

# 国際海事機関における SO<sub>x</sub> 規制の概略と スクラバ排水規制

高橋 千織\*, 益田 晶子\*

## IMO Regulations on Sulfur Oxides (SO<sub>x</sub>) Emissions and Washwater Discharge Criteria and Monitoring for Exhaust Gas Cleaning System

by

Chiori TAKAHASHI and Akiko MASUDA

### 1. まえがき

国際海事機関 (International Maritime Organization, IMO) における硫黄酸化物 (SO<sub>x</sub>) の規制は、燃料油中の硫黄分含有量を規制することを基本としている。2015年1月1日から排出規制海域 (Emission Control Area for SO<sub>x</sub>) として指定される海域 (以降、指定海域あるいはECAと表記) では、燃料油中の硫黄分濃度が0.1%を上限値として引き下げられた。実施から半年が過ぎ、指定海域内を航行する船舶がどのような対応を採っているのか動向が明らかになってきている。2020年以降に実施される予定の一般海域での硫黄分規制 (0.5%以下) では、低硫黄燃料の供給が十分行われるのか、またその燃料価格がどの程度になるか懸念されている。条件は異なるものの、指定海域内での動向を検討することは、今後の一般海域での規制強化に対してどのような選択肢があるのか参考になると考えられる。

そこで、本報告ではIMOのSO<sub>x</sub>規制の概略とその対策動向、および代替措置として認められている排ガス浄化システム (Exhaust Gas Cleaning System, EGCS) のガイドライン (以下、EGCSガイドラインという)<sup>1)</sup>、すなわちSO<sub>x</sub>スクラバの排水規制を中心に解説し、当所での実験結果の一部を紹介する。

### 2. SO<sub>x</sub> 規制の概略と ECA 内における対策動向

IMOにおけるSO<sub>x</sub>規制は、1997年に採択されたMARPOL73/78条約附属書VIの第14規則に定められており、図1に示すように段階的に強化されている。前述のように2015年1月1日より、指定海域 (2015年1月時点では、バルト海、北海、北米、カリブ海海域が指定) において、燃料油中の硫黄分濃度0.1%が上限値となった。一般海域については、現時点で3.5%が上限値として定められているが、2020年1月1日より0.5%となる予定である。ただし、この0.5%規制の実施時期については、燃料油の供給可能性等を調査し、その結果を受けて2025年に延長できることも規定されている。当初、この検討は2018年までに行われる予定であったが、2015年5月に

\* 環境・動力系

原稿受付 平成27年7月15日

審査日 平成27年8月18日

行われた第 68 回海洋環境保護委員会 (Marine Environment Protection Committee, MEPC68) において前倒しされる  
ことが決まり、近々審議が始まる予定である。延長の可能性が残されているものの、指定海域規制が始まった EU  
内では、2020 年に一般海域規制を実施することで合意しているため、2020 年以降には EU 加盟国の海岸 200 海里  
以内では、硫黄分濃度 0.5% の燃料を使用しなければならないことにも注意が必要である<sup>2)</sup>。

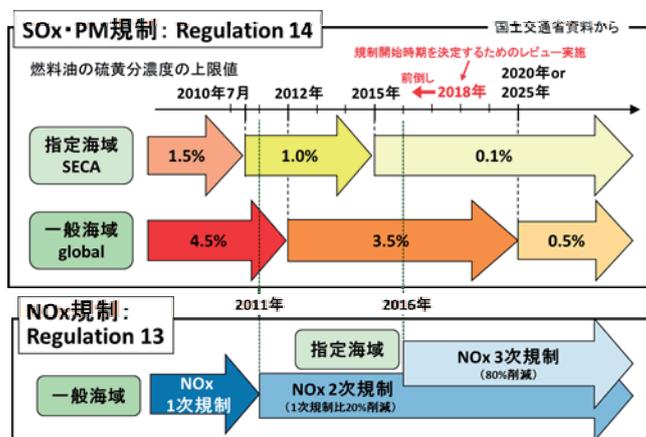


図1 IMOにおけるSOx, NOx規制

これらの燃料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油 (Heavy Fuel Oil, HFO) から、留出油 (Marine Gas Oil, MGO)、バイオ燃料 (エタノール、バイオディーゼルなど)、または天然ガス (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、既存のISO規格には適合しない超低硫黄燃料 (Ultra Low Sulfur Fuel Oil, ULSFO) もしくはECAコンプライアンス燃料と呼ばれるような燃料も供給され始めている (ECA域においていくつかの製品が提供されているが、性状は残渣分を含まないため、HFOより軽質でMGOよりは重質な燃料となっている)。これらの低硫黄燃料の選択には、価格と供給体制の整備が重要である。

一方、もう一つの選択肢として、従来のHFOを使用して船上で排ガス脱硫をおこなうSOxスクラバに関心が集まっている。SOxスクラバは、MARPOL73/78条約附属書VI第4規則で認められている同等措置であり、燃料油の硫黄分規制への対策技術としてだけでなく、将来的な粒子状物質 (Particulate Matter, PM) やブラックカーボン (BC) 排出の抑制、一部にはNOx規制等にも対応することが可能な手段として期待される。

これらの選択肢に対する船主の対応状況については、いくつかの調査が行われている。例えば、規制が先行するEU内で規制強化前に行われた調査には、2014年5月に公表されたLloyd's listの船主アンケート結果がある<sup>3)</sup>。これによれば、全体の約半数 (48%) が留出油への燃料転換を選択し、次にLNGへの燃料転換が22%、スクラバは3番目の選択肢 (17%) であった。アンケート対象とされた船主の詳細情報はわからないが、指定海域という限定的な領域のみでの規制であること、規制強化前であったこと、調査時点でのスクラバの搭載実績・運用に関する情報が十分でなかったことなどが、順位に影響したと考えられる。実際、2015年2月のShip & Bunkerで紹介されたMEC Intelligence社の調査結果をみると、SOx規制対策としてスクラバは2番目の選択肢となっている (1.留出油利用, 2.スクラバ, 3.LNG船の順)<sup>4)</sup>。この調査は、EU ECA内で活動する70社 (約5000隻) を対象に行ったものである。これによれば、スクラバの発注数は2014年4~9月の6ヶ月間で倍増し、その後の4ヶ月でも19%増となっていて、2015年1月には160基となっている (最新の調査では、全世界で300基に近いとされている<sup>5)</sup>)。

LNGとスクラバの採用実績が、指定海域規制の始まる前後 (Lloyd's listとMEC Intelligence社の調査結果) で異なった理由としては、いくつかの要因が考えられる。スクラバにプラスとなった要因としては、世界的な原油価格の下落にもかかわらず、HFOとMGOの価格差がトンあたり\$300程度で変わらなかったこと、現時点では既存船へのレトロフィット需要が大きいこと、初期投資の回収期間が比較的短く (運航条件に左右されるが、5年程度を回収目標としている) コスト予測が容易なことなどが挙げられる。スクラバについては、日本国内での

本格的な実績はまだないものの、実験的なプロジェクトも実施されており、搭載船の運航が始まるのは近いと思われる。

一方、LNG 船については、当初期待されたほどには増えておらず、採用は内航船、定期航路が中心となっている。これは、LNG 供給のためのインフラ設備の遅れや、ガスエンジンが既存船へのレトロフィットより新船への適用に向いていることなどが挙げられる。いずれにせよ、LNG の利用は様々な排ガス規制に対応可能なことから、期待は大きい。LNG の供給方法についても、陸上 LNG 基地からの供給 (Shore to Ship) の方法以外に、LNG バンカー船からの供給 (Ship to Ship) や陸上ローリーからの供給 (Truck to Ship) などの方法が利用され始めており、今後拡大するものと期待される。

### 3. EGCS ガイドラインの概要

#### 3.1 硫黄分規制と EGCS の同等条件

2009 年、IMO の MEPC59 において、同等措置に対する EGCS ガイドラインが採択された。このガイドラインに従って、主管庁により認証される装置は、MARPOL73/78 条約附属書 VI 第 4 規則の同等手段として認められることとなる。

EGCS の認証には、NO<sub>x</sub> 排出削減システムと同様に、型式承認の認証スキームであるスキーム A と個々の製品認証スキームであるスキーム B の 2 つのスキームが設けられている。SO<sub>x</sub> 排出量は、排ガスの SO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 比を用いて評価し、この値が燃料の硫黄分規制と同等になっていることを確認しなければならない。表 1 に、排ガス中の SO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 比と燃料中の硫黄分濃度上限値 (規制値) の関係を示す。スキーム A では、この規制値を満足するエンジン、スクラバの運転条件を認証時に明らかにして、搭載後は運転データを監視、記録することが必要である。一方、スキーム B では、SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 濃度を常時監視し、記録することが必要になる。

表 1 燃料中の硫黄分濃度規制値と排ガス中の SO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 比の関係

燃料油中の硫黄分濃度 (% m/m)	排出比 SO <sub>2</sub> (ppm)/CO <sub>2</sub> (% v/v)	規制の適用範囲と時期	
4.50	195.0	一般海域	2012/1/1 以前
3.50	151.7	一般海域	2012/1/1 以降
1.50	65.0	ECA内	2010/1/1 以前
1.00	43.3	ECA内	2010/1/1 以降
<b>0.50</b>	<b>21.7</b>	一般海域	<b>2020/1/1 以降</b>
<b>0.10</b>	<b>4.3</b>	ECA内	<b>2015/1/1 以降</b>

#### 3.2 排水性状監視項目

SO<sub>x</sub> スクラバに対するモニタリングは、排ガス (SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>) だけでなく、使用した洗浄水に対してもモニタリングが義務づけられている。排水基準については、EGCS ガイドラインの 10 章 Washwater に記載されている。排水モニタリングは、スキーム A、B のいずれのスキームにおいても同じように要求されており、その内容は以下のとおりである。

(1) 常時モニタリング項目

温度、pH、濁度、多環芳香族炭化水素 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)

(2) 定期的な分析が必要な項目

硝酸塩濃度 (更新検査の前に実施)

(3) 洗浄水に化学薬品や添加物を加える場合、その洗浄水は、決議 MEPC.126(53)に定められた活性物質を使用したバラスト水管理システムの承認のための手続き(G9)に関する IMO ガイドラインを考慮して評価する。

(4) 排水性状の詳細分析とその報告義務：設置時および設置から 2 年間は 1 年ごとの報告が必要 (すなわち最低 3 回報告を行う)

・分析対象：取水、スクラバ後の洗浄水、排水

- ・分析項目：pH, PAH 及び 油分（ガスクロマトグラフ質量分析装置による分析），硝酸塩および亜硝酸塩，重金属類（Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, As, Cr, V）
- ・分析方法：サンプリングおよび分析の方法は，ISO または US EPA で定められた分析手順を用いてラボ分析を行う。

(4)にある排水性状の報告義務については，将来的なガイドライン改正も念頭においたデータ収集を目的としている。これは EGCS ガイドライン作成時には，まだ排水性状のデータや排水による環境への影響が十分わかっていなかったため，国連の化学品に関する専門的な組織である，海洋環境保護の科学的側面に関する専門家会合（The Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, GESAMP）からの意見をを受けて設けられた。

### 3.3 排水クライテリアとモニタリング方法

常時モニタリングを要求されている4項目（温度，pH，濁度，PAHs）のうち，pH，PAHs，濁度の排水基準とモニタリング方法は，以下のとおり定められている。

#### 3.3.1 pH

スクラバ洗浄水排出時の pH については，以下の2つの要求のうち，いずれかを満足するよう求められている。

##### (i) 船舶からの排出時に洗浄水の pH を計測し証明する方法

スクラバから排出される洗浄水の pH を 6.5 以上とする。ただし，航行中には，取水と排水の pH 差が 2 以内であればよい。また，排水の pH が基準を満たさない場合には，洗浄水にさらに別の海水（冷却水排水など）を加えて希釈することも可能である。

##### (ii) スクラバ搭載時の計測実験により証明する方法

EGCS のコミッショニング時に港湾内に停泊した状態で，排水口から 4m 離れた排水ブルームの pH を船外計測する。その計測地点における pH が 6.5 以上であればよい。これらの計測値は EGCS 技術マニュアル（ETM-A または ETM-B）に記録され，これによって pH6.5 の排水規制値を満足するとみなされる。

(ii)による運用の場合，洗浄水の船外排出時の pH は 6.5 よりかなり低い値でもいいことになり，実質的な緩和措置にあたる。船上での希釈量が減ることは，海水汲み上げのためのポンプ容量が減るなど運用上のメリットは非常に大きい。しかしながら，これまでのガイドラインでは，(ii)の検証方法について具体的な手順などが示されておらず，計測方法や要求される精度などが不明確であった。特に，停泊中に最大負荷でエンジンを運転し計測することを要求しているため，従来の推進システムを搭載した船舶では計測不可能であった。ノルウェーは第 1 回汚染防止・対応小委員会（Pollution Prevention and Response, PPR1）において，(ii)の適用が，電気推進船でなければ実施不可能であることを指摘した<sup>6)</sup>。

このため，2015 年 1 月に開かれた PPR2 小委員会では，排水の pH クライテリアを検証するための方法として，実測に代わる数値計算の導入がヨーロッパ諸国によって提案された<sup>7), 8)</sup>。これは，排出された洗浄水ブルームの pH を流体力学，またはそれと同等の科学的に確立した実験式を用いて計算し，ブルーム中心線上の pH が排水口から 4 メートル離れた点で，6.5 以上に回復することを証明するものである（ただし，従来の実測による方法も認められている）。計算のための参照海水性状としては，pH8.2，アルカリ度 2200  $\mu\text{mol/L}$  を用いることが提案され，滴定曲線を考慮することも求められている。ここで，アルカリ度とは水が持つ酸に対する緩衝能力のことをいう。アルカリ度 2200  $\mu\text{mol/L}$  は，北海や北太平洋などの公海域のアルカリ度とほぼ同じであるが，河川などのある沿岸部では低くなる。このため，スクラバの認証とは別に運用上の問題を考えた場合にも，アルカリ度が低い海域では適切な補正計算等を検討すべきである。

上記 pH クライテリアの改正案は，2015 年 5 月の MEPC において採択された。この改正によって，排水 pH に関する認証条件が明確になり，(ii)の緩和規定が利用されやすくなることで，スクラバの導入には有利な条件となる。

#### 3.3.2 PAHs

多環芳香族炭化水素（PAHs）は，図 2 に示すように複数の芳香環（ベンゼン環）からなる物質の総称で，環数の違いや，置換基のあるものを含めると百種類以上になる。発がん性や変異原性などの作用が確認されているものもあり，各国で規制対象物質，あるいは環境中の監視対象物質が決められている。これらの物質は，化石燃料

中に多く含まれ、エンジン排ガス中にも存在することが知られている。図中枠線で示すフェナントレンは、EGCSガイドラインによって排水中のモニタリングの基準とされている PAH である。

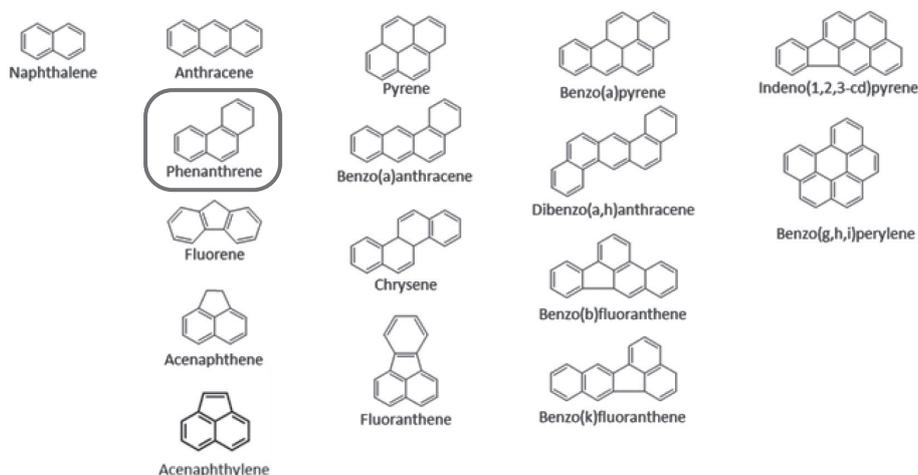


図2 代表的な PAH の例

EGCS ガイドラインでは、取水と排水の  $PAH_{phe}$  (フェナントレン相当 PAH 濃度) を計測し、その濃度差を  $50 \mu\text{g/L}$  (ppb) 以内とすることを定めている。ただし、この値は排ガス浄化装置の水量が  $45 \text{ t/MWh}$  (ここで MW は連続最大出力 (MCR) または定格出力の 80% である) の時のものであり、MWh あたりの水量によって、表 2 に示すように規制値は変わる。また、pH とは異なり計測時の追加の希釈を認めていないことから、計測は濃度で行うが、エンジン出力によって排水中の濃度限界が変わることから実質的には排出総量規制と見なせる。さらに、エンジン始動時などを考慮して、12 時間につき 15 分以内であれば上記規制値を 100% まで超えてもよいとしている。

表 2 排水中のフェナントレン相当 PAH ( $PAH_{phe}$ ) 許容濃度値

流量 (t/MWh)	排水中の濃度限界 ( $\mu\text{g/L PAH}_{phe}$ )	計測方式
0 - 1	2250	紫外分光
2.5	900	
5	450	
11.25	200	蛍光分光
22.5	100	
45	50	
90	25	

計測装置については、表中で示した排水濃度限度の少なくとも 2 倍までのレンジで水中の PAHs がモニタリングでき、使用環境範囲内の洗浄水に対して 5% 以上の誤差がないことを実証するよう求めている。また、使用する洗浄水量が少ないほど PAHs 排出限界値は高濃度になるため、 $2.5 \text{ t/MWh}$  以下の水量では紫外分光法を、使用水量が多く ( $2.5 \text{ t/MWh}$  超え)、PAHs 規制値が低濃度の場合は蛍光分光法を用いるよう定めている。

現在、入手している情報の範囲では、EGCS ガイドラインに定められた蛍光分光法による PAHs 計、または、濁度計など他のモニタリング機器と組み合わせてモニタリングユニットとして提供されている製品には、TriOS 社 (ドイツ)、Turner Designs Hydrocarbon Instruments 社 (米国) の他、Sea & Sun Technology 社 (ドイツ)、CONTROS 社 (ドイツ)、Chelsea Technology Group (英国)、Hach 社 (米国) などの製品がある。このうち、TriOS 製品は DNV GL の型式認証を取得済みであり、Turner 製品は ABS と DNV から船上での個別認証を取得している (型式認証については、現在 DNV GL にて手続き中とのこと)。

上記 PAH 計は、水中に溶存する PAHs をフェナントレンの励起波長と蛍光発光波長を用いて計測し、検出値をフェナントレン濃度に換算する。例えば、TriOS の製品では、フェナントレンの励起波長  $254\text{nm}$ 、蛍光発光波長  $360\text{nm}$  に固定されている (後述、4.1.2 参照)。光学計測法は、サンプルの濁度によって影響を受けることが知ら

れているが、スクラバ洗浄水のような黒色の粒子が存在するサンプルに対しては特に顕著となる。このため、スクラバ排水の計測にあたっては、濁度補正を行うだけでなく可能な限り低濁度での計測が望まれる。また、計測用窓の汚れ、油膜の付着も、計測に大きな影響を与えるため、クリーニング機能などを有した計測器の装備が必要と考えられる。

### 3.3.3 濁度

SOx スクラバでは重金属、灰分を含む浮遊粒子状物質 (Suspended Particle Matter, SPM)、いわゆるドライストも除去されるため、濁度に対するクライテリアは、それらが過剰に海中に排出されないためのものである。EGCS ガイドラインでは、洗浄水の濁度は、取水の濁度に比べて 25 FNU (formazin nephelometric units : ホルマジン比濁計単位) あるいは 25 NTU (nephelometric turbidity units : 比濁計濁度単位) を超えてはならないとしている。ただし、PAH クライテリアと同様に 12 時間につき 15 分以内であれば上記規制値を 20% まで超えてもよい。

濁度計については、ISO 7027:1999 あるいは US EPA 180.1 で定められた計測器を用いるよう要求している。表 3 にそれぞれの規格の特徴を記した。

表 3 EGCS ガイドライン指定の濁度計規格の比較 (ISO 7027:1999 および USEPA 180.1)

規 格	ISO 7027	US EPA 180.1
光 源	LED, レーザー, タングステンランプ(フィルタ, モノクロメータ付き)	色温度2200~3000Kのタングステンランプ, 白色LED
波 長	860 nm	検出器との組合せで400~600 nmに応答特性
光路長	10cm以内	10cm以内
測定角	90±2.5°	90±30°
開口角	20~30°	規定なし
特 徴	着色粒子の影響を受けない。小さい粒子の感度が低く、特に低濁度領域でEPA180.1 準拠の計測器より読み値が低めに出る。	白色光を使用しているため、対応粒子径が広く、特に小さな分子への感度が高い。着色粒子の影響を受けやすい。

また、光学式濁度計には光源と受光器との位置関係で、透過光法および散乱光法 (90° 散乱光, 表面散乱光, 前方・後方散乱光) や、積分球式等の濁度測定法がある。ISO 7027 および US EPA 180.1 は、90° 散乱光法を利用するが、市販の濁度計ではより精度の高い計測を行うため、図 3 に示すような透過光と散乱光を組み合わせたもの (レシオ測定法とも呼ばれる) や、角度の異なる検出器を複数備えて、補正を行うものがある。一般に、濁度は標準物質の種類および測定方式により、同一試料に対する指示値は異なるため、絶対値の比較はむずかしいことが知られており、濁度測定では基準を明確にしておくことが重要とされている。

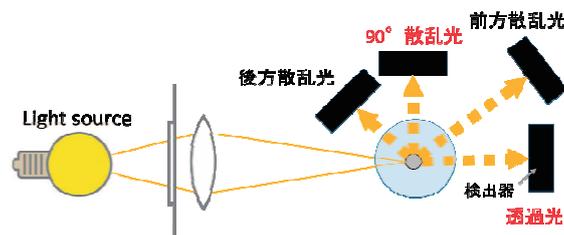


図 3 濁度計測方式の種類：光源と検出器の位置関係

スクラバ洗浄水の計測での特徴的な問題としては、濁度計を校正するための標準液が白色の粒子状物質 (ホルマジン等) を水中に溶かしたものであるのに対し、実際のスクラバ洗浄水は黒色のスス粒子を含む液であるため、色彩による差異が存在することである。このため、PAH 計と同様にスクラバ洗浄水のサンプルの濁度が大きい場合黒色の影響を受けて計測値が小さくなる恐れがある。そのため、黒色の影響を受けない小さい濁度のサンプルを計測することが重要である。この問題については、弊所での実験結果として、次章に紹介する。また、水中に気泡が存在する場合、気泡が入射光に対してレンズ効果を示すために、指示値の変動やドリフトが起り、計測精度が落ちることが知られている。実際に US EPA の報告には、気泡などの影響により計測が困難な場合がある

との記述がある<sup>9),10)</sup>。このため、濁度、PAH計測ともに計測位置を検討し、可能であれば、取水ポンプやスクラバからなるべく離れた位置に、大気圧開放（微陰圧であれば、なおよい）状態、あるいはその他の脱気機能をもつ計測用のバイパスを設けるような対策が望まれる。測定精度維持のために、製品自体に測定窓のクリーニング機能や脱気機能を持つ製品が出されているので、それらの機能も製品選択の重要な要素となるであろう。

#### 4. 排水モニタリング法の検討

EGCSガイドラインの排水クライテリアのうち、前述のように濁度計測やPAHについては、洗浄水に黒色粒子や気泡などが含まれると計測精度に問題が生じるなどの課題が指摘されている。また、PAHsの排出形態など排水性状についての詳細も不明な点が多い。弊所においても、スクラバに関する研究を開始した初期に、濁度とPAHsの計測値に疑念の生じる結果が得られた。このことから、方式の異なる複数の濁度計を用いてスクラバ洗浄水のモニタリングを行い、濁度計測法について検証したり、PAHモニタリング法と洗浄水の詳細な化学分析の結果を比較したりして検討を行ってきた。本報告では、その一部を紹介するが、その他詳細については、参考文献に記載の報告を参考されたい<sup>11),12)</sup>。

##### 4.1 実験方法

###### 4.1.1 スクラバ洗浄水モニタリング試験

試験に用いたエンジンは、定格出力257 kWの船用中速4ストロークディーゼルエンジン（MU323DGSC）である。燃料油はC重油（硫黄分2.6%）を用いて、船用負荷特性75%の負荷率で実験を行った。スクラバはアルファラバル社製の試験用スクラバで、運転方式は地下水を用いた清水クローズド・モードとし、循環水流量を18m<sup>3</sup>/h（約70 t/MWh）に設定した。循環水は自動的に25%NaOH溶液が添加され、pHは6.5～7.6の間に保持される。

###### 4.1.2 PAHs測定

連続モニタリングは、蛍光分光法を利用した浸漬タイプの溶存油分濃度計Enviro Flu-HC（TriOS社製）を用いて行った。装置の仕様を表4に示す。PAH計は蛍光測定法であるため、光を散乱するような粒子が存在すると測定値に影響を及ぼす。スクラバでは排ガスに含まれるスートが循環水中に分散し、黒色の懸濁粒子、いわゆる浮遊物質（Suspended Solids, SS）として存在する。そのため、TriOS社では同時に濁度測定を行い、粒子の影響を補正できるよう補正式を提供している。本実験ではUS EPA180.1に準拠し、レシオ方式の水質分析計U-53（堀場製作所製）の濁度を用いて補正を行った。

表4 PAH計 Enviro Flu-HC の仕様

測定方式	水中に溶損するPAHの蛍光発光量を測定
光源	キセノンランプ(励起波長254nm)
検出器	UVフォトダイオード(モニター波長360nm)
測定範囲	低濃度領域:0~50ppb
	高濃度領域:0~500ppb
測定感度	0.3ppb
測定濃度	フェナントレン相当濃度に換算可能

また、採水サンプルは、孔径0.45μmのメンブランフィルタで粒子状物質を除去し、ろ液を分析した。ろ液は、i) 3次元蛍光分析: 分光蛍光光度計（日立、F-2500）の測定にそのまま用いたほか、ii) 高速液体クロマトグラフィ（HPLC）:（Agilent1100, 蛍光検出）による分析では、ろ液からPAHをジクロロメタンで抽出し、エタノールで希釈したサンプルを分析した。励起波長及びモニター波長は、溶出物質に合わせて時間変化させた。検出されたPAHは、図2に示した16種のPAHの混合標準液（アルドリッチ、ERS-009）を用いて定量した。

## 4.2 結果および考察

### 4.2.1 PAH<sub>phe</sub> モニタリング結果

スクラバ洗浄水モニタリング計測における PAH 濃度の時間変化の一例を、図 4 に示す。エンジン負荷率 75%、循環水量 18m<sup>3</sup>/h の時の PAH<sub>phe</sub> 及び濁度の時間変化を示した。PAH 計の値は濁度の影響を受けるため、連続測定した濁度を用いて、TriOS 社より提供された濁度補正式を用いて PAH<sub>phe</sub> 値を補正した。

循環水量 18m<sup>3</sup>/h をエンジン出力当たりの値にすると 70t/MWh となる。このとき PAH の排出規制値は表 2 より PAH<sub>phe</sub> で 25ppb であるが、クローズド・ループで循環させているにもかかわらず、PAH<sub>phe</sub> 濃度は規制値より十分に低いことがわかった。この傾向は、他の実験条件においても同様に実験開始から PAH<sub>phe</sub> 値はほとんど変わらず、最大でも 1ppb 程度で規制値以下であった。

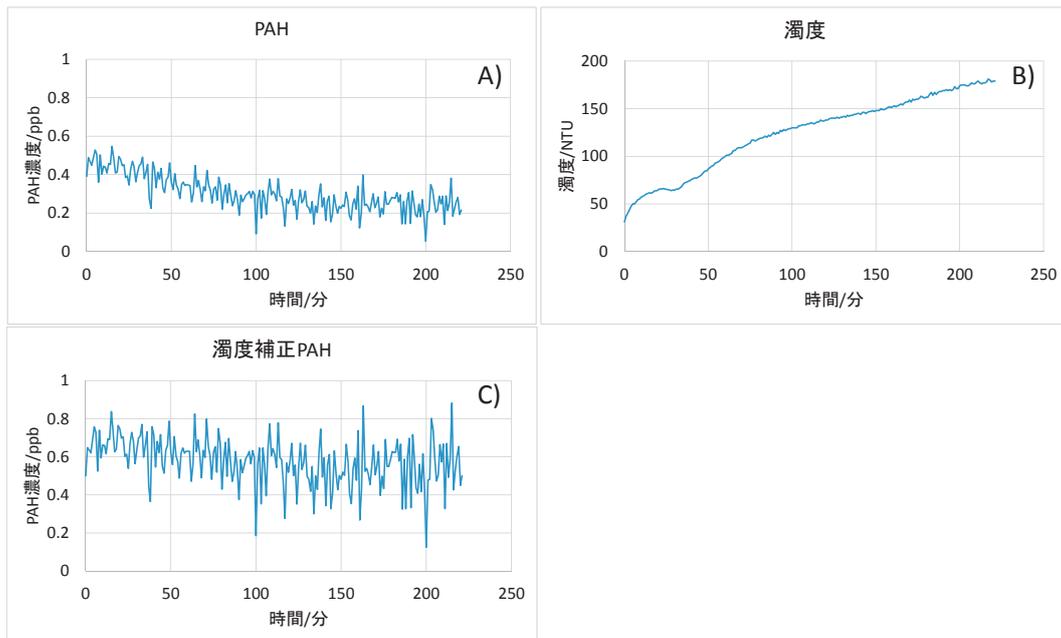


図 4 PAH および濃度のモニタリング結果の例

A) Enviro Flu-HC による実測 PAH 濃度, B) U-53 による濁度, C) 濁度補正を行った PAH 濃度  
エンジン条件は船用負荷率 75%、循環水量は 18m<sup>3</sup>/h

### 4.2.2 PAH の 3 次元蛍光分析及び HPLC 分析結果

ろ過した循環水中の PAH を 3 次元蛍光分光装置で測定した。前述したように、PAH は環数の異なる複数の芳香族炭化水素から成り、物質によって吸収極大及び発光極大が異なる。3 次元蛍光分光装置では、これを、縦軸：励起波長、横軸：蛍光波長として、蛍光強度を等高線で 3 次元的にマッピングすることができる。すなわち、3 次元蛍光スペクトルでは、物質で決まる励起/蛍光波長で 2 次元展開することで分解能が上がり、分布を見ただけでどのような物質が含まれているかおおまかに把握することが可能である。一般に環数が増えるほど、吸収波長も蛍光波長も長波長側へシフトすることが知られている。図 5 に、フェナントレンの標準試薬を希釈して計測した事例を示す。また、その他の PAHs 標準試薬を用いた計測結果から、PAHs の環数毎のスペクトル位置分布も確認したので、同じく図 5 に示す。3 次元蛍光スペクトルで見ると、右上にピークがあるほど環数が多い PAH による蛍光ピークであることがわかる。

図 6 に、船用特性負荷率 75% のときのスクラバ洗浄水をフィルタでろ過し、3 次元蛍光分析を行ったときのスペクトルの時間変化を示す。循環時間が長くなるにつれて、低分子量 PAH から高分子量 PAH へと成分が変わっていることがわかった。通常のクローズド・ループのスクラバでは、洗浄水に清水を用いて循環させるが、循環時に遠心分離器やフィルタなどによって、洗浄水中のスラッジが逐次除去される。このため、本実験のように洗浄水中の SS をそのまま循環させ、PAH や SS が蓄積していく場合とは条件が異なる。循環水量 18m<sup>3</sup>/h の場合、循環水は約 10 分で 1 周する。従って、図 6 において、10 分のデータがオープン・ループにおけるスクラバ洗浄

水の成分に相当するものと考えられる。また、図中において、青丸で示した領域が連続モニタリングで用いた溶存油分濃度計 Enviro Flu-HC の観測領域である。

図6に示されるように、時間の経過とともに(励起波長 230nm, 蛍光波長 300nm)付近のピークが消え、(同じく 300nm, 420nm)付近のピークが大きくなっている。すなわち、低分子量のPAHが減って、高分子量のPAHが増えている。一方、連続モニタリングで計測されている蛍光波長領域(図中の青丸)には明確なピークはみられない。すなわち、フェナントレンの波長領域についてはほとんど変化がなく、この点で図4のモニタリングの結果と一致している。これらの結果から、逆に考えれば、図6で見られるような時間の経過に伴う高分子量PAHの増加は、フェナントレンを代表値とした計測法では検知されないことがわかる。ただし、これら高分子量のPAHについて、HPLC分析を行ったところ、2時間循環させた後の洗浄水でも濃度は規制値より低かった。

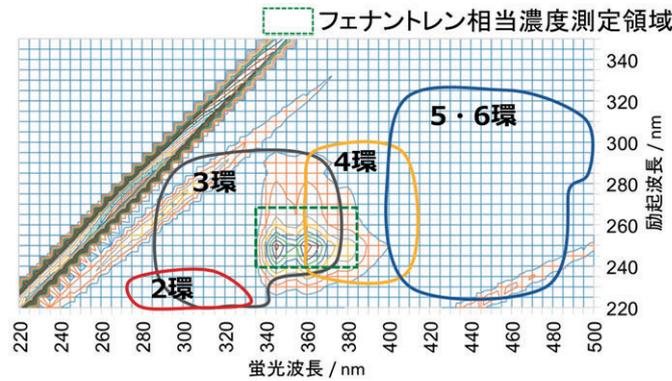


図5 フェナントレンの3次元蛍光スペクトル (PAHsの環数ごとの大まかなピーク位置も示す)

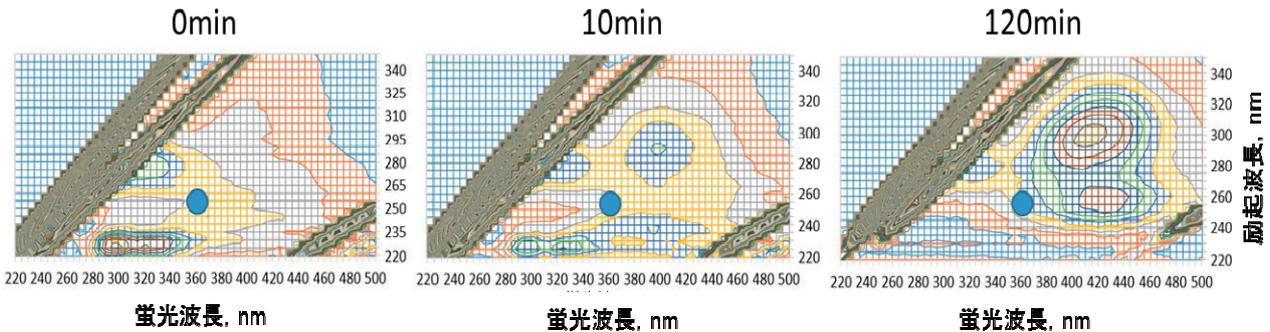


図6 フィルタでろ過したスクラバ循環水の3次元蛍光スペクトル。循環水量 18m<sup>3</sup>/h  
縦軸は励起波長 (nm), 横軸は蛍光波長 (nm), 等高線はピーク強度を示す  
また各図の青丸は市販のPAH計の励起/蛍光波長を示し、フェナントレンのピークに相当する位置

#### 4.3 モニタリング法検討のまとめ

スクラバ洗浄水中のPAHをモニタリングするとともに3次元蛍光分光法によって分析し、排水中のPAHの種類・濃度を簡易的に調べた。スクラバ洗浄水中のPAHについては、循環時間が増えるにつれて低分子量PAHが減少し、高分子量PAHが増加したが、EGCSガイドラインで定められたモニタリング法では、これらの変化を検知することはできないことがわかった。ただし、洗浄水中のPAH濃度は非常に低く、当所で行った他の条件での実験結果も考慮すると、オープン・ループでの排水でPAHや濁度が問題になることは、ほとんどないと考えられた。

## 5. まとめ

SO<sub>x</sub> 規制に対する対策動向と、IMO の EGCS ガイドラインにおける排水規制の概要を解説するとともに、弊所で行ったモニタリング法検証実験の一部について紹介した。

EGCS ガイドラインについては、スクラバの搭載実績の多い EU 諸国を中心に今後も継続的な見直しが提案される可能性もある。PPR1 においてノルウェーから出された提案文書には、pH クライテリアの問題だけでなくこれまでの経験に基づいた複数の提案がされている<sup>6)</sup>。例えば、スクラバ洗浄水の pH 調整用に使用する苛性ソーダについては、G9 に基づく評価の免除を提案した。彼らによれば、EU 内では EU directive 2012/33/EU が 2014 年に発効し、苛性ソーダを使用した洗浄水のアセスメントに関する要件が既に緩和されているとのことで、これに関しては PPR1 で合意された。この緩和によって、クローズド・ループで使用した洗浄水を陸揚げする必要がなくなることから（ただし、洗浄水クライテリアの範囲内での排水が必要で、かつ pH は 8 を超えてはいけない）、スクラバの運用上、非常に有利に働くと考えられる。今後とも規制の動向を注視しつつ、その妥当性を検討していきたいと考えている。

## 謝 辞

本解説で紹介した研究の一部は、日本財団の助成事業である（一財）日本船舶技術研究協会の「2014年度大気汚染防止基準整備のための調査研究（大気汚染防止基準整備プロジェクト）」により実施されました。ここに厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 2009 Guidelines for Exhaust Gas Cleaning System, MEPC 59/24/Add.1, July 2009.
- 2) Directive 1999/32/EC (amended by Directive 2005/33/EC and subsequently by Directive 2012/33/EU)
- 3) Lloyd's List, 'Exclusive Lloyd's List sulphur survey reveals growing trust in technology', 28 March 2014
- 4) S.Pathak, Ship & Bunker, 10 February, 2015.  
<http://shipandbunker.com/news/features/industry-insight/661764-industry-insight-the-shipping-industrys-response-to-eca-2015>
- 5) The market for scrubbers, Transport & Environment, March 2015  
<http://www.transportenvironment.org/publications/market-scrubbers>
- 6) Meeting document PPR 1/9/3 submitted by Norway, 29 November 2013.
- 7) Meeting document PPR 2/2/3 submitted by Austria et al., 13 November 2014.
- 8) Meeting document PPR 2/2/5 submitted by Norway, 21 November 2014.
- 9) Exhaust Gas Scrubber Washwater Effluent, USEPA, EPA-800-R-11-006, November 2011.
- 10) Wärtsilä, Exhaust Gas Scrubber Installed On-board MT "SUULA", Public Test Report, June 20, 2010.
- 11) 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, 日本マリンエンジニアリング学会誌 50 巻 3 号 (2015),
- 12) 益田晶子, 高橋千織, 西尾澄人: 湿式スクラバーの水質モニタリング法の検討-濁度と多環芳香族炭化水素について, 日本マリンエンジニアリング学会誌 (投稿中).