高圧・高

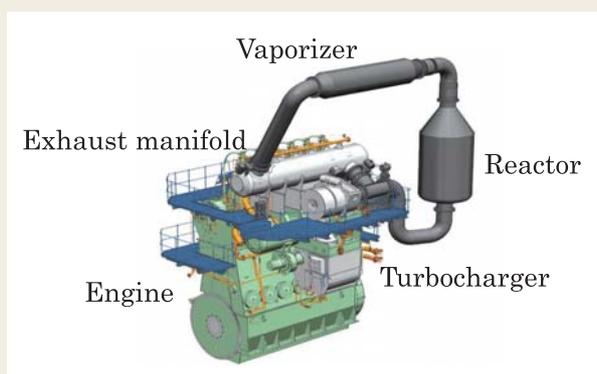


図1 SCR in use on 2 stroke engine

温条件下の蒸発器内の還元剤噴霧状況の可視化実験を行った。本稿では、その手法と得られた知見を報告する。

2. 実験目的

可視化実験の目的は、第一に、蒸発器内で尿素水の蒸発と加水分解が同時に終了しているかどうかを確認することである。図2に示すように尿素水は120℃以上で熱分解し、アンモニアと中間生成物であるシアヌル酸を生成する。160℃以上でシアヌル酸は加水分解し、アンモニアと二酸化炭素になると言われており^{3) 4)}、高温条件下にあるT/C前置きSCRでは加水分解は一気に生じると考えてきた。しかし、予備実験やMAN Diesel & Turbo社との協議により、一旦は熱分解を起こし、徐々に加水分解が進んでいる可能性が高くなってきたため、可視化実験で確認することにした。

第二の目的は、蒸発器内での液滴の蒸発距離を把握し、最適な蒸発器設計に反映させることである。

第三に、噴霧状況は大気中とほぼ同等な様子であることを目視確認することである。

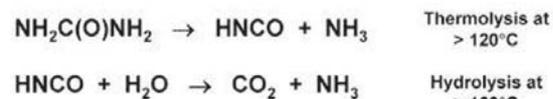


図2 NH₃ generation from urea

3. 実験装置

船用エンジンの運転時、SCRを含めたエンジン本体と周囲の構造は大きく振動するため、可視化装置には振動に耐えうる構成であることが要求される。当社が所有しているレーザ可視化装置には、LDV(Laser Doppler Velocimeter)やPDA(Phase Doppler Anemometry)(いずれもダンテック・ダイナミクス社製)などがあるが、これらの装置はレーザが水冷式の気体レーザ(Ar)であり、かつ共振器構成であるために強振動下では発振に必要なミラーの焦点がずれてレーザ発振が不能となる。また、これらの装置はレーザ発振後に形成される数μmの観測部に受信部の焦点を合わせる必要がある。本試験ではレーザ発振器と受信部をエンジンに搭載せねばならず、強振動が生じているエンジンの運転中に持続的な焦点調整も不可能である。

以上のような理由から、当社が所有している装置を船用エンジン運転時の強振動条件の下で使用することは不可能であると判断し、本試験では新たに装置を開発することとした。

試験装置の設定においては、噴霧粒子の径や速度などの詳細なデータを取得するよりも、強振動条件下での

使用に耐えることと粒子の有無を判断可能なデータを取得することに主眼をおいた。

そのため、レーザにはシンプルかつコンパクトな構成で耐振性に優れるダイオードレーザを採用し、受信部にはコンパクトCCDカメラを使用し、撮影された画像から噴霧液滴の状態を確認することとした。レーザとカメラは蒸発器に直接設置してエンジンと同周期で振動させることにより、焦点のずれを防止した。

また、蒸発器内は高温・高圧環境となるため、サイトガラス部は耐熱・耐圧性を有する構造とした上に、容易に清掃・取替え可能な構造とした。

加えて、試験装置周辺は高出力のレーザが発振されること、サイトガラスが破損した場合に排気が噴出することなど危険性が高いため、レーザとカメラは機関制御室から遠隔で操作・観測できるような構成とした。

3.1 レーザ可視化装置概要 図3にレーザ可視化装置の概略図を示す。本装置は大きく分けて、

- レーザユニット
- カメラ
- サイトガラスを含むレーザ・カメラの蒸発器への設置部

から構成される。

レーザユニットからは噴霧に対してレーザシートが照射される。シートの範囲に噴霧粒子が存在する場合、レーザ光は散乱する。この散乱光をカメラによって撮影することで、噴霧粒子の有無を判断する。すなわち、撮影映像に散乱光が確認される場合には還元剤は液体あるいは固体粒子として排気中に存在していることがわかり、散乱光が確認されない場合には還元剤は完全に蒸発して気体として存在していることがわかる。

以下、各構成要素について述べる。

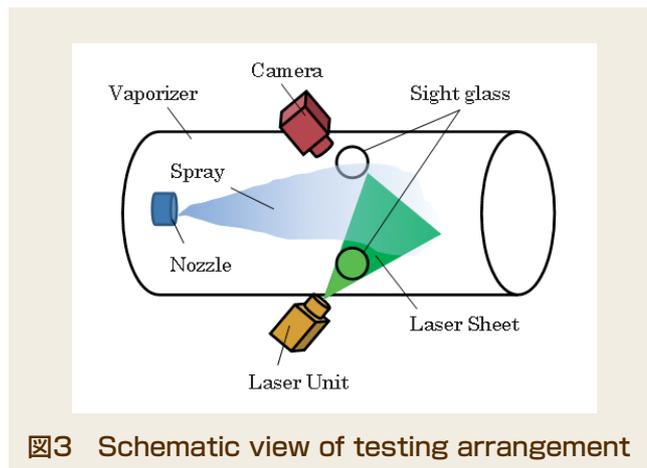


図3 Schematic view of testing arrangement

3.2 レーザシート作成方法の概要 レーザをシート状にするためには複数の光学レンズを組み合わせる必要がある。本試験においてもその手法を用いている。図4に今回使用したレンズ系とそれにより作成されるレーザシートの模式図を示す。ここで、上図はレーザシートの側面図、下図は平面図を表している。

レーザシートを構成するモジュールは1枚の球面平凸レ

ンズと2枚の円柱平凹レンズからなる。

レーザシートの側面から見た場合(図4上)、レーザは平凸レンズで集光され、レンズの焦点距離において収束することで、薄い膜状となる。

レーザシートの上面から見た場合(図4下)、レーザはモジュール内の球面平凸レンズによって集光された後、2枚の円柱平凹レンズによって拡大され、平面状となる。これにより、撮影エリアが確保される。

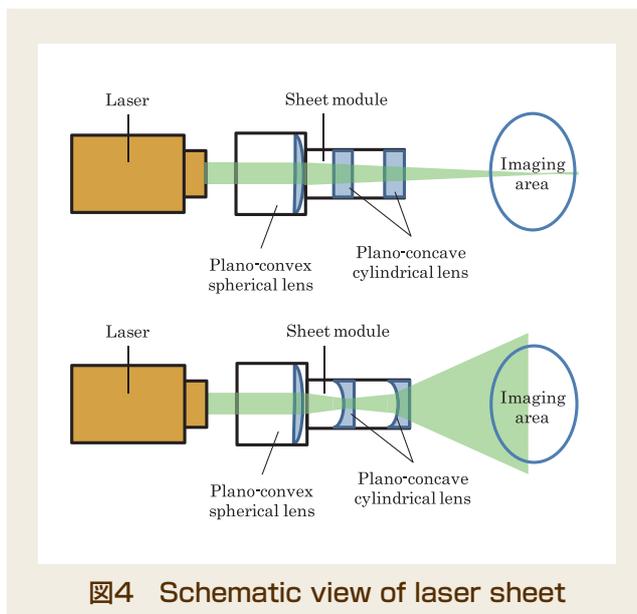


図4 Schematic view of laser sheet

3.3 カメラ カメラはCCDカメラを用いた。水平ビニング(受光感度)と垂直ビニングが設定でき、LANケーブルを介してPCでのリアルタイム観測・操作(露光時間やシャッター時間など)が可能である。

3.4 画像処理 試験時、カメラによって図5に示すような画像が取り込まれる。図5は噴霧前の状態であるが、右側に排ガス成分分析用のサンプリングチューブ、左上にマンホールが観察される。また、画像下部の三日月状の影は、扇形に広がるレーザがサイトガラスの端面に反射しているものと推測される。画像全体に見られる縦の影はサイトガラス表面の付着物の影だと推測される。

これらの情報は図6に示すように、噴霧中にも観察されるが、噴霧粒子を評価する際には必要のない部分であるため、バックグラウンドの情報を引き出す処理を行った。結果を図7に示す。画像処理を行うことによって、噴霧による散乱光を観察することが可能となった。

4. 実験結果

4.1 最適取り込み条件 露光時間、ゲイン(増幅値)やビニングを変更し、液滴の有無を判断しやすいように調整した例を図8に示す。左図より右図の方が液滴の有無の判断がしやすい。各実験条件においても、取り込み条件を最適化し、液滴の個数が少なく散乱光が弱い場合でも検出できるように調整した。

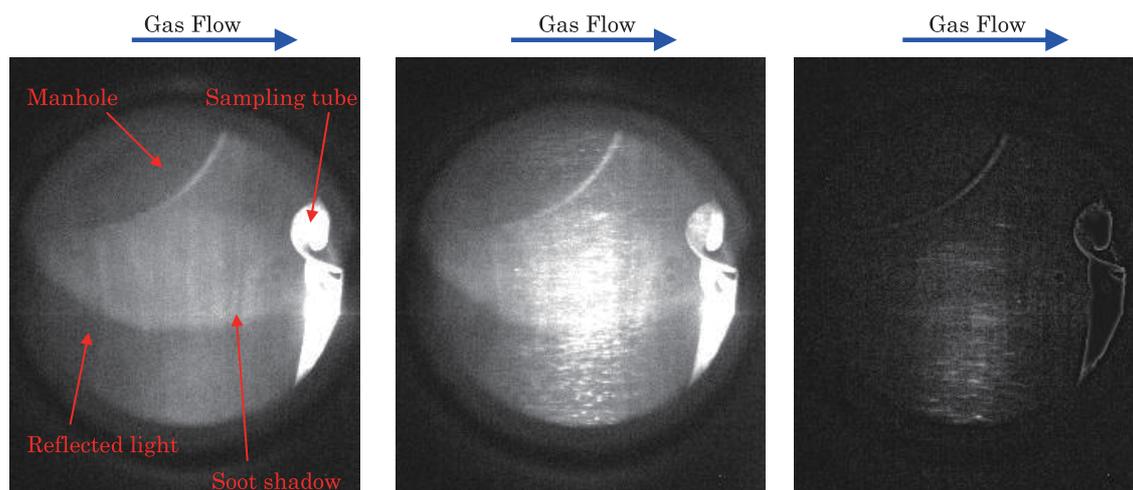


図5 Before spraying

図6 Spraying image

図7 After image processing

Urea	45 l/h	45 l/h
Exposure time	10msec	3msec
Gain	26	19
Binning	1×1	4×4
Image		

図8 Difference of images due to camera condition

4.2 蒸発と加水分解の差

水と尿素水を噴霧した結果を図9に示す。小流量と大流量の場合である。小流量の場合、水を噴霧しても液滴が確認されないことから、蒸発は終了したと判断できる。しかし、尿素水の場合はわずかに散乱光が確認された。

大流量の場合、水と尿素水を比較すると、尿素水を噴霧した方が明らかに散乱光は強く観測された。そこで、水と尿素水の違いについて、以下のように考察した。

図10に示すように、蒸発と加水分解が同時に進行すると仮定する。噴霧液体の蒸発が終了した地点で計測すると、生成されるものは全てガスとなっており、レーザー光はほぼ散乱しなくなる。また、未蒸発の位置で計測を行っても、水の場合も尿素水の場合も同じように液滴の散乱光が観測される。つまり、水でも尿素水でも計測結果は同じであると予測される。

一方、図11に示すように、蒸発が先に進み、加水分解は後から生じると仮定する。尿素水の蒸発が終了した直

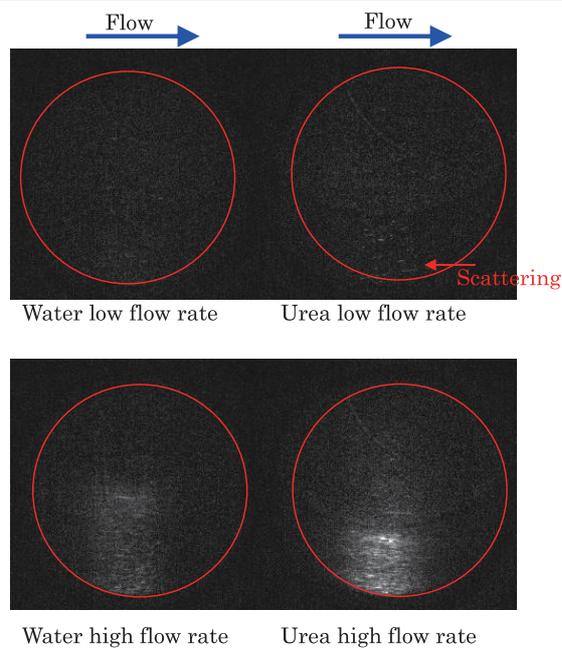


図9 Difference due to injection amount

後の排ガス中には、尿素の粉やシアヌル酸が存在することになる。これらはレーザーに対して散乱性が強いいため、この場合に水と尿素水の噴霧結果を比較すると、水よりも尿素水噴霧の方が散乱光は強く観測されると推測される。

今回、尿素水のほうが強い散乱光が計測されたことから、蒸発器内では蒸発が先に進み、加水分解は遅れて生じていると推測される。

4.3 蒸発距離 図12は噴霧量を同じ増分で増加させた結果である。①から⑧まで数字が大きくなるにつれ、噴霧量が増加している。

噴霧量が少ない間では液滴は確認されなかった。これらの計測をエンジン負荷や計測位置を変えながら行い、

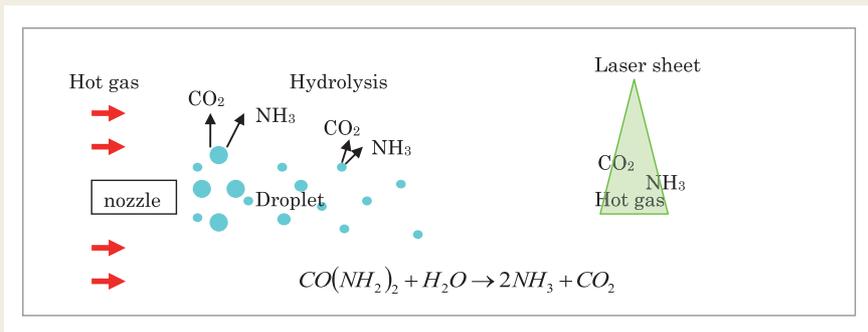


図10 The case when evaporation and hydrolysis simultaneously arose

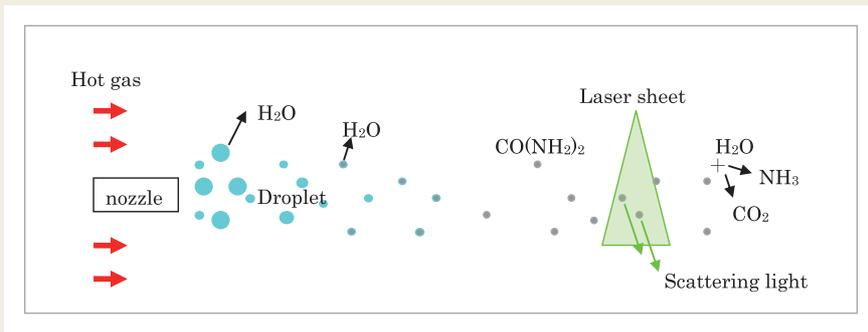


図11 The case when hydrolysis arose after evaporation

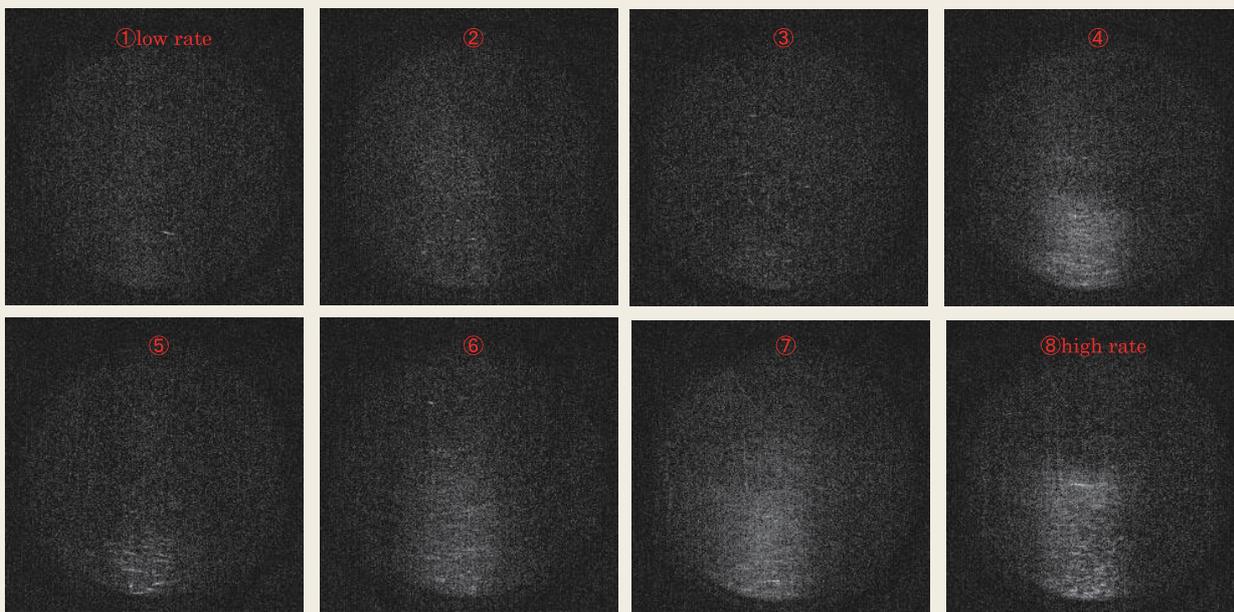


図12 Difference due to injection amount

噴霧量に対する蒸発終了地点を算出した。

4.4 噴霧の様子 以上の可視化画像より、蒸発器内は高圧下であるが、ノズルからの噴霧は大気圧中とほぼ同等に行われていることを把握することができた。

5. 結 言

蒸発器内の尿素水噴霧状況を把握するために、強振動かつ、高温・高圧に耐えうる可視化装置を構築し、蒸

発器内の液滴の挙動の可視化を行い、以下の結果を得た。

(a) 尿素水の加水分解 尿素水液滴内の反応は、高温の蒸発器内においても、蒸発と加水分解が同時に進行するのではなく、蒸発のほうが早く完了することを可視化によって確認した。

(b) 蒸発距離の把握 エンジン負荷、噴霧量、計測位置を変更した実験を行うことで、液滴の蒸発完了距離を計測した。今後、この蒸発距離のデータを蒸発器設計指針に反映させる予定である。

(c) 噴霧の様子の把握 尿素水の噴霧パターンは概ね大気圧下と同様に霧状になっていることを確認した。

謝辞

本開発に関して、終始ご指導・ご鞭撻を頂戴いたしましたMAN Diesel & Turbo社のJohan Hult博士に深謝いたします。また、関係機関との調整を行い本実験の実現に貴重な時間をさいてくださったMAN Diesel & Turbo社のHenrik Christensen氏や協力していただいた皆様へ心から感謝の気持ちと御礼を申し上げたく、謝辞にかえさせていただきます。

参考文献

- 1) H.Christensen:MAN Diesel & Turbo,Continuous Development of TierIII SCR for Large Two-Stroke Diesel Engines, 27th CIMAC World Congress, **2013**.
- 2) T.Fujibayashi; S.Baba; H.Tanaka:Development of Marine SCR System for Large Two-Stroke DieselEngines Complying with IMO NOx TierIII, 27th CIMAC World Congress, **2013**.
- 3) P.G. Blakeman et al.:SAE Paper, 2001-01-3624, (**2001**).
- 4) 平原祐:日本マリンエンジニアリング学会誌, **2008**,43 (6), 2-4.

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 技術開発本部
技術研究所 環境・プラント研究室
藤本 恵美子
Tel : 06-6551-9435 Fax : 06-6551-9906
e-mail : e_fujimoto@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Technology Development Headquarters
Technical Research Institute
Environmental System & Plant Laboratory
Emiko Fujimoto
Tel : +81-6-6551-9435 Fax : +81-6-6551-9906
e-mail : e_fujimoto@hitachizosen.co.jp



藤本 恵美子



得津 裕太郎



小林 諒平



田中 博仲



馬場 真二



古賀 重雄