

# Readout

## HORIBA Technical Reports

June 2019 No. **52**

### 特集 船舶のグリーンイノベーション

- 巻頭言 ・安全・効率的・持続可能な未来のモビリティのために
- トピックス ・仏ジョバン イボン 創業 200 周年
- 総説 ・船舶業界に展開する HORIBA の分析技術
- 寄稿論文 ・IMO における排ガス規制動向と規制対策技術の紹介

**HORIBA**<http://www.horiba.com/jp/publications/readout/>

地球全体の大气汚染や地球温暖化問題が叫ばれるなか、海事産業においても環境規制が強化され、規制対応に向けた技術開発が加速しています。本号では、船用計測機器を通じた我々の取り組みを特集しました。



#### ■表紙写真

撮影: 写真家 松井秀雄氏  
(二科会写真部 会員)  
波の穏やかな瀬戸内海に太陽の光がふりそそぎ鏡のように輝いている。水面に映る浮き雲の影。その縞模様我心ひかれました。

#### ■誌名について

誌名 Readout(リードアウト)には、「当社が創造・育成した製品・技術を広く世にお知らせし、多くの皆様に読み取っていただきたい」という願いが込められています。

## 特集 船舶のグリーンイノベーション

### 巻頭言

- 4 安全・効率的・持続可能な未来のモビリティのために  
長野 隆史

### トピックス

- 6 仏ジョバン イボン (Jobin Yvon) 創業 200 周年  
ラムダン ベンフェラット

### 総説

- 9 船舶業界に展開する HORIBA の分析技術  
上田 永人

### 特別寄稿

- 12 IMO における排ガス規制動向と規制対策技術の紹介  
高橋 千織

### 特集論文

- 20 船舶排ガス浄化用水質モニタ EG-100  
富岡 紀一郎, 羽島 雄大
- 28 船舶エンジン SCR システム用尿素水の品質管理のための簡易迅速測定  
コンパクト水質計 LAQUAtwin pH メータを用いた尿素水の品質評価  
桑本 恵子
- 32 SLFA Series による船舶燃料の簡易硫黄濃度分析  
青山 朋樹
- 35 船舶用 NOx 分析計 MEXA-820NOx  
日下 竹史, 納谷 裕
- 42 船舶用エンジンダイナモメータ  
トーステン ボッジュ

### 製品紹介

- 48 油分抽出溶媒 H-519  
山本 麻由佳

### トピックス

- 52 平成 30 年度近畿地方発明表彰
- 54 HORIBA World-Wide Network

While global efforts are being addressed toward air pollution and global warming issues, environmental regulations will also be strengthened in the maritime industry. The technology developments in response to such regulations are accelerating. This issue focuses on our undergoing efforts toward marine measuring instruments developments.



Sun is pouring on to calm Seto Inland Sea, and it is shining like a mirror. The shadow of floating cloud on the sea surface. I was mesmerized by its striped pattern.  
-Photographer Hideo MATSUI-  
(Member of Nikakai Association of Photographers)

#### Name of the book

This book is named "Readout" in the hope that "the products and technology we have created and developed will be read out and so become widely known".

## Green Innovation for Marine Shipping Industry

### Foreword

- 4** To Achieve Safer, More Efficient and Sustainable Mobility in the Future  
Takashi NAGANO

### Topics

- 6** HORIBA Jobin Yvon 200 Years of Optical Innovation  
Ramdane BENFERHAT

### Review

- 9** HORIBA's Analysis Technology Expanding in Shipping Industry  
Nagato UEDA

### Guest Forum

- 12** Selecting Technologies for Compliance with Environmental Regulations in Shipping  
Chiori TAKAHASHI

### Feature Article

- 20** Onboard Water Quality Monitoring System EG-100 for Ships  
Kiichiro TOMIOKA, Yuta HASHIMA
- 28** Simple and Quick Quality Confirmation Method of Aqueous Urea Solution for Marine SCR System  
Evaluation of Alkalinity of Aqueous Urea Solution with LAQUAtwin pH Meter  
Keiko KUWAMOTO
- 32** Sulfur Concentration Analysis of Marine Fuel Oil with SLFA Series  
Tomoki AOYAMA
- 35** NOx Analyzer for Ships MEXA-820NOx  
Takeshi KUSAKA, Hiroshi NAYA
- 42** Engine Dynamometers for Marine Applications  
Torsten BODSCH

### Product Introduction

- 48** Oil Extraction Solvent H-519  
Mayuka YAMAMOTO

### Topics

- 52** Kinki Region Invention Awards 2018
- 
- 54** HORIBA World-Wide Network

# 安全・効率的・持続可能な 未来のモビリティのために



## 長野 隆史

Takashi NAGANO

株式会社 堀場製作所  
取締役

Director (Board Leader of GLOBAL  
ATS BOARD)  
HORIBA, Ltd.

HORIBAの自動車計測事業は、モビリティ全般における排ガス計測の歴史と共に歩んできました。特に自動車の排ガス規制の強化に伴い、複雑化してきた排ガス認証、内燃機関適合において、そのキーとなる計測、分析で世の中に貢献してきたものと自負しています。一方、陸上、海上、空におけるモビリティ全体での重要課題は長らく、環境、エネルギー効率、安全という3分野であると捉え、現在も大きくはその方向性は変わっていないと考えています。

HORIBAは、船舶分野においても冒頭で述べた排ガス計測を主体としたガス計測装置を開発してきました。また、水質環境に関しても、長年、河川や湖、海水の様々な成分を計測できる水質計測装置を提供してきました。さらに、2005年にドイツ Schenck社 DTS\*<sup>1</sup>部門を買収することにより、動力系、駆動系、ブレーキ系試験機を中心としたメカトロニクス分野へ事業を拡大し、エネルギー効率分野、安全分野における計測、試験の提供も開始しました。

近年の自動車分野において、環境については実路認証試験(RDE)等を中心としたより厳しい排ガス規制、エネルギー効率についてはxEVと呼ばれるパワートレインの電動化、安全については従来の衝突安全(Passive Safety)から予防安全(Active Safety)へ、そしてコネクテッド自動運転車(CAV)領域へと急速に拡大してきています。

こういった市場要求に対して、HORIBAは、2015年に英国のMIRA社を買収することにより、排ガス、xEV\*<sup>2</sup>、安全、CAV分野において、計測や分析だけではなく、試験、エンジニアリング、コンサルタンシーの能力を得て、包括的なソリューションを提案できる体制を整えました。具体的には、排ガスのRDE関連において、実車走行、車両台上試験までの一貫した対応を実現しています。また、xEV分野では、電

動車両(HV<sup>\*3</sup>, PHV<sup>\*4</sup>, BEV<sup>\*5</sup>, FCV<sup>\*6</sup>)や2次電池の適合試験, エンジニアリングを提供し, 安全分野では, クラッシュ試験を中心としたPassive Safety はもちろんの事, EMC<sup>\*7</sup>試験, 機能安全, サイバーセキュリティの領域まで対応しています。さらにCAV分野においても, 専用試験路を用いた試験, エンジニアリング力を備えています。特に, xEV分野では, 2018年に買収したドイツFuelCon社の技術を使って, 電動車両のバッテリーや燃料電池の評価システムの供給が可能になりました。これによりHORIBAが従来から持っている電動車両試験装置やHORIBAのコアである素材分析装置の技術を融合することで, 電力源から最終の駆動力に至るトータルのエネルギー効率に対するソリューションを提供することが可能になりました。

このような新しい潮流の波は, 船舶の分野にも広がっています。地球は閉ざされた系であるため, 船舶が遠く離れた海で放出する排ガスや排水については国境を越えて環境を保全する取組が求められます。また大量のエネルギーを消費する船舶においては効率向上の効果もより大きくなるため, エネルギー関連の施策においても各国の規制を考慮して取り組むグローバルな視点が求められています。

人類の根源的な欲求である人, 物の移動, これを実現するモビリティ社会は, 様々な課題を抱えています。HORIBAは引き続き, 従来の計測, 分析のコア技術を生かしつつ, HORIBA MIRAの強みである, 試験, エンジニアリング, コンサルタンスを最大限利用し, アプリケーションに重点を置いた計測, 分析のトータルソリューションをグローバルに提供することで, モビリティ社会に貢献していきます。

\*1 : DTS(Development Test Systems): 自動車関連計測事業部

\*2 : xEV : 様々な電動化車両の総称

\*3 : HV(Hybrid Vehicle): ハイブリッド自動車

\*4 : PHV(Plug-in Hybrid Vehicle): プラグイン・ハイブリッド自動車

\*5 : BEV(Battery Electric Vehicle): 電気自動車

\*6 : FCV(Fuel Cell Vehicle): 燃料電池車

\*7 : EMC(Electro-Magnetic Compatibility): 電磁環境両立性。機器がその動作によって他のものに妨害を与えず, またその動作が他のものによって妨害されないこと。

\*8 : 本内容は特段の記載がない限り, 本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

## 仏ジョバン イボン (Jobin Yvon) 創業200周年

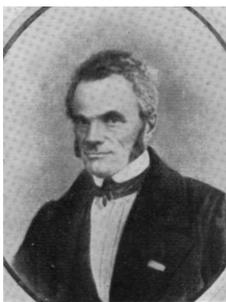
HORIBA Jobin Yvon 200 Years of Optical Innovation

### ラムダン ベンフェラット

Ramdane BENFERHAT



Auguste-Jean Fresnel  
1788-1827



Jean-Baptiste Francois  
Soleil 1798-1878



Cordouan lighthouse tenth-tallest  
"traditional lighthouse" in the world: 1611

ジョバン イボン(Jobin Yvon)は今年創業200周年を迎えます。

Jobin Yvon, the predecessor of HORIBA France, celebrates the 200th anniversary this year 2019. This is historical comments on their technical innovation as the global leading company developing and supplying various systems with world cutting edge spectroscopic technology.

### はじめに

現ホリバ・フランスの前身である「ジョバン イボン(Jobin Yvon)」は、今年2019年で創業200周年を迎える。1819年の創業以来、グローバル・リーディングカンパニーとして世界最先端の分光技術を用いた装置の開発と製造に取り組んできた。ここに、その光学分野の技術革新の歴史を振り返る。

### 1819年-1892年：フレネルレンズで有名に

18世紀、ヨーロッパ諸国は、アメリカ大陸からの砂糖、コーヒーとココア豆、アジアからの紅茶、香辛料と絹、そしてヨーロッパからの製造品で広大な植民地時代の帝国を築き上げた。この貿易によってヨーロッパの大西洋沿岸地域は発展し、海上の安全にとって、灯台の有効性が認識され重視されるようになっていた。1819年6月、天文・物理学者でもあったフランス首相のFrançois Arago(フランソワ アラゴ)によって、光の波動論の発見者として著名なAugustin Fresnel(オーギュスタン フレネル)がフランスの灯台委員会に推挙された。これによりFresnelはイギリス海峡と大西洋沿岸の灯台の改良を担当することになったが、数か月後には強力な光を海上に投射できる階段状レンズ(Fresnel lens)を設計した。彼は光学技師のJean-Baptiste François Soleil(ジャン バプティスト フランソワ ソレイユ)にこのレンズの製造を依頼した。これが、Jobin

Yvonのビジネスと人類への貢献の始まりとなった。1819年-1892年の間、このビジネスは着実に成長し、光の偏光度を測定する光学計器・光学部材の設計分野において、非常に有名な会社となった。



Fresnel lens



Leon Laurent polarimeter



Babinet compensator



Soleil-Babinet saccharimeter dedicated to the measurement of sugar in blood.

## 1892年-1996年：Jobin Yvonの時代 —職人的工房から近代工場へ—

1881年にフランスのEcole Polytechnique (エコール・ポリテクニーク)を卒業し砲兵将校となっていたAmédée Jobin (アメデ ジョバン)が、光の回折の研究で著名な大物理学者のAlfred Cornu(アルフレッド コルニュ)の勧めを受けて、1892年にLéon Laurentの工房を継承した。Jobinは前任者と同じく新しい生産設備の導入に注力し、同時代において最も著名な、Alfred Pérot(アルフレッドペロー), Charles Fabry(シャルル ファブリ), Henri Chrétien(ヘンリ クレティアン)といった科学者達と強く連携して仕事を進めた。そのことが1900年に開催されたパリ万国博覧会においてFabry-Perot(ファブリ・ペロー)干渉計1号機を展示することにつながった。

もう一人、Amédée Jobinの娘婿で、1903年にEcole Polytechniqueを卒業したGustave Yvon (ギュスターヴ イボン)が1911年に同社に入社した。Gustave Yvonは特に品質向上に注力したが、そのためには職人気質の工房を近代的な工場に変革することが必要であった。彼の努力によってJobin Yvonブランドは今日においても世界中で優秀かつ高品質な光学部品の代名詞となっている。

1923年、同社は社名を変更し、「Jobin Yvon」となった。この時期、同社は学術分野における著名な物理学者や光学技術者達と数多くの連携関係を持っていた。その結果、そうした連携の下で設計された計測器のいくつかが科学技術の進歩に貢献することとなった。最もよく知られているのは、Vernes-Bricq(ベルヌブリック)とGustave Yvonによって設計された吸光/拡散分光光度計\*1, Lecomte de Noüy(ルコント デュヌイ)による表面張力計\*2, および、Paul Meunier(ポール ムニエ)による光電光度計\*3である。

- \*1： Absorption and diffusion spectrometer, 主にオパシメータ(不透明度計)の名称で、粒子の量または質量を推定するために完全に透明ではない物質の不透明度を決定するのに使用される。
- \*2： Tensiometer, リング法(Du Nouy ring method)として知られている。
- \*3： 物質を透過した光の強さを光電管または光電池により電気信号に変換して検知する光度計。溶液の吸収係数、散乱強度などを測定する。

1942年、82歳になったAmedee Jobinの引退によりGustave Yvonとの協業は終了したが、科学に強く興味を持っていた世界的に著名なプロテニス選手のRene Lacoste(ルネ ラコステ)が強力な出資者として経営に加わることとなった。こ



Amedee JOBIN



Gustave YVON



Jobin Yvon logo mark



Replica of ruled diffraction gratings

の衝撃的な出来事に続いて、同社は電子回路とアナログデータ収集機能を備えた自動計測器を初めて設計し、さらにヨーロッパで刻線機械を使って製作された最初の回折格子(ルールド・グレーティング)の量産を開始することによって、光学計測器業界のリーダーとしてのポジションを確立したのである。

ルールド・グレーティングを複製する技術が急速に進歩したことによって、光学計測器の世界は大きく変わった。感度の高い検出器の登場と相まって、分光の新しい時代が始まり、世界中の著名な科学者が使用する数多くの計測器が設計されるようになった。

1969年、ホログラフ(光の干渉縞を記録する技術)による回折格子(ホログラフィック・グレーティング)が初めて開発されて、迷光強度が極めて低く、従来とは異なる寸法形状の回折格子の設計が可能になったことにより、Jobin Yvonは分光波長の測定範囲限界を真空紫外光から赤外線まで押し広げることができた。こうした開発成果とレーザー光源、多チャンネル検出器の出現を組み合わせることによって、顕微ラマン分光と蛍光分光に使用される高精度な分光装置における確固たる地位を確立した。

この間、いくつかの事業買収(SPEX, Dilor, SOFIE, Genoptics他)があり、分光業界における同社のリーダー的ポジションはより強化された。

### 1996年：Jobin YvonはHORIBAグループの一員に

1997年、Jobin Yvonは、電気化学、赤外・X線分光の強固な技術基盤を有するHORIBAグループの一員となった。この買収によってHORIBAはその科学計測機器事業分野を充実させ、Jobin Yvonの歴史を継承する担い手となった。

### おわりに -2019年 そして、これから

Augustin FresnelからGérard Mourou(ジェラルド ムル：2018年ノーベル物理学賞受賞者)に至る数多くの開拓的な科学者との交流を通じて、HORIBAは常にお客様の目的とニーズの理解に努めてきた。これからも、皆様とともに、未来を拓く新たな光学部材および計測手段の発展に貢献していきたいと考えている。創業200周年の記念式典は2019年11月22日にホリバ・フランス社にて行われる。

\*本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。



### ラムダン ベンフェラット

Ramdane BENFERHAT

株式会社 堀場製作所 グローバル本部  
事業戦略担当副本部長 博士(材料物理学)  
Deputy General Manager for Business Strategy  
Global Business Div. HORIBA, LTD. Ph. D.

## 船舶業界に展開するHORIBAの分析技術

HORIBA's Analysis Technology Expanding in Shipping Industry

日本の発展と将来に国際輸送は不可欠であり、圧倒的な物量をほこる海上輸送はその重要な手段として発展し船種の大型化が進むと共に船舶排ガスによる大気汚染が注目されるようになってきている。HORIBAは船舶分野における多くの分析計に携わり、現在、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)鑑定用排ガス分析計、選択触媒還元脱硝装置制御用NO<sub>x</sub>センサ、燃料油中硫黄分析計、排ガス浄化装置用水質分析計、尿素水劣化検査キット等を船舶業界へ提供している。

International transportation is essential for Japan's development and future, and marine transportation has been important for overwhelming transport capacity where air pollution by ships exhaust gas attracts attention with the upsizing of ships and vessels. HORIBA has engaged in various analyzers and is currently supplying to shipping industry such as exhaust gas analyzer for NO<sub>x</sub> identification, NO<sub>x</sub> sensor for SCR control, analyzer for sulfur in fuel oil, oil-in-water concentration analyzer, water quality analyzer for exhaust gas purifier, and SCR urea water deterioration inspection kit etc.

### はじめに

日本は四方を海に囲まれており、日本の過去から現在に至る発展と将来は、海上輸送・航空輸送無くして語れない。その中でも圧倒的な物量をほこる海上輸送は、輸出入の重要な手段として発展して来た。海上輸送に於いては沢山の物資を一度に運搬する事が重要なファクターであるため、コンテナ船、大型タンカー、自動車運搬船等の船種は大型化が進んだ。これに伴い、大気と海洋の汚染防止や、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出抑制等の環境問題に対する対策がますます求められるようになってきている。大気に関する環境問題では、これまで発電所や工場等の固定発生源、車両等の移動発生源を要因とする陸上が主であったが、海洋における船舶排ガスによる大気汚染が、船舶からの排水や廃棄物、海難事故汚染による海洋汚染とともに注目されるようになってきた。

### 船舶業界におけるHORIBAの分析計

HORIBAの排ガス分析計は、医学用呼気ガス分析計からスタートし、エンジンや車両から排出される排ガス分析計へと進化を遂げた。また、HORIBAは総合分析計メーカーとして、固体・液体・気体全ての分野に提供できるコア技術を有しており、1980年代の排水中油分濃度計(OCMAシリーズ)の提供にはじまり、船舶分野における多くの分析計に携わってきた。現在、ガスの分野では陸上窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)鑑定用排ガス分析計(MEXA-1700DS)や選択触媒還元脱硝装置(SCR)制御用NO<sub>x</sub>センサ(MEXA-820NO<sub>x</sub>)を、科学の分野では燃料油中硫黄分析計(SLFA-60M)を、水質の分野では、上記の油分濃度計に加え排ガス浄化装置用水質分析計(EG-100)、SCR尿素水劣化検査キット等を船舶業界へ提供し

上田 永人  
Nagato UEDA

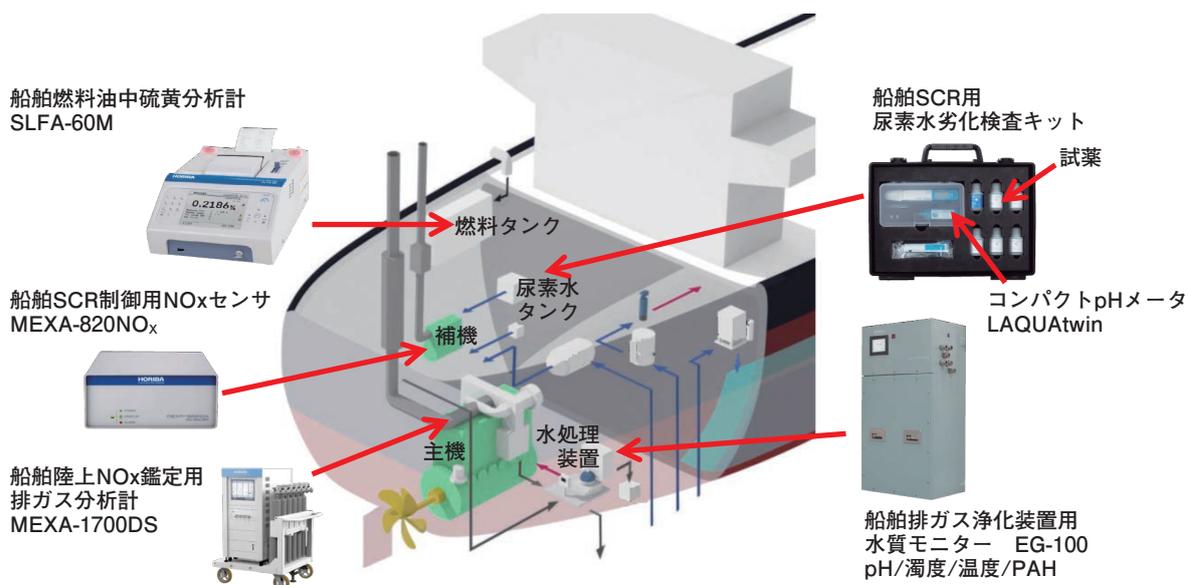


Figure 1 HORIBA's analyzers for ships

ている (Figure 1)。

### エネルギー産業におけるHORIBAの役割

世界に於いては、原子力発電への懸念や再生可能エネルギーなどの展開でエネルギー源が多様化し、エネルギー変換の形態は今後大きく変化していくと予想される。しかし、その中であっても、内燃機関は重要なエネルギー源としてまだまだ使用され続けると考えられる。たとえ、排ガスが少ない電気推進船であっても、使用される電気エネルギーを何らかの方法で作らねば成立しない。一方で、電気推進船などで必要とされるエネルギーを一旦蓄えるためのバッテリー技術は、その存在の重要度を増し、燃料電池船等の新しい提案もされている。その結果として、動力の効率的な利用を実現するため、大気・水質環境の計測や分析は益々重要になってきている。燃料の代替えや新規制対応等の変化に伴い、これらの分析計は様々な要求に答えていかなければならない。HORIBAは、Figure 2に示すように、エネルギー生産、輸送・蓄電、消費・環境の各段階に応



Figure 2 HORIBA's technology expanding in whole energy industry



Figure 3 HORIBA's business expansion

じて、エネルギーの形態の変化に対応して、あらゆる断面で分析技術を提供していくことができる。

### おわりに

HORIBAの事業(Figure 3)は、ヒトの豊かな未来や地球規模で対応しなければならない事象を見据え、ナノサイズから地球サイズに展開している。お客様と共により良い環境改善に貢献できる企業として、また、業界の良きパートナーとして、これからもたゆまぬ努力を続けていきたい。

\*本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。



上田 永人

Nagato UEDA

株式会社 堀場製作所  
 営業本部 大阪セールスオフィス 船舶担当マネジャー  
 Manager for ships industry business  
 Osaka Sales Office, Sales Division  
 HORIBA, Ltd.

## IMOにおける排ガス規制動向と規制対策技術の紹介

Selecting Technologies for Compliance with Environmental Regulations in Shipping

高橋 千織

Chiori TAKAHASHI

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所  
海上技術安全研究所 環境・動力系動力システム研究グループ長  
博士（工学）  
Power and Energy System Research and Development Group Head  
Marine Environment & Engine System  
National Maritime Research Institute  
Dr. Eng.



大気汚染や地球温暖化問題に対する全球的な取り組みの必要性が叫ばれるなか、国際海事機関(IMO)においても大気環境規制の強化が段階的に実施されてきた。IMOにおける排ガス規制は、MARPOL条約附属書VIをもとに実施されており、その規制動向を概説する。また、これらの規制対策技術については、現在、規制の必要性について検討されているブラックカーボンについて行われた議論をもとに紹介する。適切な規制の実施のためには、適切な評価のための計測技術と計測手順の確立が重要である。

Owing to the rapid growth of global movement against air pollution and global warming, many measures have been increasingly required in recent years to reduce air pollutant and greenhouse gas emission from ships. Emissions of air pollutants from international shipping are regulated by MARPOL Annex VI, i.e. an international convention under the purview of International Maritime Organization (IMO), which sets some limits of air pollutants contained in exhaust gas from marine diesel engines and requires to improve ship energy efficiency by both technical and operational measures. In this article, the trend of relevant regulations is outlined, taking as an example the discussion on potential control measures against emission of Black Carbon, which has been considered by IMO based on existing Black Carbon abatement technologies, referring to the importance of appropriate measurement technologies and procedures for an effective implementation of environmental regulations.

キーワード：IMO, 排ガス規制, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, GHG戦略, ブラックカーボン

### はじめに

わが国の貿易に占める海運の割合は、重量ベースで考えると2016年時点で輸出入全体の99.6%を占めており、海運はわが国の貿易に不可欠な輸送手段である。また、国際海運は2012年時点で世界の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量の約2.2%を占めたと推定されており、物流全体として見た場合、最もエネルギー効率の高い輸送手段となっている<sup>[1,2]</sup>。しかしながら、世界的に今後も海上輸送量は増加し続けることが見込まれていることなどから、海運分野においても環境負荷低減に向けた取り組みが加速している。

外航船舶が自動車などの陸上の輸送機関や工場などの固定排出源と大きく異なるのは、国境を越えて移動するため、1隻の船舶でも船社、船籍(船の登録国がその船舶の運航会社の国籍と一致するとは限らない)、寄港地など、複数国が

関与すること、また売買等によって船籍が変わることが珍しくない点にある。このため、安全や環境規制も含めた海事分野の諸問題については、国連の専門機関である国際海事機関(International Maritime Organization, IMO)において検討されている。このうち、船舶からの大気汚染防止については、「1973年の船舶による汚染の防止のための国際条約に関する1978年の議定書」(MARPOL条約)の中の附属書VI(1997年9月採択、2005年5月発効)に基づき、国際的な規制が行われている<sup>[3]</sup>。附属書VIは船舶からの窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)、硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)、粒子状物質(PM)などの排ガス規制のほか、タンカー等の貨物から発生する揮発性有機物質(VOCs)の削減、冷房設備や消火設備として使用されるオゾン層破壊物質の削減、船用燃料油の品質等に関する規制なども含んでいる。IMOでは世界的な環境保護意識の高まりや技術の進歩を受け、規制強化に向けて条約の改正を常に検討、実施している状況である。本稿では、

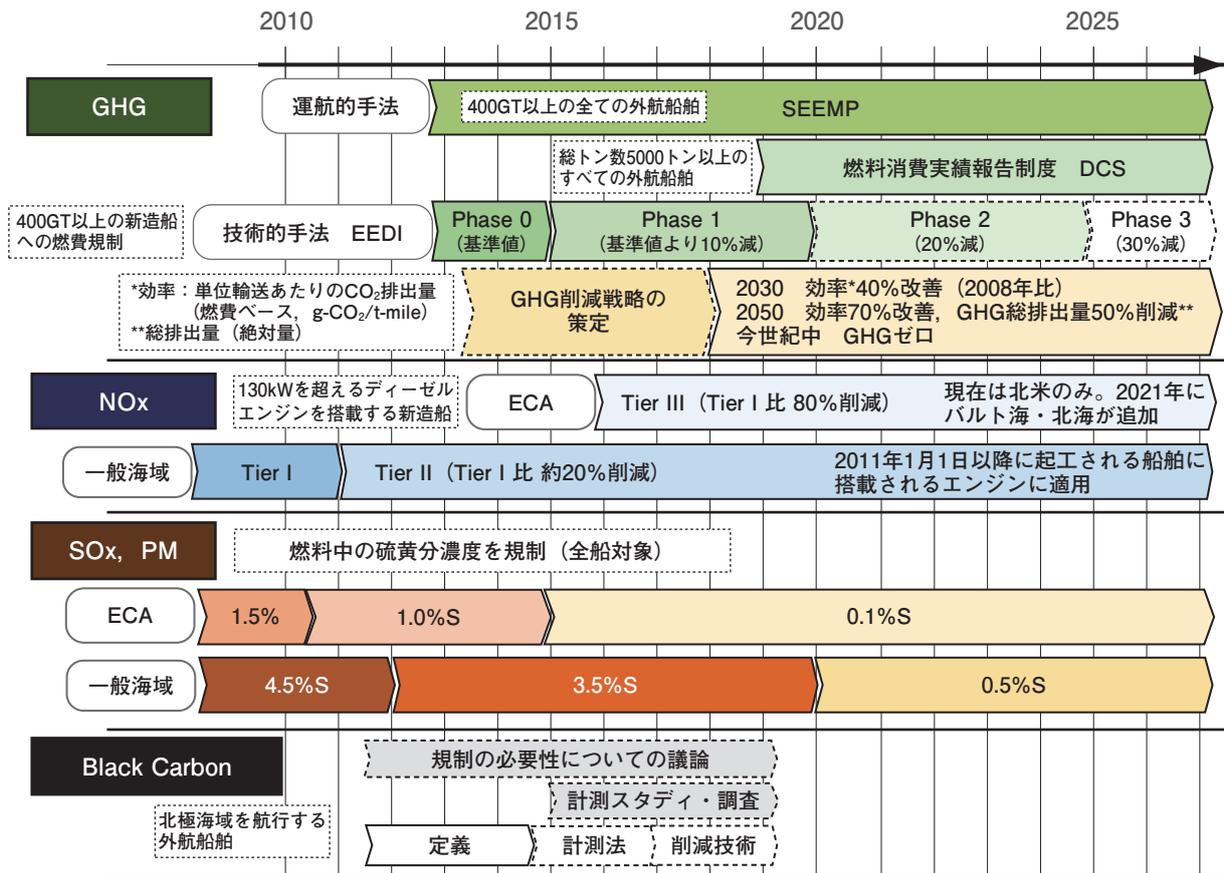


Figure 1 Exhaust gas regulations by IMO

IMOにおける排ガス規制の動向について、紹介するとともに、船舶における排ガス規制対策、計測に関する話題を提供する。

### 国際海運における排ガス規制の実施・検討状況

Figure 1に、現在IMOにおいて実施・検討されている排ガス規制の状況をまとめた。

2008年10月に開催されたIMOの第58回海洋環境保護委員会(Marine Environment Protection Committee, MEPC)では、船舶からの排ガス中のNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>およびPMを削減するための規制の枠組みが合意され、MARPOL条約附属書VIの改正案が採択された。これは2010年7月に発効となった。NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>およびPMの規制において特徴的なのは、Figure 1にも示されているように、海域を分けて規制の強化がおこなわれている点である。温室効果ガス(Greenhouse Gas, GHG)とは異なり、大気汚染物質の中でも酸性雨や光化学スモッグ、PMなど、人体や陸上の生態系への影響が大きい大気汚染要因物質であるNO<sub>x</sub>やSO<sub>x</sub>は、陸域への影響を考慮して陸地から近い指定海域(Emission Control Area, ECA)とその他の海域(一般海域)に分けて規制強化が進められてきた。2019年4月時点では、Figure 2に示す地域(北海、バルト海、米国・カナダ沿岸200海里内、

米国カリブ海)が指定されている。

ECAは各国が環境影響評価を行ったうえ、IMOでの審議を経て設定することができる。日本におけるECA設定の必要性については、国土交通省が2010年～2013年に「船舶からの大気汚染物質放出規制海域(ECA)に関する技術検討委員会」を設置して検討を行った。その結果、日本国内ではECA設定による大気環境の改善効果は期待できない(船舶から陸域への影響は低い)ことから、現段階では国内ECAの設定は行わないとしている<sup>[4]</sup>。

以下、各規制内容について概説する。

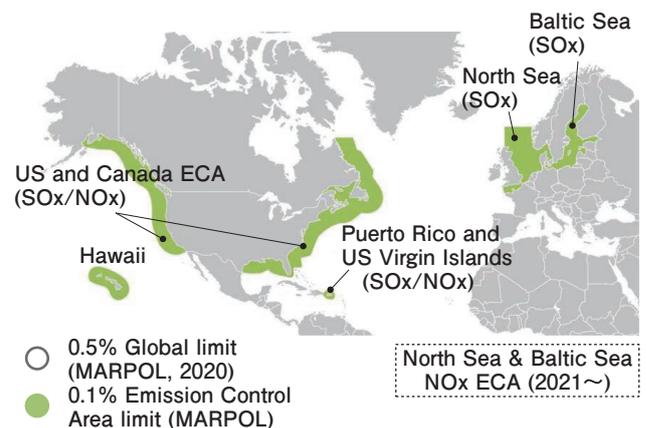


Figure 2 Emission Control Area(ECA) as of May 2019

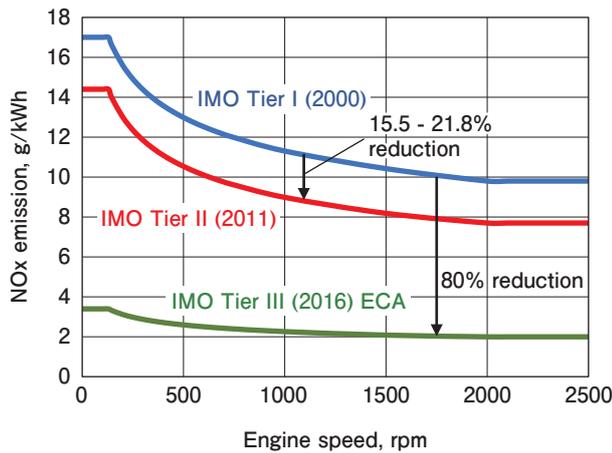


Figure 3 NOx emission limit

### 窒素酸化物 (NOx) 規制

船舶におけるNOx規制は、新造船を対象とする規制となっており、規制開始日以降に起工される船舶に搭載されるディーゼルエンジンで130 kWを超えるものに適用される。Figure 3に示すように、エンジンの定格出力あたりのNOx排出量(g/kWh)がエンジンの定格回転数に応じて定められた規制値を満足することが必要である。2000年1月1日に1次規制がスタートし、2011年からは全海域で2次規制(1次規制値から約15~22%削減)、更に2016年からは3次規制が始まっている。3次規制では2016年以降の新造船でECAを航行する船舶に対して適用されており(すなわちECA内のみの適用)、1次規制値の80%削減が求められている。規制に適合するためのエンジンの技術基準や認証方法については、IMOが作成したNOxテクニカルコードによって定められており、これに従ったNOx鑑定試験を実施し、主要エンジン機種で(後処理装置を用いる場合は結合した状態、またはエンジンと後処理装置を個別に評価したのち結合した状態の性能を証明することで)鑑定書の交付を受けることになっている。基本的には、この適合エンジンを使用していることが前提となるので、船上ではNOx排出に関する運転パラメータのチェックをすることのみで、NOxの常時モニタリングなどは要求していない。

2次規制までは、燃料噴射タイミングリタード、掃排気系、燃焼室および燃料噴射弁の最適化などエンジン内部のチューニングで対応可能であるが、3次規制に適合させるためには、排ガス循環システム(Exhaust Gas Recirculation, EGR)、選択式還元触媒脱硝装置(Selective Catalytic Reduction, SCR)、水利用技術(エマルジョン燃料油や給気加湿など)、または予混合燃焼方式によるエンジン(リーンバーンエンジン)による液化天然ガス(LNG)利用などの新たな技術が必要である<sup>[5]</sup>。

### 硫黄酸化物(SOx)およびPM規制

IMOにおける排ガス規制のうち、SOxおよびPMについては、燃料油中の硫黄含有量を規制することを基本としている。PMについては、船用燃料油中の硫黄含有量が%オーダー(現在のECA内でも0.10%以下)と、陸上の自動車用軽油の10 ppm以下などと比較して著しく高く、PM中に占めるサルフェート分(硫酸化合物)の寄与が大きいのである。このため、対象となる船舶は船種や大きさに関係なく、航行する海域のみで使用可能な燃料の硫黄分濃度が決まる。なお、MARPOL条約によるECAとは別に、地域規制として独自の硫黄分規制を実施している海域もある(例えば、EU域内のすべての港、カリフォルニアの沿岸24海里内、中国の指定海域など)。

Figure 1にも示したように、2015年1月1日からECA内では、燃料油中の硫黄分含有量が0.10%を上限値として引き下げられた。2020年1月に実施される一般海域規制では、燃料の硫黄分濃度を現行の3.50%以下から0.50%以下に引き下げる予定である。規制適合油については、地域による入手性や燃料性状の問題など懸念される点もあり、現在、IMOにおいて、2020年以降に起こりうる様々なケースを想定して統一的な規制実施のためのガイドラインの作成などが進められている。

燃料油の硫黄分規制への対応策としては、いくつかの選択肢が考えられる。一つは低硫黄燃料への燃料転換であり、今まで使用されてきた高硫黄の残渣燃料油(C重油)から、留出油(軽油や適合A重油)、バイオ燃料、またはLNGなどへの転換が考えられる。また、従来燃料の一種として、低硫黄C重油(Very Low Sulfur Fuel Oil, VLSFO)も供給される予定であるが、現時点でもどのような燃料性状の重油が提供されるのかははっきりしていない。特に海外では様々な性状の燃料が提供されることが予想されるため、燃料油の単独安定性や混合安定性、低温流動性、燃焼性などの問題が懸念されている。現在、IMOからの要請により船用燃料油規格であるISO8217の改訂作業が行われているが、2020年までには間に合わないため、公開仕様書(Publicly Available Standard, PAS)の形で対応する予定である。新たに単独安定性、混合安定性の試験法について検討されている。

低硫黄燃料の選択には価格と供給量、供給体制の整備が重要である。特にLNGについては、NOxやCO<sub>2</sub>、BCの排出量も低減可能なため非常に有望であるが、供給インフラの整備が遅れており、しばらくは限定された地域のみでの普及にとどまると考えられる。またバイオ燃料についても供給量の不足と価格のため、限定的にならざるを得ない。一方、もう一つの選択肢として、従来の高硫黄燃料油を使用して船上で排ガス脱硫をおこなう排ガス洗浄システム(Exhaust

Gas Cleaning System, EGCS)であるSO<sub>x</sub>スクラバにも関心が集まっている。SO<sub>x</sub>スクラバは、MARPOL条約附属書VI第4規則で認められている同等措置である。これについては、後述することにする。

## 温室効果ガス (GHG) 規制

IMOにおけるGHG排出関連の規制については、現在、燃費効率向上によってCO<sub>2</sub>排出削減を目指している。**Figure 1**に示したように、エネルギー効率設計指標 (Energy Efficiency Design Index, EEDI) および船舶エネルギー効率管理計画書 (Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP) が導入され、400 GT以上の外航船舶に適用されている (EEDIは新造船のみ)<sup>[2, 6-8]</sup>。EEDIはエネルギー効率の高い船舶の建造・調達を促すためのもので、船の設計データにより輸送能力あたりのCO<sub>2</sub>排出量 (g-CO<sub>2</sub>/t-mile) を計算し、指標化することにより、船のCO<sub>2</sub>排出に関するカタログ性能を表す。燃料種、エンジン、船型やプロペラデザイン、省エネ技術など技術的な手法に対して評価するが、船種ごとに異なるリファレンスライン (基準値) が提供されている。EEDIについては、現在IMOにおいてPhase 3の前倒し、Phase 4の導入について検討されている。一方、SEEMPは、運航の面から航行中のCO<sub>2</sub>排出量を抑制することを促すものである。もっとも効率的な運航方法 (減速航行、海流や気象を考慮した最適ルートを選定、適切なメンテナンスの実施等) をとるように「計画」、「実施」、「モニタリング」、「自己評価・改善」という4つのステップを通じて継続的に管理することで、広く運航管理の自己改善を図るようになっている。また、2019年からは燃料消費実績報告制度 (Data Collection System, DCS) が開始され、実燃費の報告が義務化されている。

加えて、2018年4月に行われたMEPC72では更なるGHG削減戦略が採択された。この戦略は、今までの個船ごとのエネルギー効率改善目標だけでなく、海運全体のGHG排出量 (総量) を2050年までに50%削減する (2008年をベース) とともに、今世紀中可能な限り早期にゼロ排出の努力を目指すという挑戦的な目標設定となっている。このため、削減技術についても、短期、中期、長期での戦略が必要となり、LNGなどのより低炭素な燃料への移行や、バイオ燃料などカーボンニュートラルな燃料、水素やアンモニアなどの脱炭素燃料の利用などに向けて技術開発が急務となっている。これらの代替燃料の利用では、ライフサイクル評価が重要であり、製造時に再生可能エネルギーの利用が望まれる。また、今まではCO<sub>2</sub>のみが対象となっていたが、その他のGHGについても (例えば、ガスエンジンのメタンスリップなど)、今後評価対象になるものと考えられる。IMOでは新たなGHGスタディが進められている。

## ブラックカーボン (BC) 規制の検討

現在IMOでは、北極海域でのブラックカーボン (BC) 排出に対して規制が必要かどうか検討されている。これは、大気中のBCが極域の雪氷上に落ちると、地表面の反射率が低下して太陽光を吸収するため、著しく融雪を促進して地球温暖化を加速すると考えられているためである。

2010年3月に行われたIMOのMEPC60において、ノルウェー、スウェーデン、米国から「北極圏における船舶からのブラックカーボン排出削減」について問題提起され、2011年7月のMEPC62において検討開始が合意された。当時のばら積み液体・気体物質 (Bulk Liquids and Gasses, BLG) 小委員会、現在の汚染防止・対応 (Pollution Prevention and Response, PPR) 小委員会に作業が委託され、①BCの定義を提案する、②最も適切な計測法を特定する、③適切なBC規制方法の調査を行う、の3項目について調査が始まった。小委員会では、2019年2月のPPR6ですべての委託事項についての調査を終え、2019年5月のMEPC74に報告がされた。PPRでの調査結果の概要を下記にまとめる。

### 国際海運におけるBCの定義

BCの定義の定義については、MEPC68 (2015年5月) において、下記のように基本合意した。この定義は、Bondらの定義<sup>[9]</sup>をもとにしたものである。

BCは炭素燃料を燃焼したときの炎の中でのみ形成される炭素状物質で、以下のような物理的性質を持つ。

- (1) 非常に強く可視光を吸収し、波長550 nmにおける質量吸収係数が5 m<sup>2</sup>/g以上
- (2) 熱的に非常に安定で、高温でももとの形態を保つ。気化温度は4000 Kに近い
- (3) 水および有機溶媒に不溶。大気中の他のエアロゾル成分にも不溶。
- (4) 微小球状の炭素粒子の集合体として存在。

上記の定義は、すなわち、BCとして、黒色の元素状炭素をターゲットとして、計測すべきことを表している。

### 適切なBC計測法

一つの計測方法に限定することはできず、フィルタスモークナンバー (Filter Smoke Number, FSN) 法、光音響 (Photoacoustic Spectroscopy, PAS) 法、レーザー誘起白熱 (Laser-Induced Incandescence, LII) 法の3つの手法が計測法として残った。また、各国がこれらの計測装置を用いて、BC計測結果を報告するための書式も作成された<sup>[10]</sup>。

### BC規制方法の調査

BC規制方法の調査については、通信部会 (Correspondence

Group, CG)において意見および情報を集約し、結果としてTable 1にある削減対策が候補として報告された。リストからわかるように、多くの対策はBCだけでなく、他の排ガス規制対策技術とも深く関連しているものが多い。特にPPRでの議論では、燃費向上=BC削減効果と考えられており、GHG対策技術が多く挙げられている。シップデザイン、運航的手法や政策的な規制措置による手法なども候補としてリストアップされている。NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>規制については、現在すでに導入されており、今後はこれらの規制を前提条件として、将来的なGHG戦略も考慮しつつ検討することになると考えられる。

Table 1 List of black carbon reduction to be reported to MEPC

1 Fuel type
<ul style="list-style-type: none"> <li>*.1 Liquefied natural gas (LNG)</li> <li>*.2 Distillate fuel</li> <li>*.3 Biodiesel.</li> <li>*.4 Methanol (Includes dimethyl ether)</li> <li>.5 Nuclear</li> <li>.6 Hydrogen</li> <li>.7 Ammonia</li> <li>.8 Other renewable fuels</li> </ul>
2 Fuel treatment
<ul style="list-style-type: none"> <li>*.1 Water-in-fuel emulsions (WiFE)</li> <li>.2 Colloidal catalysts</li> </ul>
3 Exhaust gas treatment
<ul style="list-style-type: none"> <li>*.1 Diesel particulate filters (DPF)</li> <li>*.2 Exhaust gas cleaning systems (scrubbers)</li> <li>.3 Exhaust gas recirculation (EGR)</li> <li>.4 Electrostatic precipitators (ESP)</li> <li>*.5 Selective catalytic reduction (SCR)</li> <li>.6 Diesel oxidation catalysts (DOCs)</li> <li>*.7 EGR with scrubbers</li> <li>.8 SCR with DPF</li> <li>.9 SCR with scrubbers.</li> </ul>
4 Engine and propulsion system design
<ul style="list-style-type: none"> <li>.1 Engine stroke type</li> <li>*.2 Slide valves</li> <li>.3 Engine rating</li> <li>*.4 Engine control technology</li> <li>.5 Full battery electric</li> <li>*.6 Hybrid/energy storage</li> <li>Hydrogen fuel cells</li> </ul>
5 Ship design
<ul style="list-style-type: none"> <li>*.1 Improve energy efficiency of new ships</li> <li>*.2 Improve energy efficiency of existing ships</li> </ul>
6 Operational measures
<ul style="list-style-type: none"> <li>*.1 Slow steaming.</li> <li>*.2 Engine load</li> <li>*.3 Voyage optimization</li> <li>*.4 Training and crew awareness</li> <li>*.5 Trim optimization</li> <li>*.6 Adaptive engine/condition based maintenance</li> </ul>
7 Regulatory measures
<ul style="list-style-type: none"> <li>.1 Expand or establish additional ECAs</li> <li>*.2 Prohibit the use of residual fuel</li> <li>*.3 Establish a BC emission standard for ships.</li> <li>*.4 Include BC in GHG reduction strategies</li> <li>*.5 0.5% global fuel sulphur cap</li> <li>.6 Engine tier.</li> </ul>
8 Other measures
<ul style="list-style-type: none"> <li>*.1 Promote ship recycling</li> <li>*.2 Promote shore power.</li> </ul>

\* : 5年以内に実施可能な対策について、CGでアンケートを行った結果、yesの回答があった対策

Table 1に示した対策を評価するにあたっては、CGでは削減効果(Effectiveness)だけではなく、新造船・既存船も含めた船舶への適用可能性(Feasibility)、船舶への適用可能となる時期も含めた技術(あるいは製品として)の利用可能性(Availability)、安全性(Safety)の4つの指標を用いて意見集約を行うとともに5年以内に実施可能な技術についてもアンケートを行った(表中\*)。結果として、CGレポートでは、特定の削減技術に絞り込むことをせず、候補として挙げられた削減策をすべて報告している。これらの評価は、船種や船の大きさ、燃料性状などによっても変わることがあり、前提条件が必要となる場合もあるので、単純に候補技術同士を比較することは難しい。CO<sub>2</sub>とNO<sub>x</sub>、PM、BCは、一般的にはトレードオフ関係にあるといわれているため、他の排ガス規制への影響(BCは削減可能であるが、NO<sub>x</sub>増加や燃費悪化など)、経済性など、マイナス側の要件についても考慮する必要がある。また、DPFなど直接的にBCを削減する技術もあれば、燃費改善によって結果としてBC削減に貢献すると考えられる技術、複数の技術を組み合わせることで効果的な技術もある。このため、評価基準の作成自体が非常に複雑である。

## 削減技術と計測法について

各排ガス規制の中で紹介した削減技術を見ると、一つの削減技術が複数の排ガス規制に対応しているとともに、一部はトレードオフ関係になっている。対策技術選択の複雑さを示す例として、International Council on Clean Transportation (ICCT, 国際クリーン交通委員会)が主催するブラックカーボンに関するワークショップでのBC削減技術に関する議論の一部を紹介する<sup>[11]</sup>。ワークショップの報告書は、PPRにも提出された。ちなみに、ICCTはフォルクスワーゲンのNO<sub>x</sub>規制不正問題発覚のきっかけとなった非営利環境団体である。

本ワークショップは2014年から開催されており、PPRでは十分に議論する時間がないことから、IMOに積極的にデータを提供している国の研究機関や海事関係業界、環境団体などのステークホルダーが集まり、PPRの審議に先立って議論を深めることを目的として開催されている。昨年行われた第5回ワークショップでは、先に紹介したCGレポート

Table 2 Evaluation items to specify BC reduction measures<sup>[11]</sup>

Effectiveness	その削減技術がもつ一般的なBC削減効果
Feasibility	運転性能への負荷や費用、または安全性に過度の影響を与えずに、新造船や既存船に適用できるかどうか。
Availability	船舶分野において、どのくらいの時期に適用可能と考えられるか。短期(~2023)・中期(~2030)を対象。
Applicability	適用にどのような制約条件があるか(エンジンタイプ・サイズ、燃料油の種類等)。
Co-emitted pollutants	削減対策を行った場合に、ともに船から排出される環境汚染物質(気体、液体、固体の廃棄物を含む)。
Others	その他の懸念事項。考慮すべき事柄。

Table 3 Evaluation result of BC reduction measures with six items<sup>[1][11]</sup>

削減策	削減効果 <sup>1</sup>	船用への適用 <sup>2</sup>	導入可能時期 <sup>3</sup>	適用範囲、条件	その他の排ガス、副産物	その他課題など
LNG	高	N◎, R△	短期	Gas or Dual-fuel engines	↓ CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , PM (削減率は、エンジン型式に依存) ↑ CH <sub>4</sub> (排出量はエンジンと負荷に依存), ホルムアルデヒド排出の可能性	インフラ整備
Distillate	中以下	N & R◎	短期	All	↓ SO <sub>x</sub> , PM (燃料中の硫黄分濃度に依存)	
Biodiesel	中	N & R◎	短期	All	↓ SO <sub>x</sub> , PM ↑ NO <sub>x</sub> (増加量は幅あり)	供給量不足 MARPOL18規則への適合不明
Methanol	中 (WSで示されたデータ) 高 (化学的考察に基づく)	N◎, R◎	短期	Diesel-cycle, dual-fuel	↓ NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , PM ↑ ホルムアルデヒド (排出可能性)	供給量とインフラ整備に課題 法整備が必要 (IGFコード)
Water-in-fuel Emulsions	未評価 データ不足	未評価 データ不足	短期	未評価 データ不足	↓ NO <sub>x</sub> , PM (?)	更なるデータ収集が必要 既に実船利用しているという情報あり
DPF	高	N◎, R◎	短期~中期	現状は留出油を使用する中速・高速機関	↓ PM ↑ CO <sub>2</sub> , 固体廃棄物	既存船への適用はスペースに制約。廃棄物保管, 背圧増加, 再生処理に懸念。 低速エンジンには大きさについて検討が必要
SO <sub>x</sub> scrubbers	低 (デザイン, 燃料などの条件に依存)	N & R◎	短期	C重油を使用する低・中速機関	↓ SO <sub>x</sub> , PM ↑ CO <sub>2</sub> , 洗浄水, 固体廃棄物	既存船への適用, 廃棄物保管はスペースに制約
ESP	高	N◎, R◎ (スペースに依存)	短期~中期	C重油を使用する低速機関	↓ PM (wet ESPの場合はSO <sub>x</sub> も) ↑ CO <sub>2</sub> , 廃棄物処理	既存船への適用, 廃棄物保管はスペースに制約 低排ガス温度
DPF coated with SCR catalyst	高	N◎, R◎	中期	現状は留出油を使用する中速・高速機関	↓ NO <sub>x</sub> , PM ? CO <sub>2</sub> ↑ 固体廃棄物	陸上では実用化 既存船への適用はスペースに制約。廃棄物保管, 背圧増加, 再生処理に懸念。 低速エンジンは大きさについて検討が必要
Engine tuning with SCR/EGR	中以下	N◎, R◎	短期	All	↓ NO <sub>x</sub> , PM, CO <sub>2</sub> , HC, CO	
Engine Control Technologies	中以下 (エンジンタイプに依存)	N◎, R◎	短期	All	↓ NO <sub>x</sub> , PM, CO <sub>2</sub>	例えば, 低速機関へのスライドバルブ, コモンレール, 電子制御エンジン
Full battery electric	高	N◎, R△	短期~中期 サイズに依存	限定的	船からゼロエミッション	重さ, 化学物質の漏洩の可能性, バッテリー材料の入手性,
Hybrid/Energy Storage	中以下 (負荷に依存)	N◎, R◎	短期	負荷変動の大きな船に最適	↓ All	スペースに制約。化学物質の漏洩の可能性, バッテリー材料の入手可能性
Hydrogen fuel cells	高	N◎, R△	短期~中期 サイズに依存	圧縮H <sub>2</sub> は液体H <sub>2</sub> より限定医的	船からゼロエミッション	供給, バンカリングインフラの整備 安全性への懸念 (可燃性) 燃料電池部品材料の入手可能性 規制のハードル

[1] BC排出削減率の定性的スケール高(90%以上), 中(30%から90%), 低(30%未満)。

[2] N:新造船, R:レトロフィット

定性的スケール◎:運用パフォーマンス, コスト, または安全性に過度の影響を与えずに測定を適用できる, ○:性能, コスト, 安全性への影響は管理可能な範囲で, 対策可能, △:対策はできるものの, 性能, コスト, または安全性に大きな影響を与える

[3] IMOのGHG排出量削減戦略(決議MEPC.304(72))に合わせて, 短期は2023年まで, 中期は2023年~2030年)

をもとに, より実現性のある削減技術(政策的なものは検討対象外とした)について議論を行った。ここでは, IMOのCGで議論のベースとなった評価項目をリバイスし, Table 2の評価クライテリアをもとにしている。ブラックカーボンCGレポートで挙げられている41の候補対策のうち, 18の削減技術について検討することになった。ちなみに, 水素キャリアとしてのアンモニアについては, その有害性に懸念の声があり対象外となった。

Table 3には, 18のうち, 特にエンジン, 排ガス後処理技術に関係する14の技術を抜き出して示した(スクラバ付きEGR, 酸化触媒, 減速運航, 陸上電力供給をリストから除外した)。ここで注目すべきなのは, 技術的にBC削減率が

高く, 船舶への搭載が短期で可能と考えられても, その他の排ガス成分の増加や, エンジンへの影響, 安全上の問題などがあり, どの評価項目を重視するかという選択は非常に難しい点である。例えば, DPF (Diesel Particulate Filter)は, 一部の環境団体などが非常に有望であることを主張したが, 他のメンバーはDPFによる背圧がエンジンの性能と安全性に大きな影響を及ぼすことを懸念している。また, DPF稼働のために余分な電力を消費する可能性もあり(送気ファンやフィルタの逆洗など), 燃料消費量が増える可能性がある。LNGの場合は, 表からわかるようにCO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, BC, PMとほぼすべての規制対象物質を削減できるものの, メタンスリップの問題が大きな懸念となっている。ただし, メタンスリップの問題はガスエンジンの



Table 5 Continuous monitoring items and their regulation values for gas scrubber effluent

連続モニタリング項目	排水条件
pH	1. pH <sub>排水</sub> ≥ 6.5 or pH <sub>取水</sub> - pH <sub>排水</sub> ≤ 2 (航行時のみ) 2. 排水口から4 m先でpH6.5以上 (停泊条件下で証明)
多環芳香族炭化水素 (PAHs)	フェナントレン相当PAH PAH <sub>排水</sub> - PAH <sub>取水</sub> ≤ 50 µg/L (洗浄水量45t/MWhで標準化)
濁度	濁度 <sub>排水</sub> - 濁度 <sub>取水</sub> ≤ 25 FNU or NTU

続監視することとなっている。なお、計測法も含めたスクラバに関する情報については、別報も参考にされたい<sup>[14-16]</sup>。

現在、スクラバメーカーは北欧を中心に数十社に及ぶものと思われるが、船級協会の鑑定を受けて認められた排ガス、水質モニタリング装置を提供している計測器メーカーは極めて少ない。いずれのモニタリング装置も非常に高価であり、例えば、PAH計は定期的に光源ランプなど主要部品の交換が必要である。このような性能にかかわる重要部品は、各メーカーの本社でのみ交換可能な場合もあり(海外メーカーの場合は、検出器を本国に送り返すなど)、内航船舶でスクラバが搭載された場合、メンテナンスや運用コストが懸念される。このため、一般海域規制の開始前に、国内メーカーが製品を提供できるようになることが切望される。また、実際に船上で計測装置を使う場合、単発的な計測調査などでない限りは、乗組員が使用することになるので、特に日常的なメンテナンスや故障時の対処方法が煩雑であることや、入手が困難な標準ガスや標準試薬が必要とならないこと、故障時に速やかに復旧対応されるサービス体制のあることが望まれる。

以上はスクラバの例であるが、削減技術で例に挙げたように、今後、その他のガス成分なども計測が必要となる可能性がある。例えば、NO<sub>x</sub>の船上計測、NO<sub>x</sub>対策技術であるSCRや将来的なGHG対策としてのアンモニア利用時のアンモニアスリップ、ガスエンジンのメタンスリップなどは、常時モニタリングの義務化には至らなくとも、今後、排出量の調査研究や場合によってはエンジン出荷時の計測が必要となる可能性もある。いずれにしても、このような議論がIMOなどで始まったときに、議論をリードできるだけの十分なデータを持つておくことが重要である。加えて計測法の確立、計測装置についても、関係団体、特に計測器メーカーの協力が必要である。

## おわりに

今後、海事産業分野においても、IMOにおける排ガス規制、特にGHG戦略に対応するため、削減技術開発が加速するものと考えられる。現在、著者はISOにおいてEGCSに関する

ワーキンググループを立ち上げており(ISO SC2/TC8 WG10)、水質モニタリングのうちpH計の規格をより適切なものとするため、議論中である。EGCSガイドラインは、現在、改正作業中であるが、水質モニタリングに関してはpH以外にもまだ明確になっていない部分があり(例えば、フェナントレン相当PAHの定義がされていないなど)、今後、これらの問題についても科学的なデータをもとに検討されていくものと思われる。業界の意見を聞き取りつつ必要に応じて規格化していきたいと思っている。今後も各計測器メーカーの協力をお願いしたい。

## 参考文献

- [1] <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Default.aspx>
- [2] 新井健太他, 船会社におけるCO<sub>2</sub>削減への取組み, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第50巻 第2号, (2015)109-111
- [3] [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20Pollution/Resolution%20MEPC.176\(58\)%20Revised%20MARPOL%20Annex%20VI.pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20Pollution/Resolution%20MEPC.176(58)%20Revised%20MARPOL%20Annex%20VI.pdf)
- [4] 船舶からの大気汚染物質放出規制海域(ECA)に関する技術検討委員会 取りまとめ(平成25年6月)<http://www.mlit.go.jp/common/001002259.pdf>
- [5] 例えば、「排ガス規制対応技術の最新動向」の特集号, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第51巻 第3号, (2016)
- [6] 柴田繁志, 渡邊貴士, 機関室におけるGHG 低減技術の紹介 一造船所機関部におけるEEDI低減への検討例, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第45巻 第6号, (2010)811-815
- [7] 平田信行, 船舶の設計におけるCFDの活用 一環境規制への対応に向けて, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第48巻 第5号 (2013)633-636
- [8] 荒木康伸, エネルギー効率設計指標(EEDI)規制と対応技術動向, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第52巻 第4号, (2017)480-484
- [9] T. C. Bond et al., J. of Geophysical Research: Atmospheres, 118(2013), 5380-5552
- [10] Reporting Protocol for voluntary measurement studies to collect Black Carbon data <https://www.euromot.eu/how-we-work/marine-seagoing-engines/>
- [11] ICCT, 5th workshop on marine black carbon emissions(2018.9) <https://www.theicct.org/events/5th-workshop-marine-black-carbon-emissions>
- [12] 2015 Guidelines for Exhaust Gas Cleaning System, MEPC 68/21/Add.1, May 2015
- [13] <https://www.egcsa.com/>
- [14] 高橋千織, 国際海事機関によるSO<sub>x</sub>規制の概要と代替技術としての船用スクラバ, 防錆管理, 第61巻 第8号, (2017)285-292
- [15] 高橋千織, 益田晶子, IMO 排ガス洗浄システム(EGCS)ガイドラインにおける排水規制とモニタリング, マリンエンジニアリング, 第50巻 第3号, (2015)79-87
- [16] 益田晶子他2名, 湿式スクラバの水質モニタリング法の検討 一濁度と多環芳香族炭化水素について, マリンエンジニアリング, 第51巻 第1号, (2016)117-123

## 船舶排ガス浄化用水質モニタ EG-100

Onboard Water Quality Monitoring System EG-100 for Ships

富岡 紀一郎

Kiichiro TOMIOKA

羽島 雄大

Yuta HASHIMA

環境規制は年々厳しくなっており、もはや船の排ガスも例外ではない。ただし船特有の条件のため、自動車と比較して大きく規制が遅れていた。IMO (International Maritime Organization) が、グローバルなNOx, SOx規制の施行を決定。SOx規制として、2020年以降は、硫黄排出量が燃料重油中の0.5%以下とする環境対策を実施することを決定した。低硫黄燃料等を使用することにより対応することができるが、現在使用されている燃料(高硫黄燃料)を使用する際は排ガスを浄化する装置(スクラバ)を搭載することにより同等の対応が可能である。このスクラバの排水も規制対象であり、処理後船外に排出される。この処理水の水質をモニタリングする装置を開発し、販売を開始した。製品の特長とビジネス形態について紹介する。

Environmental regulations are getting stricter every year, and the exhaust gas emission from ships is no exception, although until recently maritime regulations have lagged behind those for automobiles due to their multi-jurisdictional “borderless” nature. Meanwhile the IMO (International Maritime Organization) has decided to enforce NOx and SOx regulations globally, including environmental measures in which the sulfur content of fuel oil shall be limited to 0.5% or less starting in the year 2020 as part of the SOx regulations. Although compliance to this regulation is possible using a low-sulfur fuel, an alternative method for compliance while continuing to use current high-sulfur fuel is to install a scrubber device on the ship that cleans the exhaust gas. The washwater from the scrubber is also subject to this regulation as it is discharged outside the ship into the open sea after being processed. We developed a device to monitor the water quality of this process and have begun selling it. This article introduces the product features as well as our business model.

Key words NOx規制, SOx規制, スクラバ, 水質モニタリング, pH, PAH, 濁度

### はじめに

船舶は公海上を航行するために、各種の国際条約が適応される。おもな国際条約はSOLAS (International Convention for the Safety of Life at Sea)条約(海上における人命の安全のための国際条約), Load Line (International Convention on Load Lines, 1966)条約(満載喫水線に関する国際条約), MARPOL 73/78(Protocol of 1978 relating to the International Convention for the Prevention of Pollution from ships, 1973)条約(1973年の船舶による汚染の防止のための国際条約に関する1978年の

議定書)などがある。これらの条約は国連の専門機関の一つであるIMO (International Maritime Organization)で論議、協議されている。

IMOには5つの部会があり、この中のMEPC (Marine Environment Protection Committee) (海洋環境保護委員会)が海洋環境にかかわる技術基準の検討を実施している。MARPOL条約付属書VI第13, および14規則により、過去段階的に窒素酸化物(NOx)の許容限度や燃料中の硫黄濃度の上限値の規定を実施してきた。Figure 1に規制の内容を示す。

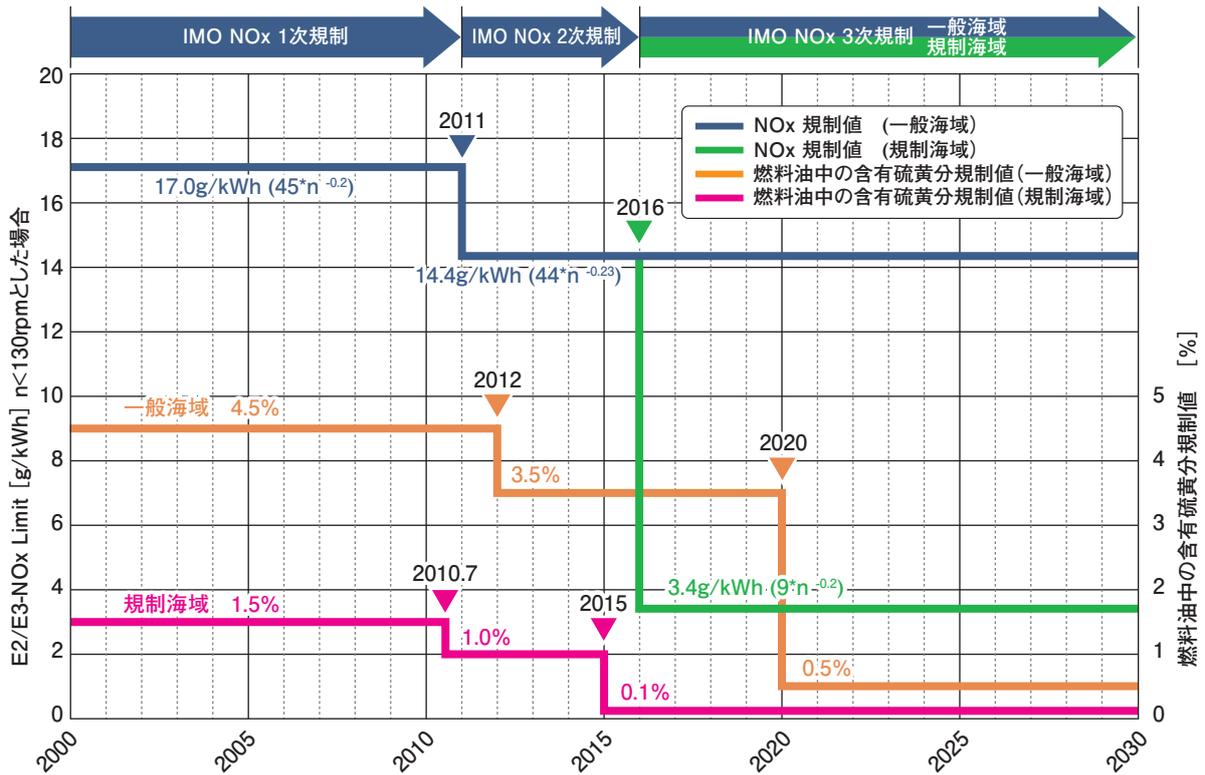


Figure 1 Emission regulations of IMO

特に、窒素酸化物放出規制海域(NECA：NO<sub>x</sub> Emission Control Area)や硫黄酸化物排出規制海域(SO<sub>x</sub> ECA)を設定、段階的に規制を強化している。特に、SO<sub>x</sub>規制に関しては、公海上において、2020年以降は、燃料油中の硫黄濃度が0.5%以下に規制されることが決定された。

現在、船主、造船所、環境機器エンジニアリング会社等が、種々の対応策を検討している。対応策は、現在、NO<sub>x</sub>規制に対しては、EGR (Exhaust Gas Recirculation)方式とSCR (Selective Catalytic Reduction：選択式還元触媒)方式で対応している。またSO<sub>x</sub>規制に関しては、規制適合油とC重油の価格差に大きく影響を受けるが、昨今スクラバ採用による規制対応に船主の注目が集まっている。

### NO<sub>x</sub>低減技術

大別すると、EGR方式は、燃焼ガスを再度内燃機関に戻すことにより燃焼温度を下げNO<sub>x</sub>発生量を低減させるシステムであり、SCR方式は、高温の排ガスに尿素水を噴霧し、触媒反応によりN<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>Oに変換しNO<sub>x</sub>排出量を低減させるシステムである。

### SO<sub>x</sub>低減技術

この技術は、清水もしくは海水を排ガスに噴射し、排出ガスを浄化する湿式スクラバを使用する方法である。この方

式では、排出ガス中のSO<sub>x</sub>の98%程度を取り除くことができ、等価的に低硫黄燃料油を使用したのと同じ効果を得ることができる。スクラバ洗浄水の循環モードは、船の寄港地及び航行する海域の規制により下記の3方式に分類される。

#### オープンループスクラバシステム

Figure 2にフローを示す。最も多くの船に使用されているタイプである。排出ガスを海水で洗浄し、洗浄水はそのまま排出される。海水のアルカリ度が低い場合、充分な脱硫性能を得ることができない場合がある。また排水禁止区域

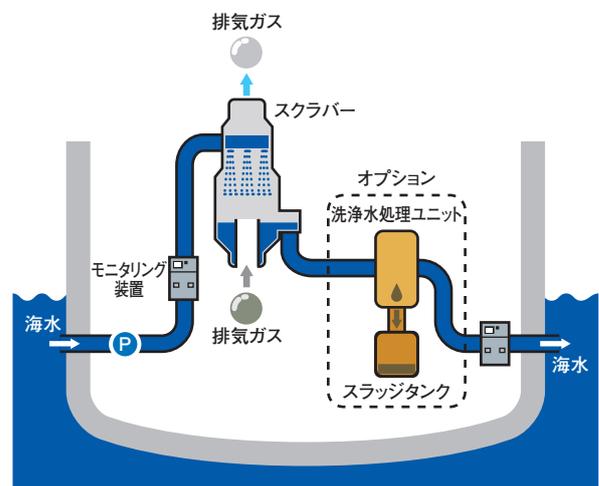


Figure 2 Open loop scrubber system

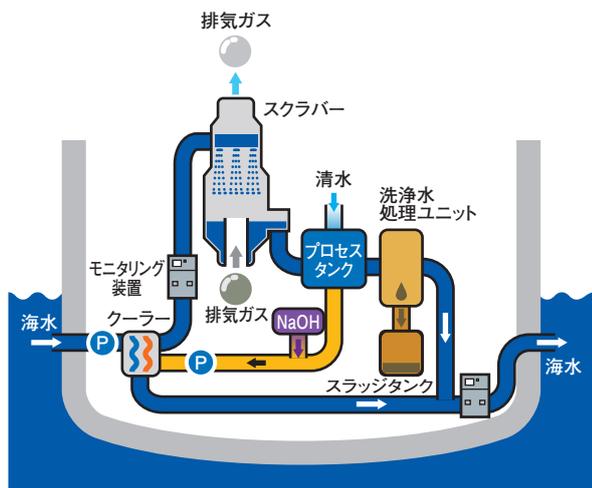


Figure 3 Closed loop scrubber system

では、排水ができず運転できない場合がある。この場合には、低硫黄燃料に切り替えて航行する必要がある。水質モニタリング装置はスクラバIN側と船外排出側に設置される。

### クローズドループスクラバシステム

Figure 3にフローを示す。船内の清水もしくは海水を洗浄水とし、これらの洗浄水は循環使用される。循環使用されるためpH調節のための苛性ソーダ(NaOH)が必要である。スクラバ循環水を船外排出するためには水処理装置が必要である。水質モニタリング装置はスクラバIN側と船外排出側に設置される。

### ハイブリッドスクラバシステム

オープンループとクローズドループに切り替え運転が可能

Table 1 Regulatory parameters

項目	排出規制内容	備考
pH	pH(排水) $\geq 6.5$ または pH(取水) - pH(排水) $\leq 2$ または pH(排水口から4 mの地点) $\geq 6.5$	操船中 または 航行中
PAH	エンジン出力あたりの排出量により、規制値が異なる。一例をあげると、 45 t/Mwh : 50 $\mu\text{g/L}$ 90 t/Mwh : 25 $\mu\text{g/L}$	総量規制
濁度	取水濁度を基準とし、上昇分が25 FNU 以下	15分 移動平均値

Table 2 Requirements for parameters by guideline

項目	要求事項
pH	0.1 pH単位の分解能及び温度補償機能を有するものであること。 pH電極はBS2586の基準を満足するか、又は同等以上の性能を有すること。 pHメーターはBS EN ISO 60746-2:2003の基準を満足すること。
濁度	計測器は、ISO 7027:1999(Water quality - Determination of turbidity)又はUSEPA 180.1(Determination of Turbidity by Nephelometry)に適合したものをを用いること。
PAH (多環芳香族炭化水素)	排出流量によって方法が異なる。 紫外分光法または蛍光分光法 2.5 t/MWhを超える流量では蛍光分光法、以下では紫外分光法が使用される。



Figure 4 Scrubber appearance

なシステムである。通常はオープンループで運転され、排水禁止海域ではクローズドシステムに切り替え、すなわち排水をしない運転に切り替えて運用する。排水禁止海域の拡大に伴いハイブリッドタイプは近年増加傾向にある。

Figure 4にスクラバの設置例を示す。主機煙突左側 ○印部分にスクラバが設置。右側は船橋

### 排出規制について

船外に洗浄水を排水する際には、pH, PAH(多環芳香族炭化水素), 濁度, 温度を連続的に測定し記録することが決められている。その中でも、pH, PAH, 濁度には排出規制値が定められている。Table 1に規制値を示す<sup>[1]</sup>。

### 水質モニタリングシステムの概要

水質モニタリングシステムは、上記のスクラバシステムに組み込まれ、処理水をモニタリングし、船外排出基準を満足しているかを判断している。船の運航上、非常に重要な役割を担っている。GUIDELINES FOR EXHAUST GAS CLEANING SYSTEMSによる水質モニタリング装置への要求事項は以下のとおりである(Table 2)<sup>[1]</sup>。

また船級型式承認を得るためには、各船級の環境試験、振動試験、EMC試験の要求事項を合格するとともにIMOのガイドラインの要求事項を満足させる必要がある。EG-100



Figure 5 Installation on board

はすでにNK船級を取得，その他の船級も順次取得の予定である。

EG-100の船内設置状況をFigure 5に示す。

### ビジネス形態

本船舶ビジネスには、通常のビジネスとは異なり、多くのステークホルダが関係している。船主、造船所、エンジニアリング会社、船舶運用会社、各国の船級審査機関、旗国(船舶が船籍を置く国)、さらに船舶関係の規格や規則などがあり、製品はいったん船上に設置されると、国境に関係なく、アジア、欧州、南米、北米間を移動することになる。製品には、常に安定した性能、日常の保守作業の容易性、さらに、タフな環境でも確実に性能を発揮することが求められる。一般的な定義の試運転(船が接岸した状態)や海上公試(船を運航状態での船級により試験)など船舶特有のルールがあり、船の発注から数えると納入まで数年かかるのが通例である。

Table 3 Interfering factors to measurement

影響因子	測定パラメータ	症状
泡	pH	指示が突然変化する。
	PAH	指示の不安定
	濁度	測定誤差が大きくなる。 指示の不安定
汚れ	pH	応答速度の劣化 指示のドリフト
	PAH	応答速度の劣化 指示のドリフト 測定誤差が大きくなる。
	濁度	指示のドリフト
海水	pH, PAH, 濁度	センサ部への有機物汚れの増加

### 連続測定における課題

モニタリングシステムのデータは環境規制を順守している証左であり、船の運航上、及び環境保護において非常に重要である。しかしサンプルには多くの妨害因子があり、各センサに多くの影響を与える。Table 3にその一覧をまとめた。

### 気泡対策

特に、オープンループにおいて入口側の高圧ポンプで組みあげられた海水およびスクラバでシャワリングされた水には多量の微細な泡が含まれている。これらへの対応が必要である。気泡対策(脱泡)については各種の方法を試みた。その比較結果をTable 4に示す。

水質モニタリング装置では加圧脱泡と超音波脱泡(特許出願中)を採用した。超音波脱泡とは、超音波振動子から発生した超音波が液中で、高圧および低圧部分をつくりだし、低圧部分では、溶存気体や微細気泡が膨張、大きな泡となり、またそれらが他の泡と結合することで、さらに大きな泡となり、浮上して除去されるという原理に基づくものである。振動子を取り付けた脱泡槽は、入口の位置、気泡抜き、脱泡された水の出口、振動子の位置、脱泡槽の径や長

Table 4 Comparison on de-bubbler

	加圧方式	減圧方式	サイクロン方式	超音波方式
連続測定	可能	不可	可能	可能
流量影響	あり	なし	あり	なし
残留泡影響	あり	なし	あり	なし
装置の小型化	可能	不可	可能	可能

さなどの物理的な条件を種々検討することでスクラバ排水に最適化したものである。他の方法と比較して脱泡時間が非常に短く、流速変動の影響を受けにくい。連続測定に向いているのがこの方式の特長である。

### 汚れ対策

オープンループではほぼ海水に近い水を測定することになる。海水由来の有機的な汚れが堆積しない対策が必要である。一方、クローズドループでは、ススやオイル分の汚れへの対応が必要となる。装置内のサンプリングラインにはライン洗浄機能を採用し、任意のタイミングでサンプリングラインの清水洗浄が行え、サンプリングライン内部や、センサへの汚れの蓄積を防止している。pHセンサおよびPAHセンサは長年陸上プラントで培った超音波洗浄のノウハウを採用し、濁度センサも陸上プラントで効果が確認されているワイパ洗浄を採用している。

## 各センサにおける課題

### pHセンサ

海水は非常にイオン濃度の高い液体である。pH電極は使用中に内部液が微量リークしている。長期間の使用により内部液のKCl濃度が薄くなると、その濃度が海水より低くなる。液絡部を通じて内部液、液絡部が汚染されることとなる。海水を長期安定して測定するために、内部液を過飽和にできるゲル式を採用し、KCl内部液濃度を4 mol/L以上とした。これにより、日々の保守において、KClの再補充が不要になり、保守性が向上した。pHセンサをFigure 6に示す。

- 原理 : ガラス電極法
- 測定範囲 : 1-11 pH
- 内部液 : 疎水性ポリマーゲル、塩化カリウム過飽和
- 接液部材質 : ガラス, PVDF, PE
- 洗浄器 : 超音波洗浄器(オプション)



Figure 6 pH sensor



Figure 7 Turbidity sensor

### 濁度センサ

クローズドループにおいてはサンプルが黒色になり、濁度計への影響が大きく、測定可能範囲が狭まる。そのため黒色サンプルの影響をできるだけ受けにくいセンサを開発した。濁度センサをFigure 7に示す。

- 原理 : 90° 散乱法
- 測定範囲 : 0-500 FNU
- 測定波長 : 850 nm
- 接液部材質 : PVC, POM, EPDM, NBR, Ti, FKM
- 洗浄器 : ワイパ洗浄器(標準付属)

### PAHセンサ

PAH(多環芳香系炭化水素)は重油などに含まれているオイル分を構成する多環芳香系炭化水素のうち、EPAで定められた16成分の総称である。PAHセンサは、その中の1成分(フェナトレン)を代替パラメータとして測定しているものである。フェナトレンは、励起波長254 nmで、360 nmの蛍光を発する。この蛍光強度を測定することでPAHを換算して測定値を表示している。

PAHの標準液(フェナトレン)は単独では、溶解性が悪い。いったん有機溶媒に溶解し、その液で標準液を作成(純水ベース)している。そのため標準液は揮発性が高く、高温多湿の船内での標準液の作成や使用は極めて困難である。船内でも簡単に校正やチェックができるシステムが望まれており、乗組員でも容易に校正できるシステムを開発中(特許出願中)である。

フェナトレン標準液を基準センサで測定、また蛍光ガラスを基準センサで測定し、標準液濃度に対して蛍光ガラスの蛍光強度を値付けし、この値で、現場の被校正センサを校正するものである。有機系蛍光材料は熱や光で分解されるため、PAHセンサの基準物質としては適さないが、無機系



Figure 8 PAH probe

の蛍光ガラスはそれらの影響を受けない。したがって、船内などでの使用には非常に適していると言える。基準センサには、トレーサブルな受光素子が組み込まれている。この基準センサによる標準液での蛍光ガラスの値付けは、この値も同様にトレーサブルとなる。したがって、センサの校正の際は、標準液と同様に、蛍光ガラスでも校正が可能となる。PAHセンサをFigure 8に示す。

- 原理 : 蛍光分光法
- 測定範囲 : 0-50 µg/l, 0-500 µg/l 0-5000 µg/l
- 測定波長 : 励起: 254 nm 蛍光: 360 nm
- 接液部材質: POM, Ti
- 洗浄器 : 超音波洗浄器(オプション)

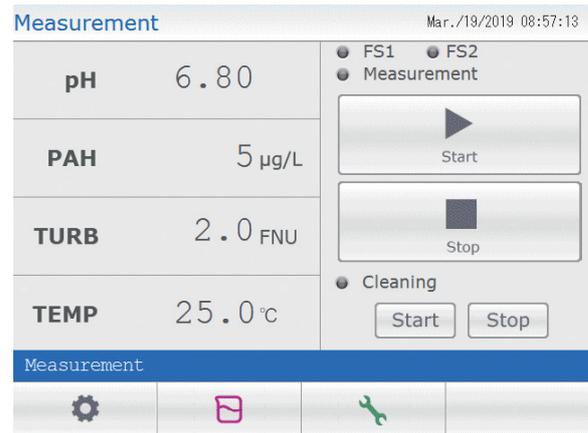


Figure 9 Operation panel

### 操作部

Figure 9に操作部の初期画面を示す。あまり計測機器になじみのない乗組員を対象に、直観的な操作ができるよう、機能のアイコン化を計って操作性の向上を実現している。

以下、Table 5にアイコン機能の一覧を示す。

製品仕様をTable 6に示す。

EG-100の内部構造をFigure 10に示す。

- ①脱泡槽(下部に超音波発振子)
- ②pHセンサ
- ③PAHセンサ
- ④濁度センサ
- ⑤流量計
- ⑥ホルダ(濁度, pH)
- ⑦ホルダ(PAH)

Table 5 The functions of icons

アイコン	機能	内容
	設定	設定画面を表示します。
	校正	各センサの校正を実施する校正モード画面を表示します。
	保守	保守モード画面を表示します。
	測定 開始	自動測定を開始します。
	測定 停止	測定を停止し、次の測定開始を待機します。
	警報	警報発生時に点灯します。

Table 6 Specifications of EG-100

一般仕様	装置型式	EG-100-SI(取水用) EG-100-SO(排水用)
	寸法	600(W)×400(D)×1700(H)mm突起部含まず
	電源	AC 100~240 V 50/60 Hz
取水用測定条件	サンプル条件	0.1 MPa~0.4 MPa 3 L/min供給可能なこと
	清水条件*1	0.1 MPa~0.7 MPa 3 L/min供給可能なこと
排水用測定条件	サンプル条件	0~0.1 MPa 3 L/min供給可能なこと
	清水条件*1	0.1 MPa~0.7 MPa 3 L/min供給可能なこと
配管取合	サンプル水入口	JIS10K25A
	サンプル水出口	JIS5K25A
	清水	JIS5K15A
測定項目	pH仕様	1~11 pH(温度補償付き)
	PAH仕様	0~50 µg/L, 0~500 µg/L, 0~5000 µg/L
	濁度仕様	0~500 FNU
	温度仕様	0°C~100°C(サンプル水温度0~40°C)

\*1 キャビネットに清水が供給されるよう接続する前に、錆やパイプの水垢を除去するため管内を洗浄しておく必要がある。

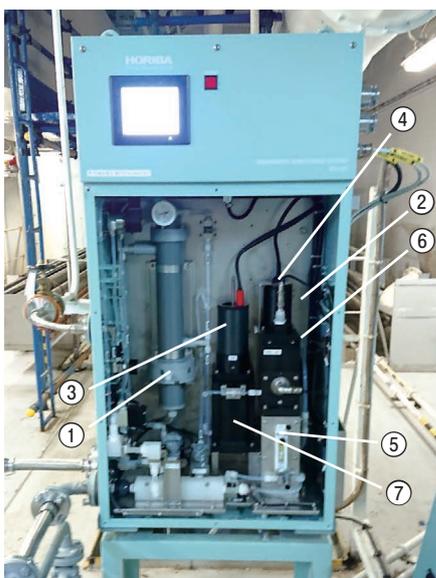


Figure 10 Internal structure

### 実装評価データ

2020年までは船上のスクラバは指定海域に入らないと本格的に稼働しないこともあり、モニタリング装置の連続運転評価が難しい状況である。港湾航空技術研究所、東京湾フェリーのご協力により、東京湾フェリー（神奈川県久里浜と千葉県かなや港間を運行）の「かなや丸」にモニタリング装置を搭載し、海水での連続測定を実施してきた。最近の3ヶ月間（2019年1月~3月）のデータをFigure 11, 12, 13に示す。

pH計は一般的に言われている海水のpHを表示し、安定して測定できている（Figure 11）が、両方の着岸時に若干の変化が認められる。濁度計は着岸、離岸時の海底の汚泥巻き上げによる指示上昇がみられ、船の運転モードの変化を捉えている（Figure 12）。PAHセンサはほぼ5 ppbで安定した数値を示している（Figure 13）。定期的に汚れやセンサの感度劣化を確認しているが、洗浄機構の効果により安定した測定を実現できている。

### おわりに

船舶排ガス浄化用水質モニタ EG-100は、安定した測定が困難なサンプル条件において、機能の強化（脱泡機構、洗浄機構）を計り、保守作業性の向上（コントロールパネルの直観的な理解、pHセンサの内部液の過飽和ゲル、PAHセンサの蛍光ガラスによる校正システム（開発中）など）を追求し、長期安定動作を目指した製品である。これらの機能は、スクラバの安定稼働や、船の規制遵守に貢献すると考えている。

今後も、新たな業界にチャレンジするとともに他社にない付加価値を高めることで船舶ビジネスにおけるHORIBAブランド価値の向上に努めたい。

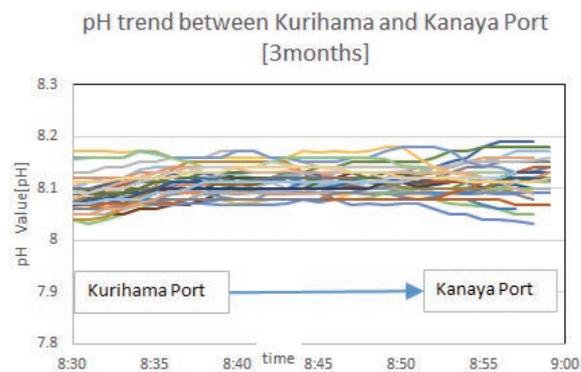


Figure 11 Trend chart on pH

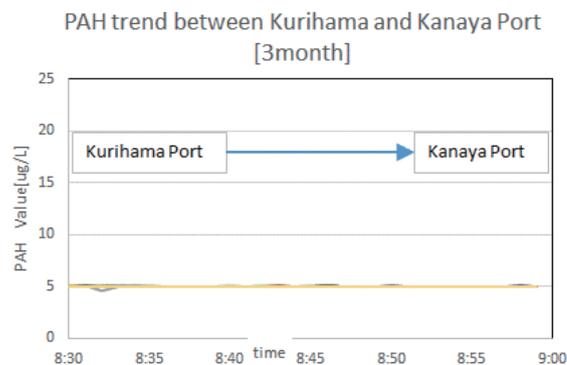


Figure 12 Trend chart on PAH

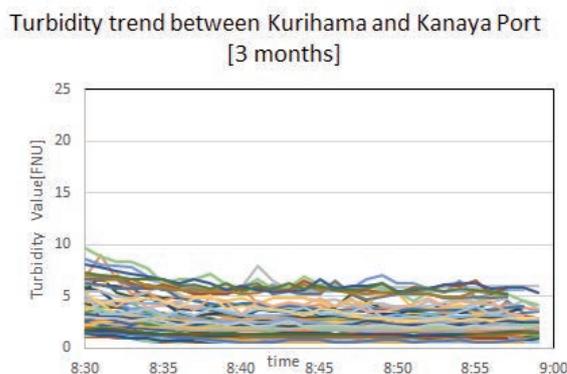


Figure 13 Trend chart on turbidity

### 謝辞

本装置の評価に関して、国立研究開発法人海上・港湾・空港技術研究所、海上技術安全研究所 環境・動力系 動力システム研究グループ グループ長 高橋千織様、国立研究開発法人 海上・港湾・空港技術研究所 港湾空港技術研究所 海洋情報・津波研究領域 海洋環境情報研究グループ 主任研究官 細川真也様および研究官 大倉翔太様、東京湾フェリー株式会社に多大なご協力いただきましたことを感謝いたします。

\*本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

## 参考文献

- 【1】 一般財団法人日本海事協会 機関部, 排ガス浄化装置ガイドライン (Ver.3) 2018年10月



**富岡 紀一郎**

Kiichiro TOMIOKA

株式会社 堀場アドバンスドテクノ  
Water ビジネスプロモーション室  
Water Business Promotion Office  
HORIBA Advanced Techno, Co., Ltd.



**羽島 雄大**

Yuta HASHIMA

株式会社 堀場アドバンスドテクノ  
グローバル開発部  
Global Development  
HORIBA Advanced Techno, Co., Ltd.

## 船舶エンジンSCRシステム用尿素水の品質管理のための簡易迅速測定 コンパクト水質計LAQUAtwin pHメータを用いた尿素水の品質評価

Simple and Quick Quality Confirmation Method of Aqueous Urea Solution for Marine SCR System  
Evaluation of Alkalinity of Aqueous Urea Solution with LAQUAtwin pH Meter

桑本 恵子

Keiko KUWAMOTO

船舶ディーゼルエンジンから排出される窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)を除去するSelective Catalytic Reduction (SCR)システムで還元剤として用いる40%濃度尿素水は、塩酸による中和滴定により求めたアルカリ度で品質を管理することが国際規格ISO-18611で定められている。しかしながら、中和滴定は手間や時間がかかる上、船上で化学実験操作を行うには専門の知識や技術を持ったクルーや作業場所の確保が困難である。本稿では、コンパクト水質計LAQUAtwin pHメータを用いて尿素水の劣化状態を迅速に且つ簡易に評価できる手法を紹介する。

The quality requirements of aqueous urea solution at 40% concentration for Marine Selective Catalytic Reduction (SCR) system is defined by International Standard (ISO-18611). One of them is the alkalinity which determined by potentiometric titration of free ammonia in the urea solution with hydrochloric acid solution. However, the titration is time-consuming work, and there are no crew being familiar with the chemical experiment, and no operation place in the ship. This paper shows compact water quality meter LAQUAtwin pH can be used for the simple and quick evaluation of aqueous urea solution quality.

### はじめに

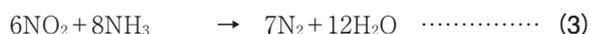
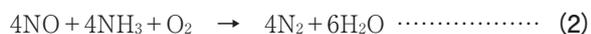
2016年1月以降に起工される130 kwを超えるディーゼルエンジンを搭載する船舶に対して国際海事機構(IMO)による第3次排出規制が適用され、指定の海域において第1次規制に対してNO<sub>x</sub>排出を80%削減することが求められている。これによりNO<sub>x</sub>排出削減システムの需要は増えてきている。

NO<sub>x</sub>排出削減システムの一つに選択触媒還元法(Selective Catalytic Reduction : SCR)がある。

SCRシステムでは、尿素水がNO<sub>x</sub>還元剤として用いられ、SCR内で加水分解されてアンモニアに変化する。



このアンモニアはNO<sub>x</sub>を還元し最終的には、窒素と水に分解されて外部へ排出される。



この反応が効率よく進むためには、NO<sub>x</sub>還元剤として尿素

水の品質が重要なファクターとなる。

船舶エンジンSCRに使用される40%濃度尿素水は、国際規格ISO18611において14項目の品質基準が要求されており、その要求項目の一つにアルカリ度がある<sup>[1]</sup>。アルカリ度とは、尿素水中のアンモニア量の割合を百分率で表したものであり、尿素水を塩酸で中和滴定して求める方法が標準となっている。また、ISOにおいて尿素水のアルカリ度は0.5%以下が適正とされている<sup>[1,2]</sup>。

尿素水は、NO<sub>x</sub>規制海域でSCRに使用するまでの間、船内で保管される。尿素水は常温下でも加水分解反応が進み、アンモニア生成によりアルカリ度は上昇し品質は劣化していく<sup>[3]</sup>。特に温度管理されていない船内の高温な場所に保管される場合、加水分解反応は更に進み品質維持が難しいことが予想される。

そのため船内で尿素水のアルカリ度を確認することが必要になる。ところがISOで規定されている中和滴定法は手間がかかり、且つ化学実験の知識や経験が必要な操作を機関士が行うことは大変困難である。また検査施設に依頼する場合、航海中にSCRに使用することは難しい。本稿では中和滴定法自体を改善するのではなく簡単に尿素水の劣化の

有無を迅速に判断するという目的を達成する解決法を紹介する。

## 尿素水のアルカリ度測定

### 操作

ISO18611-2 Appendix Dに基づき以下の操作を行った<sup>[2]</sup>。40%濃度尿素水1 mL (比重1.11 g/mL<sup>[1]</sup>)を量りとり、150 mLのビーカーに入れた純水100 mLに加えた。校正済のpH電極とメータを使用し0.01 mol/Lの塩酸を用いてpH4.5を終点として滴定を行った。

塩酸とアンモニアはモル比1：1で反応すること (Equation 4) 及びpH4.5を終点とした時に消費される塩酸体積からEquation 5, Equation 6に従ってアルカリ度を求めた。



$$\text{Alkalinity}(\%) = \frac{\text{The ammonia mass(g)}}{\text{The test portion mass of urea solution(g)}} \times 100 \dots \dots \dots (5)$$

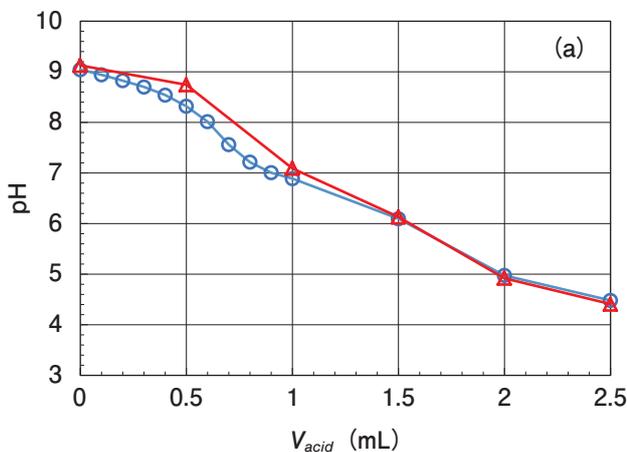
$$\text{Alkalinity}(\%) = (0.017V) / m_s \dots \dots \dots (6)$$

$V$  : The volume of the hydrochloric acid solution (0.01 mol/L) used for the titration (ml)  
 $m_s$  : The mass of the test portion of urea solution (g)

## 尿素水劣化簡易判定法

### 原理

中和滴定法において、40%尿素水1 mL (1.11 g)がアルカリ



度0.5%を示すのは、理論上0.01 mol/L塩酸を30 mL消費した場合である。Figure 1に示す中和滴定曲線のモデル図によると、アルカリ度0.5%未満の劣化が進んでいない尿素水の場合、塩酸添加量30 mLは終点を越えた過剰量であるためpHは4.5未満を示す。一方、アルカリ度0.5%を超える劣化尿素水の場合には終点に達しないためpHは4.5以上を示す。よって40%尿素水1 mLに0.01 mol/Lの塩酸30 mLを加えた混合液のpHを測定するだけで尿素水の劣化の有無を判別することができる。

### 尿素水劣化検査用キット

この簡易判定法の原理を現場で利用できるようにするため、可搬型キットを考案した。

まず、使用する酸の種類の変更を検討した。揮発性のある塩酸は、温度が高温になることも予想される船内において、濃度に変化する可能性がある。そこで同じ強酸で揮発性がない硫酸を候補とした。硫酸を用いることができれば、揮発による濃度変化の懸念もなく、また2価の酸であるため、同じ濃度で体積を半分にすることができる。

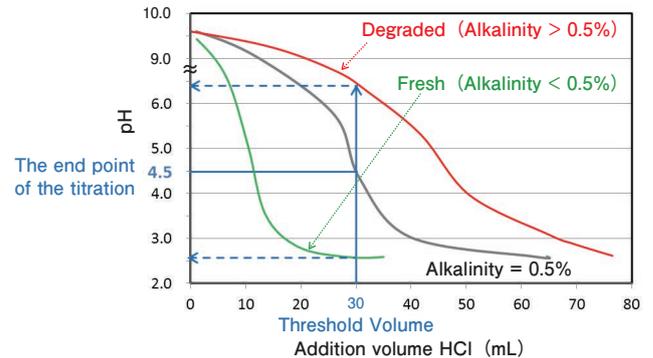


Figure 1 Model for the titration curve of 40% urea solution with 0.01 mol/L HCl

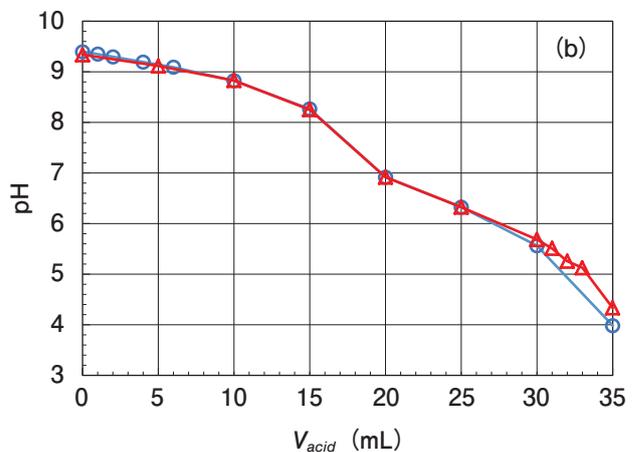


Figure 2 Comparison of neutralizing efficacy of HCl and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in aqueous urea solution. (a) Neutralizing titration in fresh urea solution; (b) Neutralizing titration in degraded urea solution. 0.01 mol/L hydrochloric acid (○); 0.005 mol/L sulfuric acid (△)  
 The degraded urea solution was which the fresh urea solution was stored under 60°C for 2 weeks.

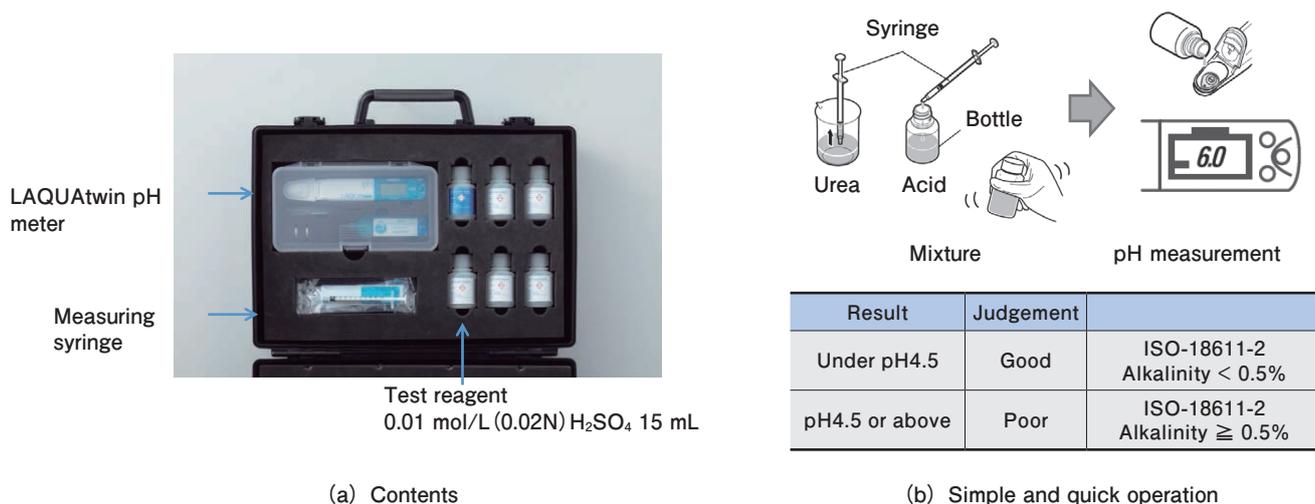


Figure 3 Aqueous urea solution test kit

劣化前後の尿素水について塩酸と硫酸を用いた中和滴定結果をFigure 2に示す。硫酸は2価の酸であるため硫酸濃度は1/2とした。中和滴定の挙動は酸の種類によらず同等であることからキット化には硫酸を採用した。

キット構成は、0.01 mol/L (0.02N)硫酸15 mLを1回分毎に小分けしたボトル、計量用の1 mL用シリンジ、コンパクト水質計LAQUAtwin pHメータとし、キャリングケース内に収めた(Figure 3a)。LAQUAtwin pHメータは、検出部と表示部が一体型となっており、軽量且つ片手で持ち運べる大きさ、またピーカーも不要な構造のため、現場で計測する用途のキットの構成に適している。操作方法は試料となる40%尿素水をシリンジで1 mLを採取し、硫酸が入った

ボトルへ全量入れ、蓋を閉めて混合する。次にその混合液を校正済のLAQUAtwin pHメータの検出部に入れpHを測定し、pHの結果から尿素水の劣化を判定する(Figure 3b)。以上のように複雑な操作を必要とせず簡単に迅速に尿素水劣化の有無の判定を可能にする。

### 結果と考察

尿素水劣化簡易判定法を基にした検査キットの有効性を確認するために国際規格ISOが規準とする中和滴定法によるアルカリ度との相関を確認した。60℃にて段階的に劣化を加速させた40%尿素水1 mLを試料とし、中和滴定法で求めたアルカリ度と尿素水劣化検査キットによるpH測定の結

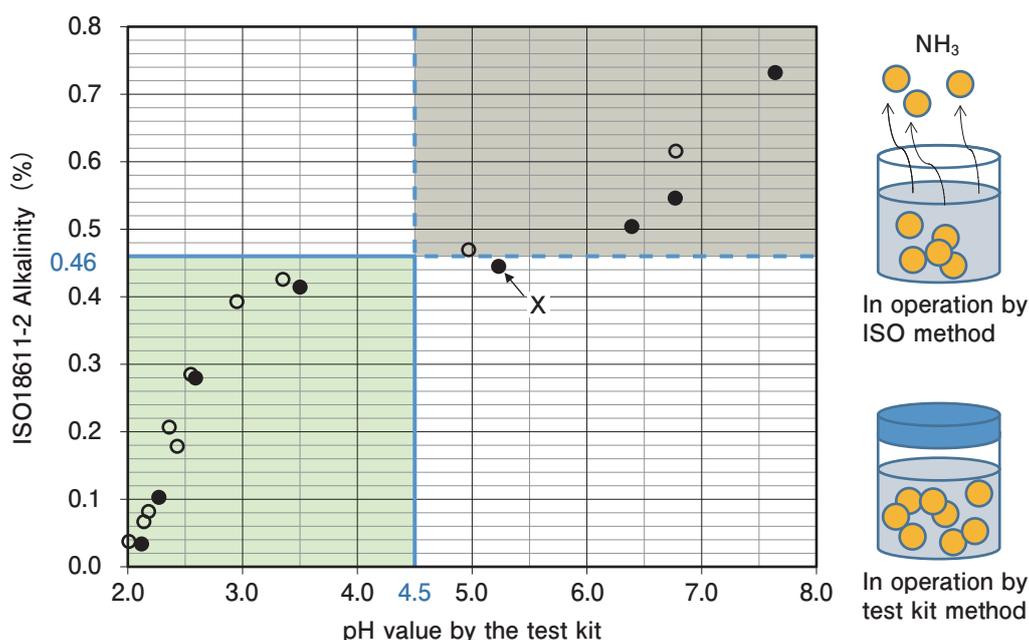


Figure 4 Correlation between ISO method and test kit method  
The two symbols (●) and (○) show their individual series of the first and second time examinations.  
The alkalinity 0.46% is regarded as 0.5% by rounding a number<sup>[4]</sup>.  
The "X" represents the disagreement between the data of two methods.

果をプロットしたものをFigure 4に示す。2種類のプロット(○, ●)は、再現性を確認するために、別の時期に改めて試料作製から行った結果である。ここではアルカリ度算出結果の端数処理<sup>[4]</sup>を考慮してアルカリ度0.46%から0.5%とし、アルカリ度0.46%、キットpH4.5をそれぞれ閾値とした。これらの閾値未満の領域においては、尿素水は劣化していないという判定となり、両手法は相関が取れている。また閾値以上の劣化判定領域についても相関性が得られた。

ところが、Figure 4に示すプロット点XはキットではpH4.5を超えるにも関わらず、ISOによるアルカリ度は0.46%を下回る結果となり、劣化判定に不一致が生じた。これは中和滴定操作中に尿素水に溶存するアンモニアガスが大気中に拡散し、含有アンモニア量が低下したためにアルカリ度の低下が生じたと考えられ、特に閾値付近では顕著にこの不一致が表れやすいと予想される。ISOにおいてもアンモニアガスが拡散するため手早く操作することが推奨されている<sup>[2]</sup>。以上のことからアンモニアガスの拡散を低減できる尿素水劣化検査キットの方がより尿素水の状態に合った品質判定が期待できる。

## おわりに

中和滴定法を応用し迅速簡単に尿素水の劣化を判断する手法を紹介した。また、この迅速簡易判定法を元に考案したキットによる判定結果は、ISOの中和滴定法によるアルカリ度と相関があり、尿素水の劣化の有無をスクリーニングする手段として有効である。

\*本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

## 参考文献

- [1] ISO 18611-1:2014, Ships and marine technology - Marine NOx reduction agent AUS 40 - Part 1: Quality requirements
- [2] ISO 18611-2:2014, Ships and marine technology - Marine NOx reduction agent AUS 40 - Part 2: Test methods
- [3] ISO 18611-3:2014, Ships and marine technology - Marine NOx reduction agent AUS 40 - Part 3: Handling, transportation and storage
- [4] JIS Z8401:1999 数値の丸め方



桑本 恵子

Keiko KUWAMOTO

株式会社 堀場アドバンスドテクノ  
開発本部 新製品開発1部  
New Product Development Department 1  
Research & Development Division  
HORIBA Advanced Techno, Co., Ltd.

## SLFA Seriesによる船舶燃料の簡易硫黄濃度分析

Sulfur Concentration Analysis of Marine Fuel Oil with SLFA Series

青山 朋樹

Tomoki AOYAMA

気候変動に関する国際連合枠組条約によって2015年にパリ協定が制定され、船舶業界においても2020年から始まる船舶燃料中の硫黄濃度規制が強化される。対策として既存船舶が低硫黄濃度燃料を採用する場合には、通常海域から規制海域へ船舶が進入する際に高硫黄濃度燃料から高価な低硫黄濃度燃料への切り替えを管理するため、供給燃料中の硫黄濃度の連続分析は必須である。最も簡易かつ的確な測定手段として蛍光X線分析があり、本稿では蛍光X線硫黄分析装置SLFA-60Mの装置概要、性能、メンテナンス性について紹介する。

Following The Paris Agreement (2015) by United Nations Framework Convention on Climate Change, new regulation of sulfur concentration of marine fuel oil will be applied from 2020, and existing vessels will have to change their fuel oil from normal type to expensive low sulfur type before entering the regulated marine area properly. The continuous monitoring of sulfur concentration of inlet fuel oil will be also indispensable, where X-ray fluorescence method is most simple and accurate for this application, so our SLFA-60M sulfur-in-oil analyzer is introduced in this article.

### はじめに

1992年から始まった気候変動に関する国際連合枠組条約 (United Nations Framework Convention on Climate Change 略称: UNFCCC)によって、気候変動枠組条約締約国会議 (Conference of the parties 略称: COP)が毎年開催され1997年に京都議定書、2015年にパリ協定が制定された。パリ協定では世界の平均気温上昇を抑えるため、21世紀後半には温室効果ガスの排出量を森林などが吸収できるレベルまで低減することを目標に定められた。このように環境問題の世界的な取り組みが一層強化され、この動きは船舶業界においても同様である。特に2020年から始まる船舶燃料中の硫黄濃度に関する規制では、従来から規制される硫黄濃度値よりもかなり低く設定されるため、船舶業界も排出量低減に向けて大きく動き出している。本規制は環境への硫黄酸化物の排出量低減を目的としているが、排出量低減のための方法は主に3種類ある。

- (1) 従来の重油を使用し、排ガス処理装置を取り付ける。
  - (2) 天然ガスエンジン (LNG) への変更
  - (3) 低硫黄濃度燃料の採用
- (1), (2)については現行の船舶に対して大規模な改修が必要であるため、主に新造船に採用される。(3)については現有的設備で燃料/潤滑油の交換のみで対応可能であるが、

大気汚染物質放出規制海域 (ECA海域) と通常海域で燃料の切り替えが必要となる。特に通常海域からECA海域へ船舶が進入するときは、高硫黄濃度燃料から低硫黄濃度燃料に切り替わる。このため、燃料切り替えが正確に完了したかどうかを確認しなければならず、エンジンに供給される直前の燃料を分析しておく必要がある。また、切り替え不備のリスクを低減するためにECA海域に入る前から燃料を切り替える必要があるため、低硫黄濃度燃料に切り替える適切なタイミングを見積もるためにも硫黄濃度測定は有効である。

燃料中の硫黄濃度は古くから測定されており、ISO/ASTM/JISなどで測定方法が規定されている。燃料中の硫黄濃度を最も簡易に測定する方法として蛍光X線分析があり、パイプライン、石油精製所、発電所など燃料が精製、消費されるところで使用されている。蛍光X線分析装置は、非破壊測定手法であるため、分析後もサンプルをそのまま後段の詳細分析に用いることができる。それゆえ、蛍光X線分析装置は様々な分野のスクリーニング分析に広く活用されている。特に船舶における燃料中硫黄の分析については、分析の専門家ではない乗組員が日常作業の一部として燃料中硫黄の分析を行うため、蛍光X線分析装置の分析操作は簡単であることが要求される。

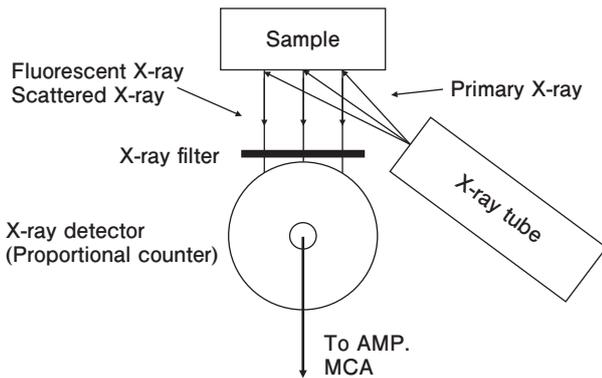


Figure 1 System out line



Figure 2 Outside appearance of instrument

### 蛍光X線分析による燃料中硫黄測定

蛍光X線分析について説明する。試料にX線を照射することで発生する蛍光X線を検出しエネルギースペクトルを得ることができる。発生した蛍光X線のエネルギーは試料に含まれる元素によって異なるため、元素ごとのエネルギー強度を観測することで定性・定量分析を行う。燃料中硫黄の分析においては、1次X線をサンプルとなる燃料に照射すると、試料に含まれる元素に対応した蛍光X線(硫黄の場合 2.3 keV)が発生する。一部の照射X線は試料によって散乱され、散乱X線となる。装置の概略図をFigure 1に、装置外観をFigure 2に示す。本原理の詳細は文献[1]の解説を参照されたい。

照射X線の強度が一定であれば、発生する硫黄の蛍光X線の強度は試料に含まれる硫黄の濃度と相関が得られるため、あらかじめ硫黄濃度が既知の複数の標準試料を測定することで検量線定量が可能である。

### X線信号検出処理

本装置において試料から出た蛍光X線と散乱X線は、比例計数管に入りX線のエネルギーに比例した電荷が生成される。この電荷はプリアンプで電圧信号に変換された後、スペクトル処理回路を通過してマルチチャンネル波高分析器に

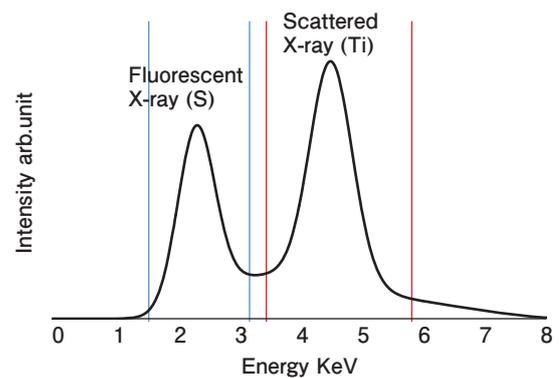


Figure 3 Measurement spectrum

蓄積され、エネルギースペクトルが得られる。Figure 3は試料から出た硫黄の蛍光X線と散乱X線を比例計数管で計測した場合のスペクトルの模式図である。このスペクトルの、硫黄の蛍光X線に相当する領域の面積(S)を散乱X線に相当する領域の面積(B)によって規格化することにより、試料のマトリクス影響を補正することができる。

### 定量分析

複数濃度水準の重油標準試料をあらかじめ測定して硫黄濃度と蛍光X線強度の関係式を導出し、検量線を作成することで定量分析を行うことができる。1%から10%の濃度域においては、硫黄濃度が増えることによって起こる蛍光X線の自己吸収効果によって濃度とX線強度の関係は直線近似できなくなるため、2次式による近似を用いる。

広い濃度範囲で使用する場合、試料に合わせて濃度の異なる検量線を選択する必要がある。SLFA-60Mでは、検量線を選ぶ手間を省くために検量線自動選択機能を搭載しており、複数の検量線を記憶し、測定対象の濃度によって、低・中・高濃度の3種類の検量線を自動で切り替える。船上の硫黄分析においては3%程度の高濃度硫黄燃料から0.1%の低濃度硫黄燃料を測定する必要があるため、それぞれの濃度域に合わせた検量線をあらかじめ用意しておくことで正確な分析が可能となる。重油標準試料を用いた検量線をFigure 4に、0.2%試料に対する測定の再現性をTable 1に

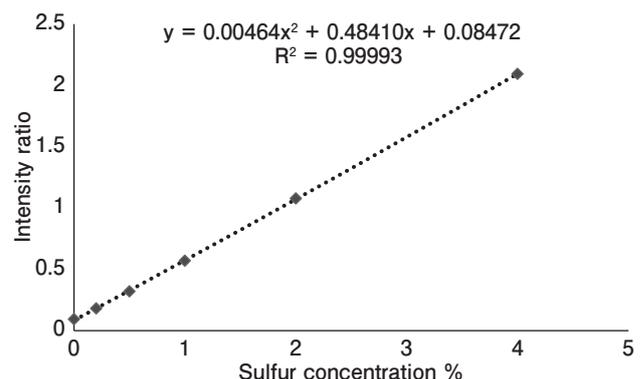


Figure 4 Calibration curve

Table 1 Result of repeatability test

Measurement number	Measurement value
1	0.1946
2	0.1949
3	0.1948
4	0.1950
5	0.1951
6	0.1956
7	0.1954
8	0.1950
9	0.1956
10	0.1951
Average	0.1951
Standard deviation	0.0003

記載する。0.2%試料に対して0.0003%の標準偏差で測定することができ、この標準偏差 $\sigma$ は0.1%試料に対しても同程度となる。0.1%の規制値に対して、 $3\sigma$ で再現性を規定すると0.0990%の安全閾値を設けることで確実に0.1%を下回っていることを規定できる。

## 日常の装置管理

検量線定量を行う場合、分析前に装置が正常かどうか確認する必要があるが、船上では多種多様の標準試料を管理することが困難であることと、標準試料をすべて消費した場合を考え、固形の確認試料で代用することも行われている。固形確認試料は硫黄相当濃度が値付けされており、この確認試料を実試料分析前に分析することで装置の正常・異常／コンタミネーションの有無などを判断することができる。

## メンテナンスの自動化

X線スペクトルのピークの位置は装置の使用状況により変化するため、エネルギー校正を日常的に行う必要がある。スペクトルのエネルギー校正は通常、エネルギー校正用の試料を測定し、ある特定元素のピーク位置から実際のピーク位置との差を計算し、検出器の補正係数を算出することで行われる。SLFA-60Mはスペクトルのエネルギー位置がずれた場合に、自動的に補正係数を調整して、エネルギー校正処理を実施し、メンテナンスを自動化している。エネルギーシフトの変動要因として、比例計数管の内部ガス組成の変化などによる出力パルスの波高値の変化や、プリアンプやアナログデジタルコンバータ(ADC)は周囲温度の変化や経年変化による特性の変化がある。これらの要因でスペクトルのエネルギーシフトが起きると、正確な測定ができなくなるため、試料を測定した時に得られる硫黄の蛍光X線ピークと、チタンの散乱X線ピークを常時監視し、硫黄のピーク位置もしくはチタンの散乱X線のピーク位置が

所定のエネルギーになるように、自動的にエネルギー校正を行っている(硫黄とチタンのピークの強度値の高い方を校正に使用)。この処理により、測定中の環境変化や比例計数管の経年変化によるエネルギーシフトが起こっても常に正確な測定ができる。

## おわりに

本稿では蛍光X線硫黄分析装置SLFA-60Mの装置概要、性能、メンテナンス性について簡単に紹介した。船上のオペレータは分析の専門家ではなく、最小限の操作、注意で正確な値を出すことが要求される。本装置は日常的に確認試料を測定する必要があるが、それ以外のメンテナンスは必要なく試料を作成・セット・分析の簡単な分析フローにより結果を得ることができる。

\*本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

## 参考文献

- [1] 岡田義明, *Readout(HORIBA technical report)*, 5, 43(1992)



### 青山 朋樹

Tomoki AOYAMA

株式会社 堀場製作所  
科学・半導体事業戦略室  
Scientific / Semiconductor Segment Strategy Office  
HORIBA, Ltd.

## 船舶用NO<sub>x</sub>分析計 MEXA-820NO<sub>x</sub>

NO<sub>x</sub> Analyzer for Ships MEXA-820NO<sub>x</sub>

日下 竹史

Takeshi KUSAKA

納谷 裕

Hiroshi NAYA

船舶用のエンジンにおいては、IMO (国際海事機関) のMARPOL条約 (海洋汚染防止条約) による段階的なNO<sub>x</sub>規制が実施されており、2016年からの3次規制に適合させる為に選択式触媒還元脱硝装置 (Selective Catalytic Reduction : SCR) が採用されている。本報では、当社が開発を進めてきたSCRのフィードバック制御及び船上での脱硝率モニタリングを目的とした船舶用NO<sub>x</sub>分析計 MEXA-820NO<sub>x</sub>の測定原理と構成及び主な仕様、評価結果について紹介する。

NO<sub>x</sub> exhaust regulation has been step-by-step applied to maritime engines by IMO (The International Maritime Organization) with MARPOL (The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships), and the SCR (Selective Catalytic Reduction) system is implemented to meet the tier 3 regulation from 2016. This report introduces HORIBA's solution: NO<sub>x</sub> analyzer for ships MEXA-820NO<sub>x</sub> which is developed for SCR feedback control and on-board NO<sub>x</sub> reduction efficiency monitoring with its principle, configuration, specification and evaluation results.

### はじめに

船舶分野においては、IMO (国際海事機関) のMARPOL条約 (海洋汚染防止条約) による段階的なNO<sub>x</sub>規制が実施されており、2016年からは3次規制が適用されている。2次規制まではエンジンの燃焼改善を進めることでNO<sub>x</sub>削減に取り組んできたが、3次規制への適合はそれだけでは不十分で、排ガス後処理技術を導入する必要があるとされ、自動車分野の重量車を中心に広く普及している技術の一つである選択式触媒還元脱硝装置 (Selective Catalytic Reduction : SCR) が適用されている。そこで、当社は船舶用SCRのフィードバック制御及び船上での脱硝率確認を目的としたNO<sub>x</sub>分析計の研究開発を進めてきた。本報では、船舶用NO<sub>x</sub>分析計 MEXA-820NO<sub>x</sub>の測定原理と構成および主な仕様、評価結果について紹介する。

### IMO船舶NO<sub>x</sub>規制

Figure 1はIMO船舶NO<sub>x</sub>規制値を示す。

船舶NO<sub>x</sub>排出量の規制値は定格回転数により決められている。2005年に1次規制が施行され、以降2011年には1次規制の20%のNO<sub>x</sub>削減が要求された2次規制、2016年には1次規制の80%のNO<sub>x</sub>削減が要求された3次規制が順次施行されてきた。

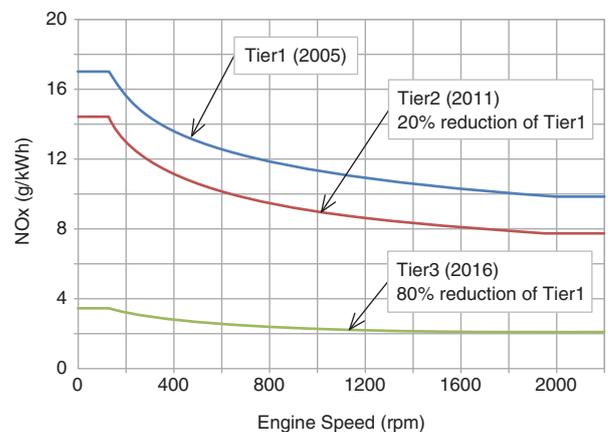


Figure 1 IMO regulation of NO<sub>x</sub> in vessels exhaust (Refer to International Maritime Organization (IMO) Home Page: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx))

### オンボードNO<sub>x</sub>分析計によるSCRのフィードバック制御

Figure 2はSCRの構造及び原理を示す。

SCRは排気管に触媒を取付け、その上流に還元剤となる尿素水をノズルで噴射できる構造を有している。噴射された尿素水は排ガスの熱で分解されてアンモニアとなる。その

後、排ガス中に含まれるNO<sub>x</sub>とアンモニアは、触媒反応により無害な窒素と水に分解される。排ガスに含まれるNO<sub>x</sub>濃度に対して噴射される尿素水が不足すると、十分な脱硝が実施できない。一方、過剰な尿素水が噴射されると、未反応アンモニアが排ガス中に排出されてしまう。効率的な脱硝を実施するには、尿素噴射量の最適化が不可欠となる。そこでSCR前段にNO<sub>x</sub>センサを設置してリアルタイムでNO<sub>x</sub>濃度を計測し、SCRの制御にフィードバックすることで最適な尿素水の噴射を実施して、高効率な脱硝を実現することが可能となる。

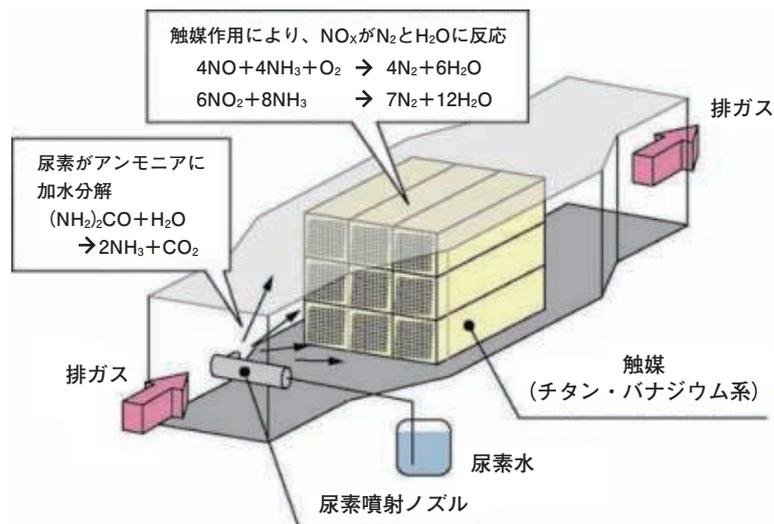


Figure 2 Structure and principle of SCR  
(Reprinted from National Maritime Institute (NMRI) Home Page:  
[https://www.nmri.go.jp/oldpages/institutes/environment\\_power\\_system/power\\_system\\_rd/nox.html](https://www.nmri.go.jp/oldpages/institutes/environment_power_system/power_system_rd/nox.html))

### SCR認証試験

SCR認証にはスキームAとスキームBによる2つの手法がある。

スキームAはエンジンとSCRを陸上試験で組合せてNO<sub>x</sub>排出量を計測する。規制値をクリアすればEIAPP証書(エンジン国際大気汚染防止証書)が交付される。船上でのNO<sub>x</sub>計測は行われず、パラメータチェックにより、IAPP証書(国際大気汚染防止証書)が船主に交付される。

スキームBはエンジン単体でNO<sub>x</sub>排出量を確認する。SCR単体で模擬ガスもしくは排ガスにて脱硝性能を確認する。エンジンとSCRを組み合わせたことを想定してNO<sub>x</sub>排出量が規制値以下であることが確認できればEIAPP証書がメーカーに交付される。ただし、船上での計測が必要となり、脱硝率が陸上での結果と比較し5%以内であればIAPP証書が交付される。よって、SCR前後にNO<sub>x</sub>センサを導入することで、脱硝率の確認とNO<sub>x</sub>濃度のモニタリングが可能となる。

### 船舶用NO<sub>x</sub>分析計 MEXA-820NO<sub>x</sub>

Figure 3はSCRのフィードバック制御用及び脱硝率の確認

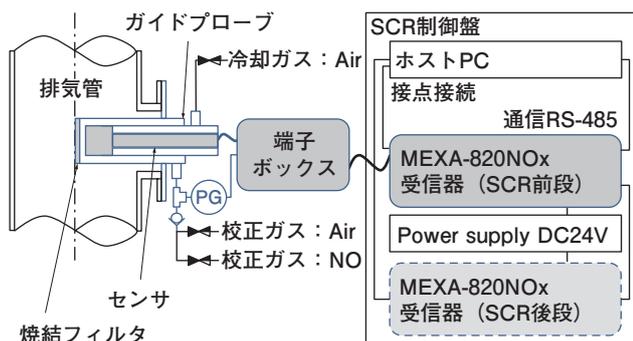


Figure 3 System configuration diagram of MEXA-820NO<sub>x</sub>

用途に開発したMEXA-820NO<sub>x</sub>の装置構成を示す。センサはガイドブローブに挿入された状態で排気管に直挿される。排気管を流れる排ガスは、ガイドブローブ先端部の焼結フィルタから拡散にてセンサに到達するので、追加のサンプリング部品は不要となる。受信器はセンサからの信号を取り込み、NO<sub>x</sub>濃度にリアルタイムで変換する。外部入出力としてRS-485による通信機能を有しており、NO<sub>x</sub>濃度をSCR制御の為に上位のホストPC等に送信できる。また、補機のような発電用エンジンを数機にわたり搭載している船舶の場合、各エンジンの排気管にMEXA-820NO<sub>x</sub>を設置し、デジチェーン機能で各受信器に接続することで各エンジンの排ガス中のNO<sub>x</sub>データを同時に採取することも可能である。

Figure 4に船舶用NO<sub>x</sub>分析計 MEXA-820NO<sub>x</sub>の装置外観を示す。

センサ、ガイドブローブ、受信器いずれも小型でコンパクトな装置構成となっている。ガイドブローブはセンサを排気管に取り付けるための治具の役割を果たすだけでなく、

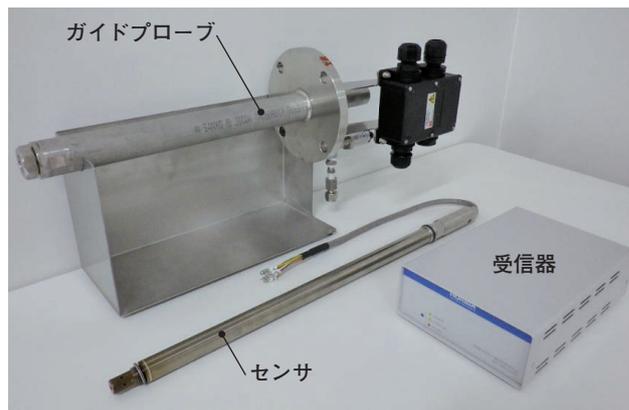


Figure 4 System appearance of MEXA-820NO<sub>x</sub>

センサに校正ガスを供給する配管も備えている。また、圧力センサを備えており、測定された排圧でNO<sub>x</sub>計測値を補正する機能も有している。

Table 1にMEXA-820NO<sub>x</sub>の主な装置仕様を示す。

Table 1 System specification of MEXA-820NO<sub>x</sub>

項目	装置仕様
測定項目	NO <sub>x</sub> , O <sub>2</sub>
測定範囲	NO <sub>x</sub> : 0-2000 ppm, O <sub>2</sub> : 0-25%vol
測定原理	限界電流式ジルコニアセンサ
供給電源	DC24 V (22~28 V, 但し変動は0.2 V以下)
消費電力	約20 W
アナログ出力	出力項目 : NO <sub>x</sub> , O <sub>2</sub> いずれか一方 出力 : 4-20 mA (負荷抵抗 : 600Ω以下)
接点出力	3点 (保守, 上下限警報, 分析計異常) 無電圧接点 (DC30 V, 1 A, アイソレート)
通信機能	RS-485 4線式
測定精度	NO <sub>x</sub> : ±40 ppm, O <sub>2</sub> : ±0.4%vol
応答速度 (T <sub>90</sub> )	10秒以内 (校正ガス入口から, 流量2 L/minのAirと1000 ppmNO切替時)
スタートアップ時間	電源投入後 約3分
センサ保証	稼働4000時間以内

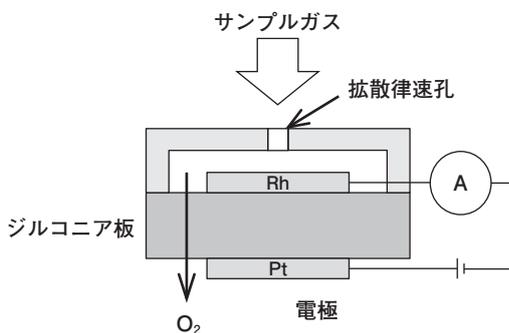


Figure 5 Measurement principle of limiting current type oxygen sensor

## 測定原理

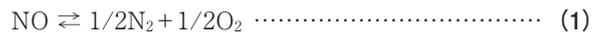
### イオンポンプ作用と限界電流式酸素センサ

Figure 5に限界電流式酸素センサの測定原理を示す。板状のジルコニア固体電解質の上下両面に電極を形成すると、ジルコニア板の上下に酸素濃度差があるとき、両電極間に起電力が発生する。逆に電極間に外部より電圧を加えると、電気化学反応により酸素イオンがジルコニア板内を移動し、ジルコニア板の上下に酸素濃度差を作ることできる。これをイオンポンプ作用と呼ぶ。

小孔等の拡散律速孔でジルコニア板に流入する酸素を制限すると、電圧が増加しても電流値が一定となり飽和する。この電流は限界電流と呼ばれ、排ガスに含まれる酸素濃度に比例する。この電流値を測定することで排ガス中の酸素濃度を検出することができる。これが限界電流式酸素センサであり、この原理をNO<sub>x</sub>センサにも応用している。

### NOの分解と酸素濃度の測定

NOの乖離と結合平衡反応は下式で表される。



ここで、Equation 1の右辺において酸素を除去することで、平衡はNOの分解に傾いて下式のように分解反応が進む。



Equation 2より、分解・除去された酸素量はNO量に比例するので、分解した酸素濃度を測定することでNO濃度が測定できる。

### ジルコニアNO<sub>x</sub>センサの測定原理

ジルコニアNO<sub>x</sub>センサの測定原理をFigure 6に示す。NOの分解により生じる酸素濃度の変化量を測定している

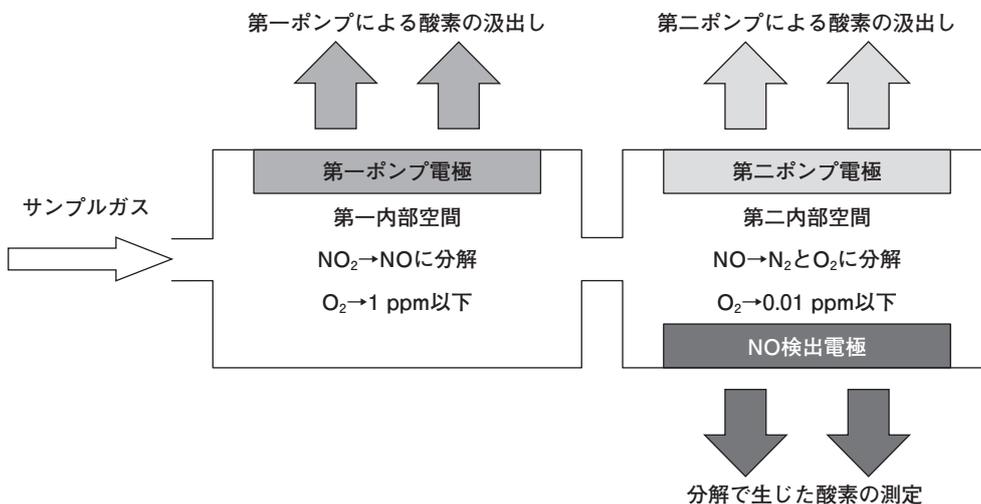


Figure 6 Measurement principle of zirconia oxygen sensor

ので、排ガス中の酸素濃度をゼロ付近まで下げる必要がある。ジルコニアNO<sub>x</sub>センサは第一内部空間と第二内部空間の二つの空洞を持ち、それぞれの内部空間に異なった機能を持つイオンポンプを備えている。具体的には、第一内部空間で排ガス中の酸素をイオンポンプにより汲出して、酸素濃度を極めて低い濃度に制御している。その後、サンプルガスは第二内部空間に拡散する。

第二内部空間の酸素濃度は、イオンポンプによってほぼゼロ近くまで下げられる。さらに第二内部空間にはロジウム(Rh)電極(これをNO検出電極と呼ぶ)をもつイオンポンプが備えられている。Rhは、無酸素の条件下でNOを分解する良好な触媒であり、Rh電極表面でNOがN<sub>2</sub>とO<sub>2</sub>に分解する。この分解により発生した酸素をイオンポンプで汲み出し、その電流を測定すれば、NO濃度を求めることができる。なおNO<sub>2</sub>は第一内部空間でNOに還元され、第二内部空間で分解により生じる酸素イオン電流を計測することでNO<sub>2</sub>濃度を計測することができるので、排ガス中のNO<sub>x</sub>(NO+NO<sub>2</sub>)濃度を測定することができる。ここで、NOに対するセンサの感度を1とすると、NO<sub>2</sub>に対する感度は0.8程度である。その原因は第一内部空間でのNOへの分解およびNOとNO<sub>2</sub>の拡散係数の違いによるものと考えられる。

### ジルコニアNO<sub>x</sub>センサの構造と検出原理

Figure 7にMEXA-820NO<sub>x</sub>のセンサ構造を示す。

MEXA-820NO<sub>x</sub>のセンサは、ジルコニア固体電解質の厚膜積層によって製作されている。またセンサにはヒータが設置されており、電解質中のイオン移動の効率を上げるために700~800℃程度に加熱されている。第一内部空間の酸素濃度はV<sub>0</sub>で検知され、ポンプ駆動電流Ip0を制御することで、第一内部空間の酸素濃度を一定(約1 ppm)に保っている。同様に、第二内部空間の酸素濃度はV<sub>1</sub>で検知され、ポンプ駆動電流Ip1の制御により酸素濃度を一定(約0.01 ppm)に保っている。センサには、第一、第二内部空間以外の隙間としてエアダクトがあり、第一、第二内部空間内の酸素濃度を測定するための基準電極(大気基準)が取り付けられている。NO検出電極との間に一定電圧を印加し、NO

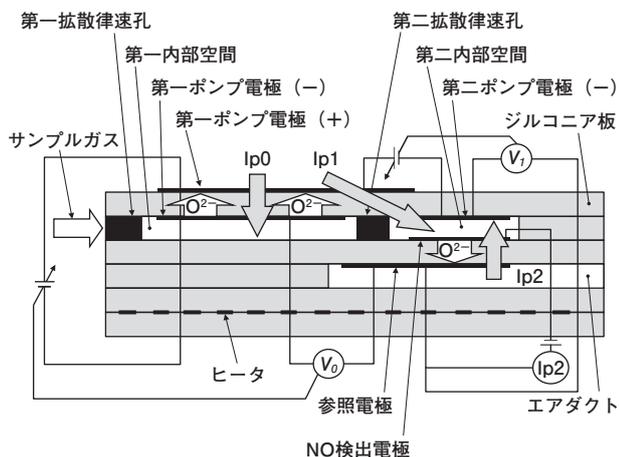


Figure 7 Sensor configuration of MEXA-820NO<sub>x</sub>

を分解した際に発生するイオン電流Ip2の大きさを測定してNO濃度に換算する。

なお、第一内部空間だけを見ると限界電流式酸素センサと同様の構造と機能を有しており、酸素濃度を測定することも可能である。

## 試験結果

### 試験項目

船用電気機器の船級協会型式承認に必要な試験項目は、International Association of Classification Societies(IACS: 国際船級協会連合)が制定しているUnified Requirements (UR: 統一規格)のE10(Test specification for Type Approval)に記載されている。電気機器の型式認証を取得することを目指して、基本性能試験を実施した上で、E10に従って評価試験を実施した。主要な試験項目についてTable 2に示す。

Table 2 Major test items

試験項目	ポイント	船級認証試験の要求
直線性試験	性能試験の一環として	○
温湿度試験	55℃, 95%RHの高温高湿度に耐える必要有	○
振動試験	センサとガイドプローブへの負荷は±4.0 G	○
相関試験	リファレンスはCLD法 IMOのNO <sub>x</sub> テクニカルコードに規定されたNO <sub>x</sub> 計測の基準法	N/A

### 直線性試験

Figure 8にMEXA-820NO<sub>x</sub>の直線性試験の結果を示す。既知濃度のNOガス(N<sub>2</sub>ベースの1999 ppm NOを、ガス分割

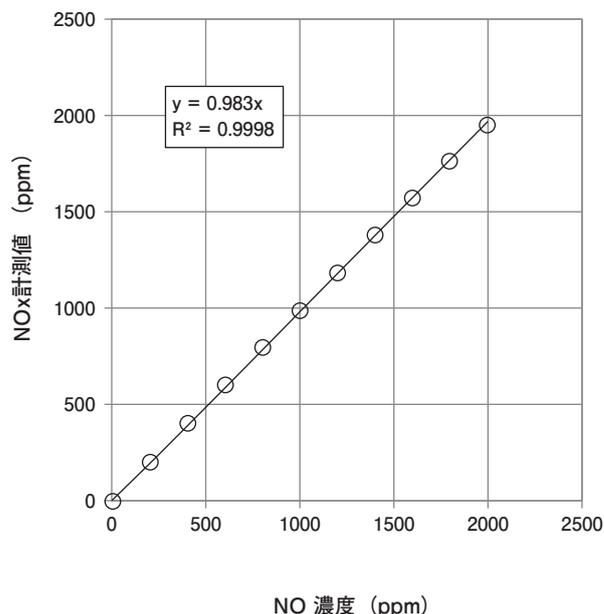


Figure 8 Data linearity of MEXA-820NO<sub>x</sub>

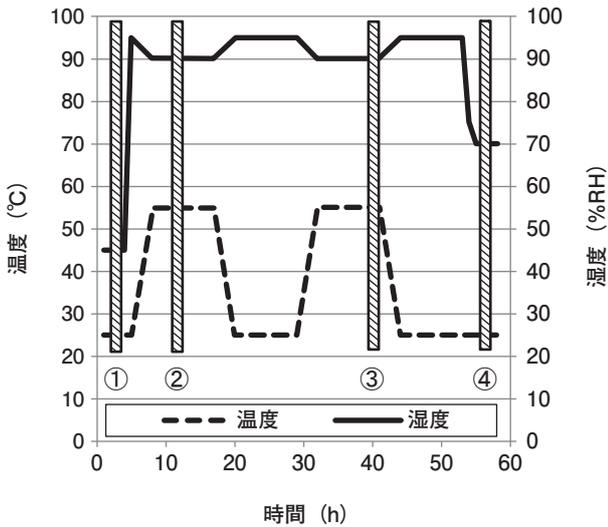


Figure 9 Atmosphere and measurement timing of temperature and humidity test

器を使用してN<sub>2</sub>で10分割した)をガイドプローブの校正ガス入口から流し、NO濃度を計測した。NO濃度が0から1999 ppmまでの広い濃度範囲で傾き、R<sup>2</sup>とも良好な直線性があることがわかる。

### 温湿度試験

Figure 9に温湿度試験の試験環境と計測タイミングを示す。前半12時間は55°C/90%RH、後半12時間は25°C/95%RHの1サイクル24時間の試験環境を2サイクル実施する。①～④に示すタイミングで、ガイドプローブの校正ガス入口からスパンガスとして950 ppmのNOを、ゼロガスとしてエアを10分ずつ3回交互に流してNO濃度を計測し再現性

Table 3 Result of MEXA-820NO<sub>x</sub> temperature and humidity test (単位: ppm)

	1回目	2回目	3回目	平均	偏差	規格	結果
①	951.5	953.2	954.1	952.9	+1.1/-1.4	±10	○
②	950.1	950.1	950.1	950.1	±0.0	±10	○
③	948.9	948.9	947.1	948.3	+0.6/-1.2	±10	○
④	949.3	949.4	949.2	949.3	+0.1/-0.1	±10	○

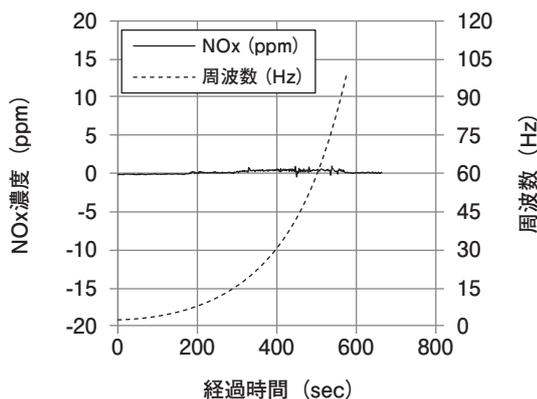


Figure 10 Frequency scanning vibration test of MEXA-820NO<sub>x</sub>

を確認した。

Table 3に温湿度試験の計測結果を示す。①～④の各測定ポイントにおいて、装置規格の±10 ppmを十分満足する再現性を示していることがわかる。

### 振動試験

センサおよびガイドプローブは排気管に設置されるために特に高い耐振動性が求められる。まずゼロガスとして空気を計測しながら掃引試験を振動周波数2~100 Hz, 0.5 oct/minで実施し、共振点の有無を確認した。Figure 10にMEXA-820NO<sub>x</sub>の掃引試験の結果を示す。振動周波数全域において共振は認められず、ゼロガスの計測値も安定していることがわかる。

次にゼロガスとしてエアを計測しながら、振動周波数30 Hz, 加速度±4.0 G, 振動方向X, Y, Z 3軸, 各方向に90分の振動耐久試験を実施した。Figure 11にMEXA-820NO<sub>x</sub>の振動耐久試験の結果(代表としてセンサの軸に垂直方法)を示す。測定時間全域に渡りゼロガスの計測値は安定していることがわかる。

### 化学発光法との相関

IMOのNO<sub>x</sub>テクニカルコード(NTC)では、化学発光法(CLD法)がNO<sub>x</sub>計測の基準として定められている。

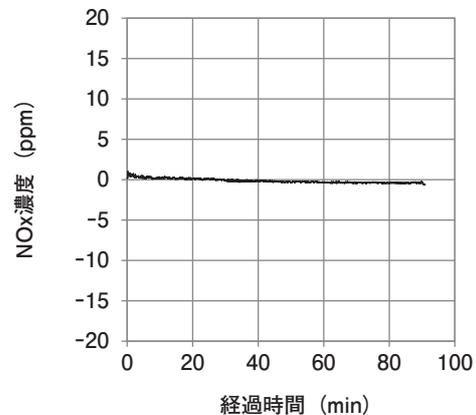


Figure 11 Vibration endurance test of MEXA-820NO<sub>x</sub>

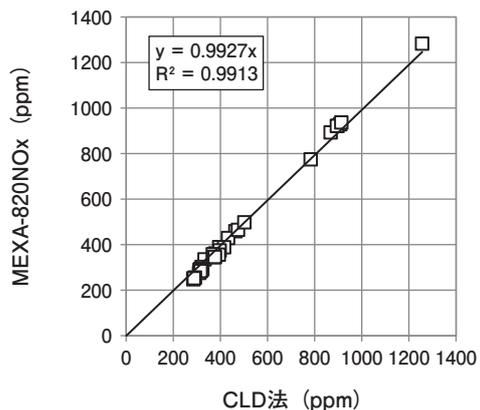


Figure 12 Correlation test with CLD method

Front side



Figure 13 MEXA-820NO<sub>x</sub> arranged in the front and the rear of SCR

Rear side



Figure 12に、ジルコニアNO<sub>x</sub>センサとCLD法の比較例を示す。試験エンジンには、2サイクル船用ディーゼルエンジンを用いた。ジルコニアNO<sub>x</sub>センサは、CLD法と良い相関を示すことがわかる。

### ジルコニアNO<sub>x</sub>センサの耐久性

Figure 13に実船での排ガス耐久評価を実施した時のセンサの設置状況を示す。

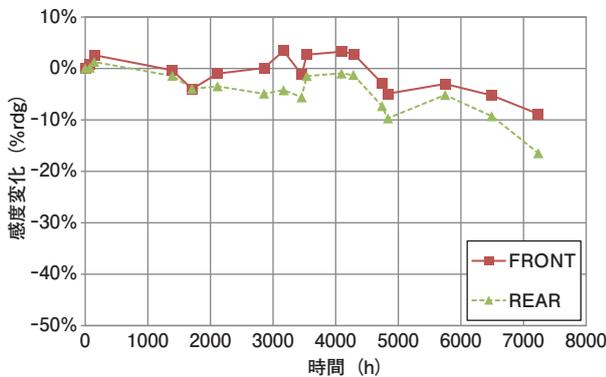


Figure 14 Durability evaluation on actual vessel

Figure 14は実船でSCR前後にジルコニアNO<sub>x</sub>センサを設置し、連続計測で感度の推移を調査した結果を示す。燃料はHigh Sulfa C重油を使用した。約7000時間の連続計測で感度低下は20%以内であり、定期的な校正を実施すれば連続モニタリング計測が可能と考える。

### 船級認証

Figure 15に各船級協会からの船級認証の証書を示す。現在ABS, NK, DNV, CCSの4船級協会からの船用電気機器の認証を取得した。さらに船上での連続モニタリング、SCRの脱硝率確認の用途に使用できるNO<sub>x</sub>分析計としてのEU船用機器指令(MED)の認証取得に向け対応中である。

### おわりに

本報では、ジルコニアNO<sub>x</sub>センサを用いた船舶用NO<sub>x</sub>分析計MEXA-820NO<sub>x</sub>について紹介した。排ガスによる耐久性も十分備えていることを確認することができた。SCR制御用のセンサとしてだけでなく、船上での連続モニタリング、

#### NK



#### DNV



#### ABS



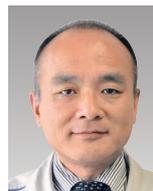
#### CCS



Figure 15 Vessel classification certificates by each classification society

SCR前後のNO<sub>x</sub>計測による脱硝率の確認などにも応用できるであろう。

\*本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。



**日下 竹史**

**Takeshi KUSAKA**

株式会社 堀場製作所  
開発本部 自動車計測開発部  
Automotive Measurement R&D Dept.  
Research & Development Division  
HORIBA, Ltd.



**納谷 裕**

**Hiroshi NAYA**

株式会社 堀場製作所  
開発本部 自動車計測開発部  
Automotive Measurement R&D Dept.  
Research & Development Division  
HORIBA, Ltd.

## Engine Dynamometers for Marine Applications

船舶用エンジンダイナモメータ

### トーステン ボツジュ

Torsten BODSCH

HORIBA Automotive Test Systems (ATS) - as the name indicates - is mainly known as product and system provider for the automotive industry. Nevertheless, HORIBA Mechatronics due to its history, also has a strong footprint in the non-automotive sector by providing engine dynamometers for marine, aerospace and railway applications. This article gives an overview on different solutions for marine engine testing that were realized by HORIBA during the last 15 years in cooperation with customers all over the world.

HORIBAの自動車計測システム部門(ATS : Automotive Test Systems)は自動車産業向けの製品やシステムを提供している。加えて、メカトロニクス事業では、自動車以外の船舶、航空、鉄道分野にもエンジンダイナモメータを提供し、多くの実績を残している。本稿では、お客様との協力でHORIBAが実現した、船舶用のエンジン試験に用いたエンジンダイナモメータの最近の事例をいくつか紹介する。

### Introduction

Marine transport plays a significant role in the global economy because sea freight is the most cost-effective way for goods and raw materials around the world.<sup>[1]</sup> In 2017 the world seaborne trade reached a total volume of 10.7 billion tons.<sup>[2]</sup> More than 90% of the world's trade is carried by sea<sup>[1]</sup> and further growth of 3.8% per annum is expected until 2023.<sup>[2]</sup>

This strong demand for transport vessels of all sizes is also reflected in the increasing demand for test systems for all type of ships. The International Maritime Organization (IMO) adopted in April 2018 an initial strategy to reduce the total annual greenhouse gas emissions from ships by at least 50% until 2050.<sup>[2]</sup> It can be assumed that due to this ambitious target, the development effort for marine engines will increase as well as the demand for testing solutions for marine applications.

### HORIBA's History and Experience in Engine Dynamometers

HORIBA gained a long history and tradition in the field of engine testing with the acquisition of the German company SCHENCK DTS (Development Test Systems) in 2005. Since 1960 HORIBA and SCHENCK delivered consolidated more than 10,000 units of hydraulic

dynamometers, eddy-current dynamometers, AC<sup>\*1</sup> and PM<sup>\*2</sup> (synchronous machine) dynamometers for engine and powertrain testing.

The hydraulic and eddy-current dynamometers were for a long time state-of-the-art technology and widely used as loading units for engine testing. Due to changed engine testing requirements, these dynamometers lost their dominate position and were systematically replaced by AC machines that have become the most important dynamometers during the last decades. In the meanwhile, HORIBA sold more than 1,400 load units of its well-respected Dynas3 AC dynamometer. But the "old" - and well proven - load units never lost their right to exist and are still commonly used in the marine engine testing because of some advantages compared with other solutions. In the following chapters, these dynamometer types are presented with different test bench concepts and applications.

\*1: AC: Alternating Current

\*2: PM: Permanent Magnet

### Engine Test Stand with AC Dynamometer

We start our journey through different dynamometer concepts for marine engines with a conventional TITAN (brand name of the HORIBA system) Engine test bench that can

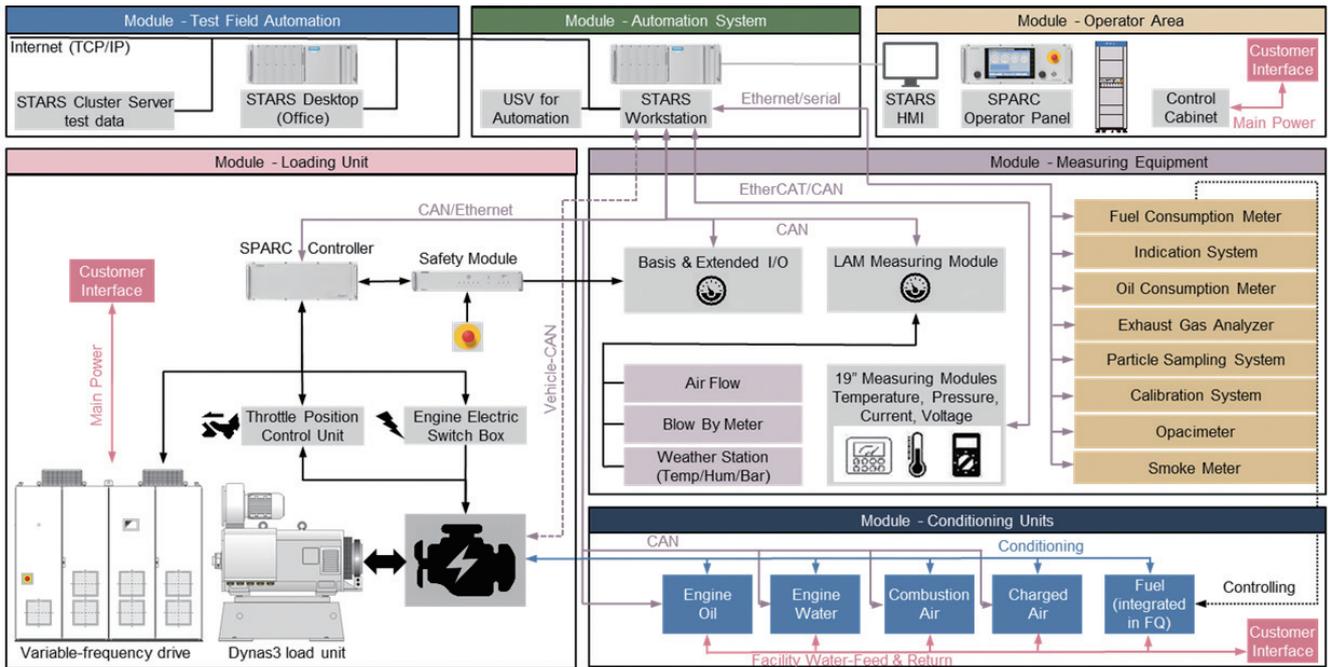


Figure 1 Block diagram TITAN engine test system

be used for all types of internal combustion engines. The TITAN Engine is mainly used for automotive engines, but in principle there is no difference from the system design between an engine test stand for automotive or marine applications. In most of the cases, the differentiation is due to the performance data of the specimen (maximum speed, torque, power, inertia etc.), the application of the test bed (stationary, transient or dynamic testing) and the measuring tasks.

In this example (Figure 1), the TITAN is equipped with a state-of-the-art AC dynamometer from the Dynas3 series. One of the reasons why AC machines are today's standard load units is that they perform in motoring (driving) and generating (absorbing) operation. While passive dynos - such as eddy-current and hydraulic dynos - only run in absorbing mode. In addition, they can be used for dynamic tests because of their dynamic response behaviour that is also not the case with passive dynos.

Figure 1 demonstrates the block diagram of the TITAN Engine Test System with its six core modules; namely, loading unit (rose), conditioning units (dark blue), measuring equipment (purple), operation's place (yellow), automation system (green) and test field automation (light blue).

The dynamometer and the SPARC Engine controller are the main components of the loading unit module (rose). The shown Dynas3 AC dynamometer is powered by a VFD (variable-frequency drive) cabinet and mechanically connected to the engine (DUT = device under test). The SPARC Engine controller is responsible for control of both the dynamometer and the DUT.

The block called Module-Conditioning Units (dark blue)

supplies fuel, oil, coolant, charged air and combustion air for the engine that are essential to run the DUT. Exact conditioning of media are needed to minimize non-systemic errors as well as to achieve accurate and reproducible measurements results.

The entire block called Module-Measuring Equipment (purple) is strongly influenced by the purpose of the test and the measuring task. The acquisition of temperature, pressure, current and voltage are done with standardized measuring modules. The ambient test cell conditions (temperature, humidity and pressure), which are important for the evaluation of the measurement results, are measured by a weather station. In addition, there are many engine-specific measuring systems that are used for specific measuring tasks (such as fuel flow, air flow, blow-by, oil consumption, smoke meter etc.).

Outside of the test cell is the block called Module-Operation's Place (yellow) where the user spends most of the time. It includes HMIs (human machine interfaces) of the SPARC controller as well as the STARS automation system and the measuring cabinet.

The STARS Engine automation system, shown in the block Module-Automation System (green) is a flexible high-performance automation platform with integrated automation, data acquisition and control functions. For larger test fields with a higher number of test stands, an additional block called Module-Test Field Automation (light blue) is beneficial for central data management.

The test cell of a TITAN Engine with an AC dynamometer Dynas3 HT 350 (350 kW rated power, 1,006 Nm rated torque and 9,000 rpm maximum speed) can be seen in Figure 2. The most important parts of the system are



Figure 2 Test cell with TITAN engine test system (HORIBA test center Oberursel, Germany)

marked with numbers as follows: operator area (1), test cell (2), base plate with air damper system (3), AC dynamometer with base frame (4), and DUT mounted on engine pallet (5).

The TITAN Engine covers the needs of development and production test. Development tasks can be performance testing, functional testing, endurance testing, calibration testing and emission certification. Production tasks are quality control or end-of-line testing.<sup>[3]</sup>

The Dynas3 standard portfolio reaches from Dynas3 LI 145 (145 kW/308 Nm absorbing) to Dynas3 HD 1000 (1,000 kW/5,001 Nm absorbing). HORIBA provides dynamic test stand solutions for engines between 20 and close to 1,000 kW.

### Test Stand with Hydraulic Dynamometer for Large Engines

Ship's power plants and propulsion systems are mainly constant speed diesel engines with high power and high torque. For stationary testing of engines above 500 kW, hydraulic dynamometers are the first choice because of their high power density and unbeatable price/performance ratio.

Main differentiation between hydraulic and AC dynamometers is that hydraulic load units can only perform in absorbing mode while AC machines are capable for absorbing plus driving operation. Hydraulic dynamometers work according to the Foettinger fluid coupling principle and they use water both as a working fluid and cooling medium. Turning the rotor causes a water whirl inside the dynamometer chamber that generates a braking torque on the rotor. The mechanical energy is converted into heat and dissipated by the water.<sup>[4]</sup>

Figure 3 shows a ship engine test stand at Weichai Power (China) with a hydraulic dynamometer on the left and the DUT on the right side. The hydraulic dynamometer type



Figure 3 Engine test stand with hydraulic dynamometer and ship engine (Weichai Power, China)<sup>[5]</sup>

DT2-12600-2 has a rated torque of 150,000 Nm, a rated power of 12,600 kW and a maximum speed of 2,500 rpm. To give the reader a sense of the size of the test stand shown in Figure 3, the weight of the hydraulic dynamometer only is approx. 8,500 kg. The load unit uses a load cell for torque measuring and a pulse generator with 60-teeth wheel for speed measuring.

Diverse standard sizes and two designs (one or two rotors/directions of rotation) of the DT-series can cover a wide range of combustion engines. The product range starts with the DT400-1 that provides absorbing power of 400 kW and a torque of 1,300 Nm. A maximum torque of 180,000 Nm along with 9,800 kW can be reached with the DT9800-1 which is on top of the standard product portfolio.

The key advantages of the DT series are the compact design with a high power density and the excellent price/performance ratio compared with other dynamometers types. They can reach a maximum performance level at extremely low maintenance costs because of the robust design and the use of high-quality materials. The sturdy design enables reliable operation even under suboptimal cooling water conditions. The self-monitoring function for bearing and cooling water temperature reduces the risk of unexpected downtime.

The main application field of test benches with hydraulic dynos are production tests of large internal combustion engines. But they can also be used for endurance tests as well as test benches for simple research and development tasks. All these applications are stationary tests with constant load/speed working points and typical torque response times of minimum 1 second for changes between two load points.

### Engine Test Stand with Tandem Dynamometer

A tandem dynamometer is a combination of two load units. In most of the cases an asynchronous machine (active

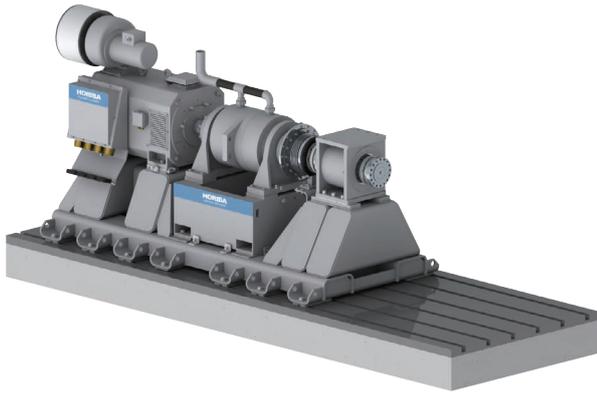


Figure 4 Tandem dynamometer (AC machine and hydraulic dynamometer)

loading unit) and a hydraulic dynamometer (passive loading unit) are combined. This kind of tandem systems are the right choice for large engines if a hydraulic dynamometer is not suitable because of its passive operation as well as non-dynamic behavior. Or a high-power electric machine cannot be installed due to cost reasons or limitations of mains supply. They are preferred in case of braking power above 800 kW combined with low motoring power demands.

Figure 4 shows as example the tandem configuration of the asynchronous load unit Dynas3 HT 350 and the hydraulic dynamometer DT1200-1. The AC machine (left), the hydraulic dynamometer (middle) and the intermediate bearing (right) are mechanically connected with two drive shafts and mounted on one common base frame. Between the middle dyno and the intermediate bearing is a torque measuring flange for highest measuring accuracy close to the specimen. The interface to the DUT is the flange connection on the right side of the bearing support. The engine (not illustrated) can be placed on the available space on the base plate.

The performance data of the tandem system are presented in Figure 5 and Figure 6. The complete system has a rated power of 1,550 kW (absorbing) from 3,400 rpm up to the maximum speed of 5,500 rpm (green line in Figure 5). The maximum absorbing power is a sum of the AC dynamometer (350 kW) and the hydraulic dynamometer (1,200 kW). The maximum driving power of 279 kW at 3,200 rpm is only provided by the AC machine (orange line).

The peak torque in absorbing operation of 8,505 Nm is available in a small speed range between 1,000 and 1,400 rpm (blue line in Figure 6). The maximum torque is as well a sum of the rated torques of the Dynas3 (1,005 Nm) and the DT dynamometer (7,500 Nm). The maximum driving torque of 999 Nm is provided at low speeds close to zero (yellow line).

Tandem dynamometers as shown above are mainly used

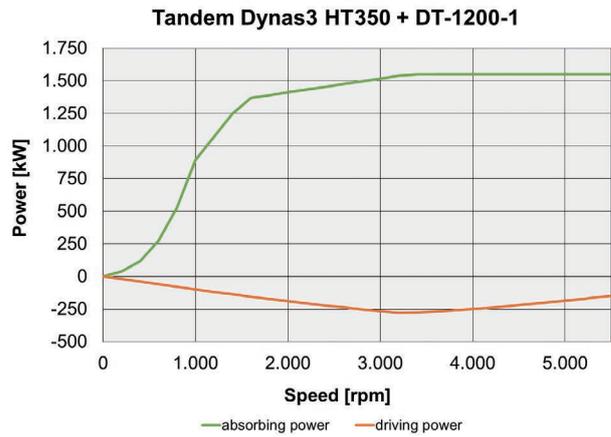


Figure 5 Power-speed diagram tandem dynamometer

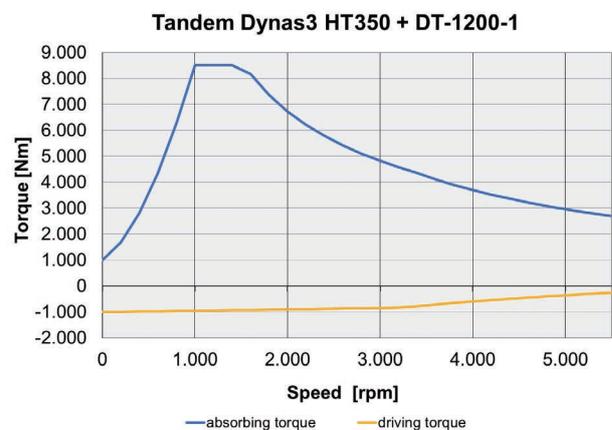


Figure 6 Torque-speed diagram tandem dynamometer

for stationary, for transient, and - with certain limitations - for dynamic engine testing of heavy-duty diesel engines. In steady-state working points, the full braking power of the hydraulic dyno is used and the AC machine runs in idle mode. In this case, the AC machine acts as an enhancement that can respond quickly when needed and provide full power for dynamic reactions.

Tandems cover a wide range of specimens with high power and torque demands. Due to their flexibility they are perfect for quality control and development test stands. They have the best price-performance ratio for absorbing power above 800 kW when low motoring power is needed (20% is in most of the cases enough). It is possible to combine all types of the proven HORIBA dynos. The maximum available tandem configuration from the HORIBA standard portfolio are the DT2100 (2,100 kW and 15,000 Nm) and HD1000 (1,025 kW and 5,000 Nm) for a total of 3,125 kW and 20,000 Nm.

### NVH<sup>3</sup> Dynamometer for Testing of Outboard Engines

NVH is both an attribute and a nuisance in road vehicles. NVH characteristics are carefully engineered to meet the

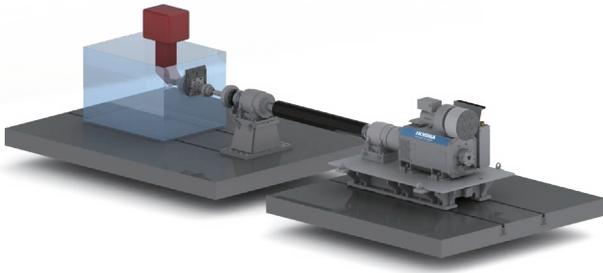


Figure 7 NVH test stand for outboard engines

design objectives of the developer to meet vehicle specific marketing objectives. But also for vessels there can be various reasons for influencing the noise level and characteristics of the engine. Like sports cars, speedboats should have a sporty sound characteristic. Noise topics for large ships have different interests such as protection of passengers and environment. Therefore, noise investigations are getting more and more important for marine applications. The measurement tasks of an NVH test stand have a major influence on the selection of test bench components and require a special test bench design. With audible noise measuring instruments, only the direct emissions from the DUT should be acquired without confounding indirect emissions like reflected noise within the test cell. Reflections must be reduced or dampened as good as possible by absorbing walls with special geometries. In addition, disturbances by the testing equipment (loading unit etc.) or external sources need to be avoided. Therefore, the test cell is vibration-decoupled from the building and the load unit is separated from the NVH test cell or enclosed with special housings.<sup>[6]</sup>

Figure 7 shows the layout of a NVH test cell for outboard engines of small boats that was realized for a Japanese customer by HORIBA. The two independent baseplates represent an installation in different rooms with separation by a wall (not illustrated). The left part is the NVH test cell that contains a water basin with the outboard engine (red) inside. Beside the water basin is a bearing support that is connected to the propeller shaft of the outboard engine. On the right side - outside of the test cell - are the dynamometer and a second bearing support mounted on a base frame. The load unit is an AC dynamometer type Dynas3 HT 460 that provides a rated torque of 1,484 Nm and rated power of 460 kW. The system can be used for dynamic tests due to the max. speed gradient of the AC machine of nearly 10,000 rpm/s. All components of the system are specially designed for the torque of 1,500 Nm and maximum speed of 8,000 rpm.

For noise reduction optimization, the dynamometer is equipped with a speed controlled fan. The wall penetration between the dynamometer room and the test cell is realized with a 1,500 mm long black carbon (CFRP<sup>\*4</sup>) shaft

that connects both intermediate bearings in the dynamometer driveline. In addition the wall opening is acoustically sealed. The carbon shaft as well as the bearing support are covered with sound absorber on the specimen side.

Two most important parts of the design phase are mode shape frequency analyses of the main components and shaft torsional resonance calculations of all driving shafts between the dynamometer and the outboard engine. The frequency analysis is carried out for the full speed range of dynamometer. For the shaft torsional resonance calculation, the main components; namely, dynamometer, drive shafts and combustion engine need to be included. In the case of the engine, the engine type plays a significant role, as a excitation source, and is considered with its key characteristics in the calculation (number of cylinders, strokes, displacement, inertia, etc.). The multi-mass-model for torsional vibration analysis is created based on the schematic structure of the shaft connections with inertial mass allocations and torsional stiffnesses. Results are the resonance frequencies [Hz], critical speeds [rpm] and max operation speed [rpm] that influence the overall system design.

\*3: NVH: Noise Vibration Harshness

\*4: CFRP: Carbon Fiber Reinforced Polymer

## Conclusion

Beside the automotive business HORIBA has a strong footprint in marine engine testing and can provide a wide range of dynamometer concepts for different applications. The standardized TITAN test stand can be adopted with AC machines for testing of engines between 20 and nearly 1,000 kW. Hydraulic dynos are the preferred solution for stationary tests of engines with power higher than 500 kW due to their cost advantage (purchase cost and total cost of ownership). The standard portfolio of DT dynos reaches depending on the DT version up to 12,600 kW power or 180,000 Nm torque. Tandem dynamometer systems can be the right solution for requirements of braking power above 800 kW in combination with low motoring power. The maximum available tandem configuration can provide 3,125 kW absorbing power and 20,000 Nm of torque. In addition to the standard test stand components and systems, there is a demand for customized testing solutions. The example of the NVH test stand for outboard engines shows the complexity in the design of such a special testing solution.

\* This content is based on our investigation at this publish unless otherwise stated.

## References

- [ 1 ] IMO (International Maritime Organization)
- [ 2 ] United Nations Conference on trade and Development, Review of Maritime Transport 2018
- [ 3 ] Mess- und Prüfstands Technik; M. Paulweber, K. Lebert; Springer Vieweg; 2014
- [ 4 ] HORIBA Solutions for Engine Testing - Product Catalogue
- [ 5 ] Picture was kindly provided by WEICHAJ POWER (China)
- [ 6 ] Messtechnik und Prüfstände für Verbrennungsmotoren; Messungen am Motor, Abgasanalytik, Prüfstände und Medienversorgung; K. Borgtest; Springer Vieweg; 2016



トーステン ボツジュ

Torsten BODSCH

Global Product Manager Engine  
HORIBA Europe GmbH

# Product Introduction

製品紹介

## 油分抽出溶媒H-519

Oil Extraction Solvent H-519

### 山本 麻由佳

Mayuka YAMAMOTO

油分濃度計OCMAシリーズは溶媒抽出法を採用しており、日本国内では油分抽出溶媒としてH-997を使用してきた。しかしH-997はモントリオール議定書の規制物質として2020年以降の生産が禁止されているため、H-997に代わり、油分抽出溶媒H-519を新たに開発した。H-519は各種規制に非該当で揮発性が低く、再生して繰り返し使用が可能な取扱いやすい溶媒である。H-997と測定値が異なるが、相関確認を行うことで従来通り使用することができる。本稿ではH-997の代わりとなるH-519の特徴を紹介し、H-997との違いや溶媒切り替えの際の注意点について示す。

Oil content analyzer (OCMA series) uses solvent extraction method. The oil extraction solvent H-997 has been used in Japan. However H-997 is going to be prohibited to produce from 2020 due to the Montreal Protocol. An oil extraction solvent H-519 was newly developed instead of H-997. H-519 has low volatility and is easy to handle. The measurement value of H-519 and H-997 are different, but shows consistent correlation. Therefore, H-997 can be replaced to H-519 by compensating the correlation analysis. In this article, the features of H-519, differences from H-997 and tips of solvent switching are introduced.

#### キーワード

油分濃度 赤外吸収 残留油分 油分抽出溶媒

Oil concentration Infrared absorption Residual oil Oil extraction solvent

### はじめに

油は日常生活および産業分野で広く用いられている。油は生分解性が悪い場合が多く、適切な利用と廃棄を行わなければ、環境汚染を引き起こす原因にもなりうる。したがって、油を有効利用するためには計測・管理することが必要であり、定量的に測定する装置や手法は古くから存在している。

HORIBAグループでは油分濃度を簡便に測定できる油分濃度計OCMAシリーズをラインナップしている。溶媒抽出法を採用しており、抽出溶媒は環境規制の変化に伴い四塩化炭素から、より環境に優しいCFC (Chlorofluorocarbon) やHCFC (HydroChlorofluorocarbon) といったフッ素系溶媒に変化してきた。しかし、オゾン層破壊と地球温暖化の進行に伴って世界的に化学物質の規制がさらに強化されており、一部のフッ素系溶媒もその対象

となってきた。OCMA-505, 555で従来使用されてきた油分抽出溶媒H-997(HCFC)もモントリオール議定書(日本ではオゾン層保護法)の規制物質(**Table 1**)として2020年以降の生産が禁止されている<sup>[1]</sup>。

HORIBAグループでは長年にわたってH-997の代わりとなる油分抽出溶媒を調査・研究してきた。その結果、オゾン層破壊物質の規制に該当しない油分抽出溶媒H-519を新たに発売するに至った(**Figure 1**)。本稿ではH-997の代わりとなるH-519の特徴とH-997との互換性について紹介する。

Table 1 Controlled substances of the Montreal Protocol (Annex C)

Group	Substance	Number of isomers	Ozone-Depleting Potential
<i>Group I</i>			
CF <sub>3</sub> CF <sub>2</sub> CHCl <sub>2</sub>	(HCFC-225ca)**	—	0.025
CF <sub>2</sub> ClCF <sub>2</sub> CHClF	(HCFC-225cb)**	—	0.033



Figure 1 Oil extraction solvent H-519

## 油分濃度計OCMAシリーズ

OCMAシリーズでの油分濃度測定は溶媒抽出-非分散赤外吸収法を用いている。油分は $3.4\sim 3.5\ \mu\text{m}$  ( $2941\sim 2857\ \text{cm}^{-1}$ )の炭素-水素伸縮振動に帰属する吸収を活用し、ランベルトベールの法則により定量される。したがって、抽出溶媒はこの波長域に吸収を持たないことが理想である。H-519は分子構造に炭素-水素結合(C-H結合)がなく、 $3.4\sim 3.5\ \mu\text{m}$ に吸収を持たないため、OCMAシリーズでの油分濃度測定に適している。

非分散赤外吸収法は油分の分子構造の最小単位に近いC-H結合を検出する。したがって、飽和・不飽和結合を持つ油や、芳香族系の油も測定できるという利点がある<sup>[2]</sup>。一方、UVや蛍光を用いた方法は、分子構造内に不飽和結合を持つ油分しか検出できない。また、非分散赤外吸収法は重量法(ノルマルヘキサン抽出法)では検出できない揮発性の高い油分も検出できる。重量法は日本工業規格(JIS)に記載されているが、揮発性の高い油分は溶媒乾固の際に蒸発してしまい検出できない<sup>[3][4]</sup>。

日本国内のOCMAシリーズをTable 2に示す。油分抽出溶媒の変更に伴ってOCMA-505, 555に代わるOCMA-505-H, 555-H(H-519仕様)が発売されている。また、付属の校正油がOCB標準物質(オクタン, セタン, ベンゼンの混合物)からトリデカンに変更されている。OCB標準物質にはPRTR法(化学物質排出移動量届出制度)や特定化学物質に規定されてい

るベンゼンが含まれていたが、トリデカンはそれらに該当しないより安全性の高い物質である。

## 油分抽出溶媒H-519

### 概要と特徴

Table 3にH-997とH-519の比較を示す。H-997とH-519は主成分が異なり、H-997はジクロロペンタフルオロプロパン、H-519はクロロトリフルオロエチレンの3量体を主成分としている。主成分の違いに伴って主に沸点、粘度、油分溶解力、安全性が異なっている。特にH-519はH-997と比較して、油分溶解力の指標であるKB値が31から25に低下する欠点はあるが、各種規制に非該当、揮発性が低いという特長がある。H-997はPRTR法やモンリオール議定書の規制に該当しているが、H-519は各種規制に非該当であり、法規制の上で取扱いやすい物質となっている。

H-519はH-997と比較して沸点が高く、蒸気圧(25℃)が低いことから揮発性も低い。そのため、油分測定の抽出工程に

Table 2 Lineup of OCMA series

	OCMA-505-H	OCMA-555-H
Appearance		
Feature	Automatic extraction function	Suitable for residual oil measurement
Solvent	H-519	
Sales area	Japan, China and Thailand	

Table 3 Comparison of specification of H-997 and H-519

	H-997	H-519
Main component	Dichloropentafluoropropane	Chlorotrifluoroethylene (Trimer)
CAS No.	507-55-1 42-56-0	9002-83-9
Boiling point (°C)	54	> 135
Vapor pressure (kPa) @25°C	38	1.2
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.6	1.8
Viscosity (mPa · S) @25°C	0.6	4.3
KB value <sup>*1</sup>	31	25
GHS <sup>*2</sup>		—
Montreal Protocol	Listed	Not listed
PRTR	Listed	Not listed

\*1: カウリブタノール値

試料の油脂飽和力を示す指標で、数値が大きいくほどその試料は多くの油脂を溶解できる

\*2: Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals



Figure 2 Solvent reclaimer

おける溶媒の揮発も起こりにくい。したがって、抽出工程での溶媒揮発による測定誤差は、H-997よりH-519の方が起こりにくい。さらに、H-519の揮発性の低さは溶媒の再生効率も向上させている。H-997とH-519の沸点違いにより、H-519では再生後の溶媒の回収率が約90%（H-997では約60%）に向上している。使用済み油分抽出溶媒を再生するための溶媒再生器をFigure 2に示す。溶媒再生器は活性炭と活性アルミナの2重構造になっている。活性炭では油分を、活性アルミナでは脱水と極性物質の除去を行っている。

### H-997とH-519での測定値の相違

H-997とH-519では油分抽出溶媒としての抽出効率が異なることから、OCMAでの測定値も異なる値となる。抽出効率は、「抽出効率(%) = 測定値(mg/L) / 実濃度(mg/L) × 100」で計算される。Figure 3は100 mg/Lの各種油水をOCMA-505 (H-997仕様)とOCMA-505-H (H-519仕様)で測定し、H-997を用いて得られた測定値を100%としたときの結果である。全ての油種においてH-519を用いて得られた測定値のほうが20%～40%程度低い値となっている。この抽出効率の違いは、主に両溶媒のKB値の違いによるもの

と推察される。また、油種ごとの抽出効率の差は、両溶媒と油分の親和性に起因していると推察している。

Figure 4に機械油とトリオレインのIRスペクトルを示す。トリオレインは分子構造内に親水性のカルボニル基(C=O)を有している。これらに含まれる水素分子がH-997の水素分子とC-H...O相互作用により水素結合することで親和性が高まり、C-Hを持たないH-519よりもH-997で抽出効率は上がると予想される。一方、親水基をほとんど有しない機械油は、H-997との間で水素結合を生成しにくいと予想される。そのため、機械油はトリオレインと比較して、両溶媒の抽出効率の差が小さい。以上の結果から、両溶媒と油分の親和性により、抽出効率は異なってくると推察できる。

Figure 5は金属部品の残留油分測定におけるH-997とH-519の測定値である。部品などの残留油分測定においては、H-997よりH-519が約5%低い抽出効率となったが、水中からの抽出効率ほどの差は見られなかった。しかしH-519のほうがH-997よりも油分溶解力が低い(KB値が小さい)ことや、粘度が高く部品の細部に浸透しにくいことから、H-519を用いて抽出する際は、超音波や振とう抽出を併用し、油分と溶媒の接触頻度を上げることが必要である。

### H-519へ切替えるための相関確認

上記に述べたように、H-997とH-519では測定値が異なる。したがって、H-997からH-519に切り替える際には、両溶媒を用いた測定値の間で相関データを取得する必要がある。ほとんどの場合は、両者の間に一次関数で表される相関が得られるはずである。その結果、溶媒を変更しても、これまでと同様の管理・運用が可能である。

相関確認は、同一サンプルをH-997とH-519を用いて測定し、H-997での測定値をX軸に、H-519での測定値をY軸に

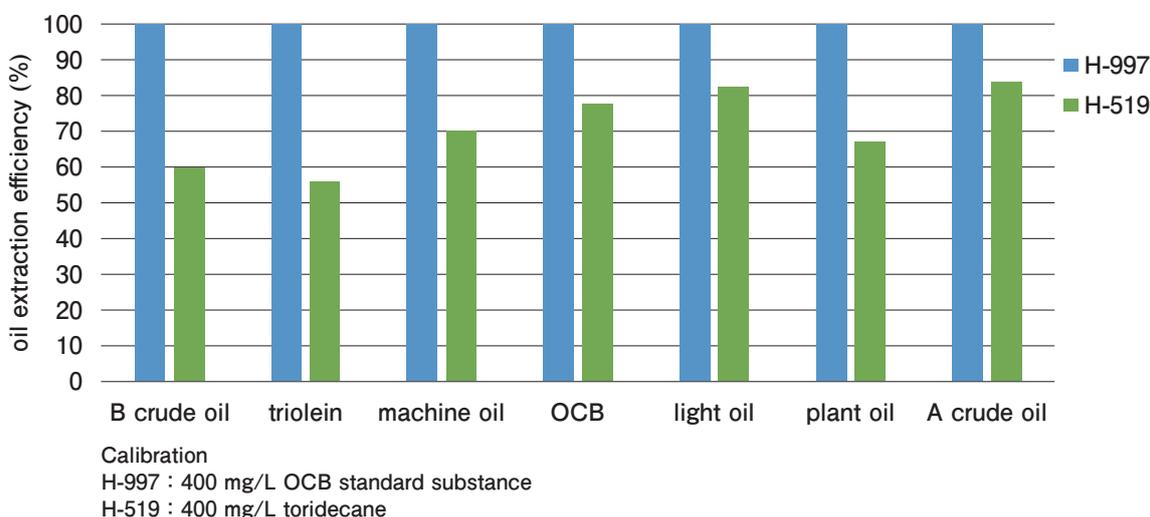


Figure 3 Measurement results of 100 mg/L oil in water using H-997 and H-519(HCl was added as a acidification reagent)

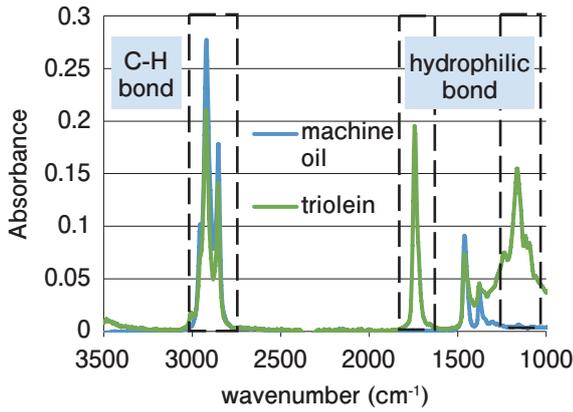


Figure 4 IR Spectrum of machine oil and triolein

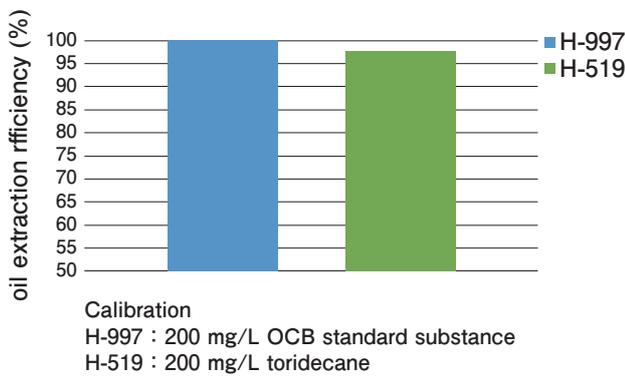


Figure 5 Measurement results of metal parts using H-997 and H-519

設定して近似直線を作成することで行うことができる。例をFigure 6に示す。Figure 6の場合、 $y = 0.96x + 0.03$ より、H-997で得られた測定値を0.96倍することでH-519での測定値を求めることができる。この結果を規格値に反映する方法は、①相関確認によって得られた係数を用いて規格値を変更②濃度補正機能を用いてH-519での測定値を既存の規格値に合わせこむ、の2通りがある。濃度補正機能とはOCMA-505-H、555-Hから新たに追加された機能で、上記の例の場合、 $1.1(1/0.96)$ をOCMAの測定設定に入力することで、H-519で得られた測定値をH-997で定められた規格値に合わせこむことができる。

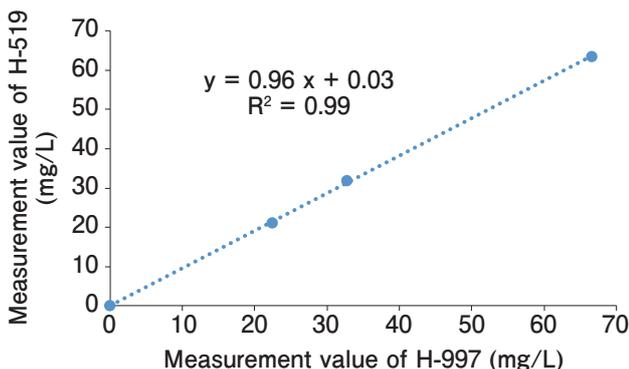


Figure 6 Correlation of measurement value between H-997 and H-519

## おわりに

本稿で紹介した油分抽出溶媒H-519は、各種規制に非該当で揮発性も低いため、環境にやさしい溶媒である。この揮発性の低さから、従来のH-997よりも安定した抽出操作が可能となり、OCMAでの油分濃度測定のアプリケーションの種類も広がると思われる。H-519を使用した油分濃度測定のアプリケーションを展開していくことで、少しでも地球環境保全の一端に寄与にできれば幸いである。

\* 本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

## 参考文献

- [1] United Nations Environment Programme, Handbook for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, Tenth edition, 24(2016)
- [2] 高坂亮太 西尾友志, *Readout*, 43, 43(2014)
- [3] 日本工業規格, JIS K0102 工場排水試験方法
- [4] 西尾友志 高坂亮太, *Readout*, 42, 120(2014)



### 山本 麻由佳

Mayuka YAMAMOTO

株式会社 堀場アドバンスドテクノ  
グローバル開発部

Global Research & Development Department  
HORIBA Advanced Techno, Co., Ltd.

### 平成30年度近畿地方発明表彰

Kinki Region Invention Awards 2018

#### 近畿経済産業局長賞

#### 粒子状物質捕集測定用フィルタ(特許第4387164号)

##### 表彰の概要

本発明表彰は、近畿地方における発明の奨励・育成を図り、科学技術の向上と地域産業の振興に寄与することを目的としており、近畿地方において優秀な発明、考案、又は意匠(以下「発明等」という。)を完成された方々、発明等の実施化に尽力された方々、発明等の指導、奨励、育成に貢献された方々の功績を称え顕彰するものである。HORIBAからは特許第4387164号(粒子状物質捕集測定用フィルタ)が近畿経済産業局長賞を受賞した。

##### 表彰案件の概要

本発明は、大気中の浮遊粒子状物質の他、種々の排ガス等に含まれる粒子状物質を捕集し、捕集した粒子状物質の質量濃度を測定するための粒子状物質捕集濃度測定用フィルタ及びこれを用いた粒子状物質サンプラーに関する発明考案である。

##### 従来発明等の課題

PM捕集用フィルタの材質として、ガラス繊維フィルタやフッ素樹脂(PTFE)が一般的に使用されている。しかし、ガラス繊維フィルタの場合、フィルタ自身の厚み及び含有する有機物の水分吸収により $\beta$ 線の吸収が生じ、PM濃度の測定結果に誤差が生じる。一方でPTFEフィルタの場合は、ガラス繊維フィルタと比較すると吸湿性は低く、化学安定性に優れるが、帯電性が高いためにPMが飛散して正しく捕集されにくいことがある。加えて強度が弱いため、試料ガスを通す際にフィルタ自体がたわみ、計測誤差に繋がり得るという問題があった。

##### 本発明等の特徴

PM捕集用フィルタを多孔質層(PTFE)と補強層(不織布)の2層構造にすることで、PTFEが持つ低吸湿性と不織布が持つ強度を兼ね備えたフィルタを発明した(Figure 3)。本発明に関するフィルタは、PTFEフィルタと比較して極めて帯電性が低く、初期の帯電圧が約1/3、半減期が約1/10となっている(Table 1)。これは、Figure 4の電子顕微鏡写真に示した不織布から構成される通気性補強層の凹凸がフィルタの比表面積の広がりを作り、帯電荷電を空气中に多く放電することで、静電気の発生を低減するからだと考えられる。また、低吸湿性の



Figure 1 平成30(2018)年度近畿地方発明表彰表彰式の様子



Figure 2 PM2.5 濃度測定及び成分分析装置(PX-375)



Figure 3 本発明の特徴部分であるフィルタ構造

Table 1 帯電性試験

フィルタ (n=3)	初期値 (kV)	半減期 (sec)
PTFE	0.72	1140
PTFE+不織布	0.27	162

初期値  
約1/3  
半減期  
約1/10

Table 2 吸湿性試験

フィルタ (n=5)	吸湿率 (%)	標準偏差 (2σ)
PTFE	0.19	0.011
PTFE+不織布	0.01	0.008

吸湿率  
約1/20

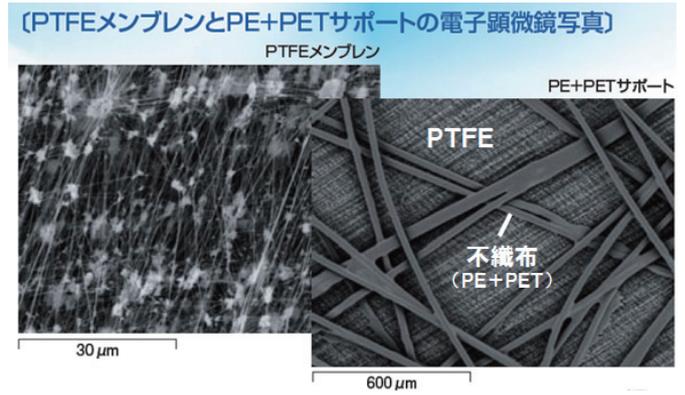


Figure 4 フィルタの電子顕微鏡写真

PTFEフィルタと比べても、さらに約1/20吸湿率が低いフィルタとなっており (Table 2)、これは、通気性補強層の空隙には表面張力等による水分が溜まりにくいからだと考えられる。さらに、補強層で強度を確保しつつ、フィルタを薄くできたことにより、本フィルタを用いたサンプラーを搭載したPM濃度測定装置は、従来のガラス繊維フィルタを用いる場合と比べて最小検出感度を約4倍に向上することができた。

【登録番号】

特許第4387164号

【発明者】

篠原政良

その他受賞案件

受賞名	特許番号	発明の名称	発明者氏名
発明奨励賞	特許第6063582号	元素分析装置におけるダスト排出機構	井上貴仁, 平田泰士, 黒住拓司
発明奨励賞	特許第4088062号	液体材料供給装置の配管パージ方法	家城孝之, 長野忠幸, 南新吾
発明奨励賞	特許第4943293号	衝撃吸収機能を有する浸漬型水質分析装置	辻岡唯二, 小椋克昭



Figure 5 平成30年度近畿地方発明表彰 HORIBA受賞者

# HORIBA World-Wide Network

## JAPAN

### HORIBA, Ltd.

2, Miyanohigashi, Kisshoin, Minami-ku, Kyoto, 601-8510, Japan  
Phone : (81)75-313-8121 Fax : (81)75-321-8312  
**Biwako Factory**

1-15-1, Noka, Otsu, Shiga, 520-0102, Japan  
Phone : (81) 77-548-6130 Fax : (81) 77-548-6193

### HORIBA Advanced Techno Co., Ltd.

31, Miyanonishi Kisshoin, Minami-ku, Kyoto, 601-8306, Japan  
Phone : (81)75-321-7184 Fax : (81)75-321-7291

### HORIBA STEC, Co., Ltd.

11-5, Hokodate-cho, Kamitoba, Minami-ku, Kyoto, 601-8116, Japan  
Phone : (81)75-693-2300 Fax : (81)75-693-2350

#### Aso Factory

Torikokogyodanchi, 358-11, Koumaibata, Toriko, Nishihara-mura, Aso-gun, Kumamoto, 861-2401, Japan  
Phone : (81)96-279-2921 Fax : (81)96-279-3364

#### Fukuchiyama Technology Center

11-1 Miwa-cho Miwa, Fukuchiyama, Kyoto, 620-1445, Japan  
Phone : (81) 773-59-2070 Fax : (81) 773-59-2074

### HORIBA TECHNO SERVICE Co., Ltd.

2, Miyanohigashi, Kisshoin, Minami-ku, Kyoto, 601-8305, Japan  
Phone : (81)75-313-8125 Fax : (81)75-321-5647

## BRAZIL

### HORIBA Brasil Holding, Eireli

#### HORIBA Instruments Brasil, Ltda.

Rua Presbitero Plinio Alves de Souza, 645, Loteamento Multivias, Jardim Ermidia II - Jundiá, São Paulo - CEP 13.212-181 Brazil  
Phone : (55)11-2923-5400 Fax : (55)11-2923-5490

#### TCA/HORIBA Sistemas de Testes Automotivos Ltda.

Rua Goiás 191 Vila Oriental, Diadema, São Paulo, CEP : 09941-690 Brazil  
Phone : (55)11-4224-0200 Fax : (55)11-4227-3133

## CANADA

### HORIBA Canada, Inc.

Unit102, 5555 North Service Road Burlington, Ontario, L7L 5H7 Canada  
Phone : (1)905-335-0234 Fax : (1)905-331-2362

#### London Office

347 Consortium Court, London, Ontario, N6E 2S8 Canada  
Phone : (1)519-668-6920 Fax : (1)519-668-8437

## U.S.A.

### HORIBA United States Holding, LLC

#### HORIBA Americas Holding Incorporated

#### HORIBA Instruments Incorporated

9755 Research Drive, Irvine, CA 92618, U.S.A.  
Phone : (1)949-250-4811 Fax : (1)949-250-0924

#### Albany Field Office

Suite 104, 58 Clifton Country Road, Clifton Park, NY 12065, U.S.A.  
Phone : (1)-518-280-3675

#### Ann Arbor Office

5900 Hines Drive, Ann Arbor, MI 48108, U.S.A.  
Phone : (1)734-213-6555 Fax : (1)734-213-6525

#### Austin Office

9701 Dessau Road, Suite 605, Austin, TX 78754, U.S.A.  
Phone : (1)512-836-9560 Fax : (1)512-836-8054

#### Chicago, IL Field Office

554 Anderson Drive, Unit A Romeoville, IL 60446, U.S.A.  
Phone : (1)815-372-9076

#### El Monte Field Office

9420 Telstar Ave, Suite 103 El Monte, CA 91731, U.S.A.  
Phone : (1)626-542-3005

#### Houston Office

5390 Bay Oaks Drive, Pasadena, TX 77505, U.S.A.  
Phone : (1)281-482-4334 Fax : (1)281-674-6058

#### Novato Field Office

1359 Bel Marin Keys Blvd, #20, Novato, CA 94949, U.S.A.

#### HORIBA New Jersey Optical Spectroscopy Center

20 Knightsbridge Rd, Piscataway, NJ 08854, U.S.A.  
Phone : (1)732-494-8660 Fax : (1)732-549-5125

#### Portland Office

7007 S.W. Cardinal Lane, Suite 185, Portland, OR 97224, U.S.A.  
Phone : (1)503-624-9767 Fax : (1)503-968-3236

#### HORIBA Reno Technology Center

3740 Barron way Reno, Nevada 89511, U.S.A.  
Phone : (1)775-358-2332 Fax : (1)775-358-0434

#### Sunnyvale Office

430 Indio Way, Sunnyvale, CA 94085, U.S.A.  
Phone : (1)408-730-4772 Fax : (1)408-730-8975

#### Tampa Field Office

400 North Ashley Drive, Suite 2600, Tampa, FL 33602, U.S.A.

#### Troy Office

2890 John R Road, Troy, MI 48083, U.S.A.  
Phone : (1)248-689-9000 Fax : (1)248-689-8578

#### Atlanta Field Office

5871 Glenridge Drive, Suite 475, Atlanta, GA, U.S.A.

#### Beltsville Field Office

6800 Virginia Manor Rd., Beltsville, MD 20705, U.S.A.

## MIRA North America Inc.

1400 North Woodward Avenue, Suites 250, Bloomfield Hills, MI 48304, U.S.A.

## MANTA Instruments, Inc.

7770 Regents Rd#113-573 San Diego, CA, USA

## AUSTRIA

### HORIBA (Austria) GmbH

Kaplanstrass 5, A-3430 Tulln, Austria  
Phone : (43)2272-65225 Fax : (43)2272-65225-45

## BELGIUM

### HORIBA Europe GmbH

#### Antwerp Branch

Duwijkstraat 17, 2500 Lier, Belgium  
Phone : (32)3-281-57-92 Fax : (32)3-230-06-95

## CZECH REPUBLIC

### HORIBA Czech

#### Prague Office

Prumyslova 1306/7, CZ-10200, Praha 10, Czech Republic  
Phone : (420)246-039-265

#### Olomouc Factory

Zeleznicni 512/7, 772 00 Olomouc, Czech Republic  
Phone : (420)588-118-365 Fax : (420)585-310-725

## FRANCE

### HORIBA Europe Holding SASU

Avenue de la Vauve - Passage Jobin Yvon - CS 45002 - 91120 Palaiseau, France

### HORIBA FRANCE SAS

16-18, rue du Canal, 91165 Longjumeau Cedex, France

Phone : (33)1-69-74-72-00 Fax : (33)1-69-09-07-21  
**HORIBA Europe Research Center**

Avenue de la Vauve - Passage Jobin Yvon CS 45002 - 91120 Palaiseau, France

Phone : (33)1-69-74-72-00 Fax : (33)1-69-31-32-20  
**Villeneuve d'Ascq Office**

231 rue de Lille, 59650 Villeneuve d'Ascq, France

Phone : (33)3-20-59-18-00 Fax : (33)3-20-59-18-08

### HORIBA ABX SAS

Parc Euromédecine, rue du Caducée, BP7290, 34184 Montpellier Cedex 4, France

Phone : 33(0)4-67-14-15-16 Fax : 33(0)4-67-14-15-17

## GERMANY

### HORIBA Europe GmbH / Oberursel Office

Hans Mess Strasse 6, D-61440 Oberursel, Germany  
Phone : (49)6172-1396-0 Fax : (49)6172-1373-85

#### Darmstadt Office

Landwehr Strasse 55, D-64293, Darmstadt, Germany  
Phone : (49)6151-5000-0 Fax : (49)6151-5000-3865

#### Dresden Office

Hugo-Junckers-Ring 1, 01109 Dresden, Germany  
Phone : (49) 351-8896807 Fax : (49)-351-8896808

#### Hanover Office

Bayern Strasse 29, D-30855 Langenhagen, Germany  
Phone : (49)511-7410-95 Fax : (49)511-7410-53

#### Korschenbroich Office

Friedrich Ebert Strasse 9-11, D-41352 Korschenbroich, Germany  
Phone : (49)2161-47537-0

#### Leichlingen Office

Julius Kronenberg Strasse 9, D-42799 Leichlingen, Germany  
Phone : (49)2175-8978-0 Fax : (49)2175-897850

#### Munich Office

Schleißheimer strasse 253, D-80809 Munich, Germany  
Phone : (49)89-2444-779-0 Fax : (49)89-2444-779-10

#### Potsdam Office

Dennis Gabor Strasse 2, D-14469 Potsdam, Germany  
Phone : (49)3316-4900-70 Fax : (49)3316-4900-74

#### Stuttgart Office (Boeblingen)

Hans Klemm Strasse 56, D-71034 Boeblingen, Germany  
Phone : (49)7031-677-9440 Fax : (49)7031-677-9450

#### Stuttgart Office (Neuhausen)

Zabergaeustr. 3, D-73765 Neuhausen, Germany  
Phone : (49)7158-933-800 Fax : (49)7158-933-899

#### Wolfsburg Office

Klauskamp, Heinenkap II 38444 Wolfsburg, Germany  
Phone : (49)5361-38653-16 Fax : (49)5361-38653-24

## HORIBA Jobin Yvon GmbH

Neuhof strasse 9, D 64625, Bensheim, Germany  
Phone : (49)89-62-51-84-750 Fax : (49)89-62-51-84-7520

## HORIBA FuelCon GmbH

Steinfeldstraße 1, 39179 Barleben, Germany

## ITALY

### HORIBA ITALIA Srl

Via Luca Gaurico 209, 00143 Roma, Italy  
Phone : (39)6-51-59-22-1 Fax : (39)6-51-96-43-34

#### Milano Office

Via Cesare Pavese, 19 20090 Opera Milano, Italy  
Phone : (39)2-57-60-30-50 Fax : (39)2-57-30-08-76

#### Torino Office

Via Ferroggio, 30, 10151, Torino, Italy  
Phone : (39)11-904-0601 Fax : (39)11-900-0448

## HORIBA ABX SAS

#### Italy Branch

Viale Luca Gaurico 209/211, 00143 Roma, Italy  
Phone : (39)6-51-59-22-1 Fax : (39)6-51-96-43-34

## MAURITIUS

### MIRA Engineering Service Mauritius Ltd.

9th Floor, Orange Tower, Cybercity, Ebene, Mauritius

## NETHERLANDS

### HORIBA Europe GmbH

#### Netherlands Branch

Science Park Eindhoven, 5080 (Industrial park "Ekkersrijt") 5692 EA Son Netherlands  
Phone : (31)40-2900240 Fax : (31)40-2900624

## POLAND

### HORIBA ABX Sp. z o. o.

ul. Putawska 182 02-670 Warszawa, Poland  
Phone : (48)22-673-2022 Fax : (48)22-673-2026

## PORTUGAL

### HORIBA ABX SAS

#### Portugal Branch

Alfrapark Estrada de Alfragide n° 67, Edificio F - Piso 0 Sul, 2610-008 Amadora, Portugal  
Phone : (35)12-14-72-17-70 Fax : (35)12-14-72-17-89

## ROMANIA

### HORIBA (Austria) GmbH

#### Romania Branch

B-dul.Republicii, nr. 164, Etaj Parter, Birourile nr. 3 si 4, Pitesti, 110177, Judetul Arges, Romania  
Phone : (40)348-807117 Fax : (40)348-807118

## RUSSIA

### HORIBA OOO

Altufievskoe shosse, 13, building 5, 127106, Moscow, Russia

Phone : (7)495-221-87-71 Fax : (7)495-221-87-68

#### Zelenograd Office

Office 106, 2nd West st., 1, build 1, 124460, Zelenograd city, Moscow, Russia

Phone : (7)499-995-09-54

## SPAIN

### HORIBA MIRA SPAIN, S.L.

Calle Oficios, nave 22, 04620 Vera (Almeria), Spain  
Phone : (34)-950-39-11-53

## HORIBA ABX SAS

#### Spain Branch

Avenida Caidos de la Division Azul 16, 28016 Madrid, Spain  
Phone : (34)91-353-30-10 Fax : (34)91-353-30-11

## SWEDEN

### HORIBA Europe GmbH

#### Sweden Branch (Gothenburg)

Grimboasen 10 A, S-417 49 Gothenburg, Sweden  
Phone : (46)10-161 1500 Fax : (46)10-161 1503

#### Sweden Branch (Sodertalje)

Sydhamnsavagen 55-57, SE- 15138 Sodertalje, Sweden  
Phone : (46)8-550-80701 Fax : (46)8-550-80567

## TURKEY

### HORIBA Europe GmbH

#### Istanbul Office

Küçükbakkalköy Mah. Kayışdağı Cad., Flora Residence No:3/2504, 34750

Ataşehir/Istanbul, Turkey  
Phone : (90)216-572-1166 Fax : (90)216-572-1167

# HORIBA World-Wide Network

## U.K.

### HORIBA UK Limited

#### HORIBA UK Finance Limited

Kyoto Close, Moulton Park, Northampton, NN3 6FL, United Kingdom

Phone : 44(0)1604 542500 Fax : 44(0)1604 542699

#### HORIBA Jobin Yvon IBH Ltd.

133 Finnieston Street, Glasgow G3 8HB, United Kingdom

Phone : (44)141-229-67-89 Fax : (44)141-229-67-90

#### HORIBA Test Automation Ltd.

Brook Court, Whittington Hall, Worcester WR5 2RX, United Kingdom

Phone : (44)1905-359359 Fax : (44)1905-359332

#### HORIBA MIRA Limited

#### HORIBA MIRA Certification Limited

#### MIRA Int'l Limited

#### MIRA Land Limited

#### MIRA Service Limited

#### MIRA Technology Park Limited

Watling Street, Nuneaton, Warwickshire, CV10 0TU, United Kingdom

Phone : (44)24-7635-5000

#### HORIBA MIRA Limited

##### Quatro Park

Unit 1, Quatro Park, Paycocke Road, Basildon, Essex, SS14 3GH, United Kingdom

Phone : (44) 1268-290100

## CHINA

### HORIBA INSTRUMENTS (SHANGHAI) Co., Ltd.

No.200, Taitao Road, Anting Town, Jiading District, Shanghai, 201814, China

Phone : (86)21-6952-2835 Fax : (86)21-6952-2823

### HORIBA (China) Trading Co., Ltd.

Unit D, 1 Floor, Building A, Synnex International Park, 1068 West Tianshan Road, Shanghai, 200335, China

Phone : (86)21-6289-6060 Fax : (86)21-6289-5553

#### Beijing Branch

12F, Metropolis Tower, No. 2, Haidian Dong 3 street Beijing 100080, China

Phone : (86)10-8567-9966 Fax : (86)10-8567-9066

#### Guangzhou Branch

Room 1611/1612, Goldlion Digital Network Center, 138 Tiyu Road East, Guangzhou 510620, China

Phone : (86)20-3878-1883 Fax : (86)20-3878-1810

#### Shanghai Service Center

Room 303, No.84, Lane887, Zu-Chong-Zhi Road, Zhangjiang Hi-tech Park, Shanghai, 201203, China

Phone : (86)21-5131-7150 Fax : (86)21-5131-7660

#### Shanghai Technical Center

No.200, Taitao Road, Anting Town, Jiading District, Shanghai, 201814, China

Phone : (86)-21-6289-6060 Fax : (86)-21-6289-5553

### HORIBA Technology (Suzhou) CO.,LTD.

No.1 building, Industry park, No.101 Chenmenjing Rd, Taicang, Jiangsu, China (215400)

### Beijing HORIBA METRON Instruments Co., Ltd.

Chaoyang District, Bei Yuan Road 40, Beijing, 100012, China

Phone : (86)10-8492-9402 Fax : (86)10-8492-7216

### MIRA China Ltd.

Block B, Suite 501, Hongqiao Sunnyworld

No. 1226 South Shenbin Road

Shanghai, 201106, China

Phone : (86)21-6220-6377 Fax : (86)21-6220-6379

## INDIA

### HORIBA India Private Ltd.

246, Okhla Industrial Estate, Phase 3, New Delhi, 110020, India

Phone : (91)11-4646-5000 Fax : (91)11-4646-5020

#### Bangalore Office

No.55,12th Main, Behind BDA Complex, 6th sector, HSR Layout, Bangalore South, Bangalore-560102, India

Phone: (91) 80-4127-3637

#### Chennai Office

The ground floor New No. 41, Old No. 15/3, Velachery Road, Little Mount, Saidapet, Chennai - 600015, India

Phone : +(91)-44-42077899

#### Haridwar Factory

Plot No. 26, Sector-7, IIE, SIDCUL, Haridwar, Uttarakhand - 249403, India

Phone : (91)-1334-239139

#### Nagpur Factory

Plot No B-3 & C-32 Butibori Phase 2, Industrial Area, Dist Nagpur, Nagpur, 441122, India

#### Technical Center

D-225, Chakan MIDC Phase-II, Bhamboli Village, Pune-410501, India

Phone : (91)-02135-676000

## INDONESIA

### PT HORIBA Indonesia

JL. Jalur Sutera Blok 20A, No. 16-17, Kel. Kunciran, Kec. Pinang Tangerang 15144, Indonesia

Phone : (62)21-3044-8525 Fax : (62)21-3044-8521

## KOREA

### HORIBA KOREA Ltd.

202-525, 94-Gil, Iljik-Ro, Manan-Gu, Anyang-Si, Gyeonggi-Do, 13901, Korea

Phone : (82)-31-296-7911 Fax : (82)-31-296-7913

#### Ulsan Office

613, Doosan We've the Zenith, 1877, Sinjeong-Dong, Nam-Gu, Ulsan-Si, 44679, Korea

Phone : (82)52-275-0122 Fax : (82)52-276-0136

### HORIBA STEC KOREA, Ltd.

98, Digital valley-ro Suji-gu, Yongin-si Gyeonggi-do 16878, Korea

Phone : (82)-31-8025-6500 Fax : (82)-31-8025-6599

### HORIBA MIRA, Ltd.

#### Korea Branch Office

F5 HORIBA Korea Bldg. 25 Iljik-ro 94beon-gil,

Manan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do, 13901, Korea

Phone : (82)70-4689-0680 Fax : (82)31-296-7913

## PHILIPPINE

### HORIBA INSTRUMENTS (SINGAPORE) PTE LTD.,

#### MANILA Office

29/F Rufino Pacific Tower, 6784 Ayala Avenue corner

Rufino Street, Makati City 1226, Philippine

## SINGAPORE

### HORIBA Instruments (Singapore) Pte. Ltd.

3 Changi Business Park Vista #01-01 Akzonobel House, Singapore, 486051

Phone : (65)6-745-8300 Fax : (65)6-745-8155

#### West Office

83 Science Park Drive #02-02A, The Curie Singapore 118258

Phone : (65)6-908-9660

## TAIWAN

### HORIBA Taiwan, Inc.

8F.-8, No.38, Taiyuan St. Zhubei City, Hsinchu County 30265, Taiwan (R.O.C.)

Phone : (886)-3-5600606 Fax : (886)-3-5600550

#### Tainan Office

1 Floor, No.117, Chenggong Road, Shanhua, Township Tainan country 741, Taiwan (R.O.C.)

Phone : (886)6-583-4592 Fax : (886)6-583-2409

## THAILAND

### HORIBA Holding (Thailand) Limited

393 395 397 399 401 403 Lad Ya Road, SomdetChao-phraya, Klongsan District, Bangkok 10600, Thailand

Phone : (66)(0) 2 861 5995 Fax : (66)(0) 2 861 5200

### HORIBA (Thailand) Ltd.

393 395 397 399 401 403 Lad Ya Road, SomdetChao-phraya, Klongsan District, Bangkok 10600, Thailand

Phone : (66)(0) 2 861 5995 ext.123 Fax : (66)(0) 2 861 5200

#### East Office

850/7 Soi Lat Krabang 30/5, Lat Krabang Road, Lat Krabang, Bangkok 10520, Thailand

Phone : (66)(0) 2 734 4434 Fax : (66)(0) 2 734 4438

## VIETNAM

### HORIBA Vietnam Company Ltd.

Unit 6, 10 Floor, CMC Tower, Duy Tan Street, Dich Vong Hau Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

Phone : (84)-24-3795-8552 Fax : (84)-24-3795-8553

---

---

## Readout HORIBA Technical Reports June 2019 No.52

発行日 2019年6月28日  
発行人 青山 剛士  
発行元 株式会社 堀場製作所  
〒601-8510 京都市南区吉祥院宮の東町2番地

<http://www.horiba.com/jp/publications/readout/>



DTP・製版・印刷・製本

株式会社 写真化学

### <Readout編集委員会>

委員長	青山 剛士
副委員長	野村 聡
編集委員	上田 永人, 織田 香織
編集局	中田 靖, 坂本 淳一, 濱上 郁子

お問い合わせ先

株式会社 堀場製作所 開発本部 開発企画センター

Tel:075-313-8121 (代)

e-mail: [readout@horiba.co.jp](mailto:readout@horiba.co.jp)

# HORIBA

Explore the future



この印刷物は、EPAのシムルバー基準に適合し、  
地球環境改善のために製造した印刷方法にて作成されています。  
EPA：環境保護印刷推進協議会  
<http://www.e3pa.com>