

2023年にClassNKが発行したガイドライン

開発本部 技術研究所

2023年にClassNKでは、表1に示す14のガイドラインを発行している。ここでは、これらのガイドラインの概要を紹介する。

表1 2023年発行のガイドライン

| タイトル | 使用言語 | 発行年月 | 問い合わせ先 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---------|--------|
| コンテナ運搬船の追加火災対策のためのガイドライン (第1.0版) Guidelines for Additional Fire-fighting Measures for Container Carrier (Edition 1.0) | 日・英 | 2023年4月 | 開発部 |
| 風力を利用した船舶補助推進装置に関するガイドライン (第2.0版) Guidelines for Wind-Assisted Propulsion Systems for Ships (Edition 2.0) | 日・英 | 2023年4月 | 技術部 |
| コンテナの積付け及び固縛に関するガイドライン (第3.1版) Guidelines for Container Stowage and Securing Arrangements (Edition 3.1) | 日・英 | 2023年4月 | 技術研究所 |
| パラメトリックロール対策のためのガイドライン (第1.0版) Guidelines on Preventive Measures against Parametric Rolling (Edition 1.0) | 日・英 | 2023年4月 | 技術研究所 |
| 電子ログブックに関するガイドライン (第1.0版) Guidelines for Electronic Logbooks (Edition 1.0) | 日・英 | 2023年5月 | 開発部 |
| 直接荷重解析に基づく強度評価ガイドライン (第3版) Guidelines for Direct Load Analysis and Strength Assessment (Edition 3.0) | 日・英 | 2023年6月 | 開発部 |
| 船上CO ₂ 回収貯蔵装置ガイドライン (第1.1版) Guidelines for Shipboard CO ₂ Capture and Storage Systems (Edition 1.1) | 日・英 | 2023年6月 | 開発部 |
| 電気自動車安全輸送ガイドライン (第1.0版) Guideline for the Safe Transportation of Electric Vehicles (Edition 1.0) | 日・英 | 2023年8月 | 材料艤装部 |
| 液化水素運搬船ガイドライン (第2.0版) Guidelines for Liquefied Hydrogen Carriers (Edition 2.0) | 日・英 | 2023年8月 | 技術部 |

| タイトル | 使用言語 | 発行年月 | 問い合わせ先 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------|-----------|
| 燃料電池搭載船ガイドライン (第2版) Guidelines for Fuel Cell Power Systems On Board Ships (Second Edition) | 日・英 | 2023年9月 | 技術部 |
| 船舶に搭載される有害物質一覧表に関するガイドライン (Ver.5.00) Guidelines for the Inventory of Hazardous Materials (Ver.5.00) | 日・英 | 2023年10月 | 船舶管理システム部 |
| 船舶水中騒音ガイドライン (第1.0版) Guidelines for Underwater Noise from Ships (Edition.1.0) | 日・英 | 2023年10月 | 機関部 |
| 船上のシステム及び機器のサイバーレジリエンスに関するガイドライン (第1.0版) Guidelines for Cyber resilience of on-board systems and equipment (Edition.1.0) | 日・英 | 2023年11月 | 海技部, 機関部 |
| バイオ燃料使用に向けたテクニカルガイド (第1.1版) Technical Guide for Using Biofuels (Edition 1.1) | 日・英 | 2023年12月 | 機関部 |

コンテナ運搬船の追加火災対策のためのガイドライン（第1.0版）

コンテナ運搬船にあっては、近年の大型化に伴い火災等に対する安全性向上のための条約改正が行われてきたものの、いまだ大規模な火災事故が複数発生しており、さらなる安全性の向上のためにIMOにおいて国際規則の見直しが審議されている。

IMOでは、コンテナ運搬船の火災安全対策に関する新たな要件を策定する新規作業計画案が、2021年5月開催のMSC103で承認された。この計画では、関連要件の改正は2025年までに審議が完了し、2028年1月の発効が目標となっている。

一方で、コンテナ運搬船を運航する船主や船舶管理会社の一部において、IMOでの議論に先んじて自発的な対応を進める動きがあることから、本会は任意に追加された火災対策を評価し、当該対策を船級符号に付記できるよう「コンテナ運搬船の追加火災対策のためのガイドライン」を発行した。



風力を利用した船舶補助推進装置に関するガイドライン（第2.0版）

船舶の安全は国際条約や国内法、関連する規格等によって保証される一方で、風力推進装置について規定した条約類は存在しないのが現状である。そのため、本会では、2019年に「風力を利用した船舶補助推進装置の設計に関するガイドライン（初版）」を発行し、本ガイドラインを参照することで、風力補助推進システムの設計において考慮すべき設計要素を押さえることが可能になった。さらに、実プロジェクトを通じて得られた知見を反映し、2023年4月に第2版として大幅にガイドラインを更新した。第2版では、風力補助推進システム設計者と船舶設計者の両者が分かり易いようにガイドライン全体の構成を見直し、「風力装置」、「搭載船」、「検査」の3部構成とした上で、それぞれの要件を詳細化及び明確化した。風力補助推進装置の設計、また船舶への搭載にあたって検討すべき点も包括的に確認できるものとなっている。尚、引き続き風力推進装置の採用実績及び知見が蓄積された段階で逐次アップデートを行っていく予定である。



コンテナの積付け及び固縛に関するガイドライン (第3.1版)

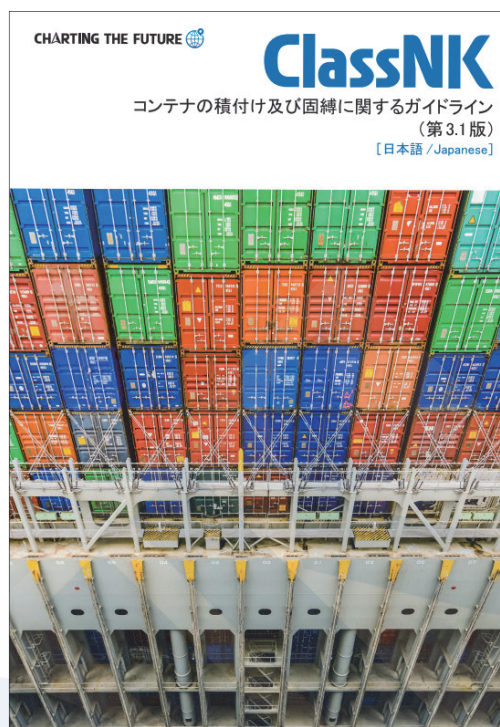
コンテナ船は、一度に多くのコンテナを運搬するため、ホールド内だけでなくデッキ上にも多数のコンテナスタックを積載している。コンテナスタックは、船舶の運動に伴い生じる荷重に耐えられるよう、ラッシングロッドをはじめとする固縛金物により固定されている。船体運動により発生するコンテナや固縛金物に発生する力が許容値を超えないかどうか評価することを、コンテナ固縛強度計算と呼んでいる。

コンテナ固縛強度計算は、設計荷重の評価と、ラッシングロッドを含めたラッシングシステムの変形評価から構成される。本ガイドラインでは、船体運動・加速度の評価にあたりC編全面改正の成果を取り入れて設計荷重を改めた。また、設計荷重の算出に当たり、航路や季節に応じた、Weather routing等による船舶の荒天回避挙動を考慮した遭遇海象を使用するよう規定した。また、ラッシングシステムの変形評価において、現象に忠実な計算を、高速かつ高精度に実施可能なソルバーを開発し、ガイドラインに規定した。これらの改正により、より経済的かつ安全なコンテナの海上輸送の実現が期待される。

パラメトリックロール対策のためのガイドライン (第1.0版)

パラメトリックロールは、通常の船の同調横揺れとは異なり、復原力の時間的な変動によって発生する横揺れ現象であり、縦波や斜波中で起こり得る。コンテナ船や自動車運搬船等の痩せ型船において発生しやすく、特に近年は大型コンテナ船において、パラメトリックロールによる過大な横揺れが原因と考えられる貨物の荷崩れ事故が発生している。

本ガイドラインは、パラメトリックロールによる過大な横揺れの回避及び防止対策の普及を図るため、有効な対策の種類、適用すべき機能要件、船級符号への付記等を取りまとめたものである。また、本ガイドラインには、パラメトリックロールを回避するための基本的な注意事項、パラメトリックロールの発生領域を示すパワーチャートの作成手順等も掲載されている。



電子ログブックに関するガイドライン（第1.0版）

近年、デジタル技術やタブレット等のデジタル機器の進歩により、これまで紙面で確認していた様々な情報が電子化され、社会全体の中でペーパーレス化の動きが加速している。海事業界においても同様に、船の運航に関する重要事項を記録するログブックの電子化が注目されており、船舶に搭載される様々な紙媒体のログブックの内、MARPOL条約で要求される油記録簿、オゾン層破壊物質記録簿等について電子媒体の使用を認める条約改正が2019年5月にIMOで採択されている。ログブックの電子化はペーパーレス化という環境面のメリットに留まらず、航海計器から取得したデータの自動入力による船員の記録作業の負担軽減や記録内容の品質向上の観点からも多くのメリットがあるため、将来的にはMARPOL条約で定めるログブック以外のものについても電子化が普及していくと予想している。そのような背景から、本会では船舶へ独自に搭載する電子ログブックを承認するためのアプローチとして、電子ログブックのデータ保存や記録管理といった一般的な仕様を纏めたガイドラインを発行した。



直接荷重解析に基づく強度評価ガイドライン（第3版）

「直接荷重解析に基づく強度評価ガイドライン」初版は、船舶が受ける波浪中荷重を直接的に推定する直接荷重解析に基づき構造解析を行い、対象船の特徴を正確に捉えた船体構造強度評価を行う為の「荷重構造一貫解析」と呼ばれる手法につき、関連要件を定めたものである。2022年には、同年7月に公表された鋼船規則C編において刷新された船体構造強度評価関連の思想に基づき、荷重構造一貫解析要件の見直し等を行い、第2版を発行した。

2022年末には、最新の技術に基づき分析された北大西洋の海象条件を示したIACS Recommendation No.34の改訂版（rev.2）が公開された（IACS Recommendation：IACSが発行する非強制の規定）。今般、当該文書の改訂を受け、当該海象条件に基づく強度評価を行う場合の注意点等を参考として取り纏め追記した第3版を発行した。

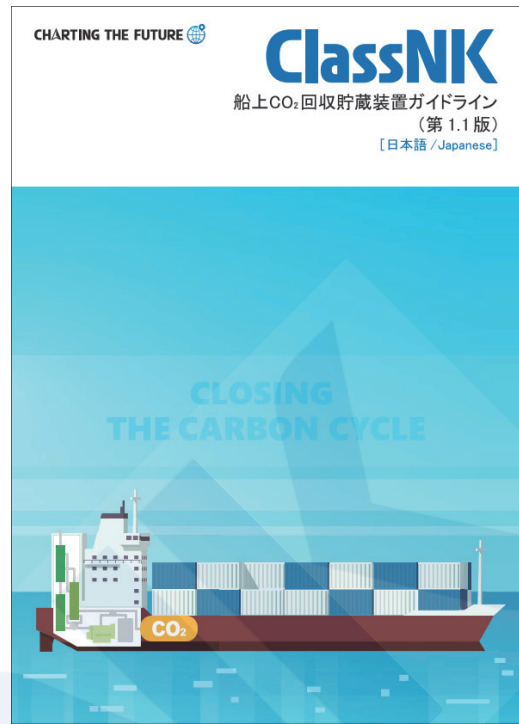


船上CO₂回収貯蔵装置ガイドライン（第1.1版）

近年、海運業界における船舶からの地球温暖化ガス（GHG）の排出量削減に関わる取り組みが益々強化されてきている。その中で、もっとも影響が大きいGHGともいわれる二酸化炭素（CO₂）の排出削減技術として、船上CO₂回収への関心が高まってきている。

このため、今後予測される船舶へのCO₂回収貯蔵装置の搭載に対して、本会によるスムーズな認証を可能とすべく、当該装置の一般的な概念、安全要件、船級符号への付記、検査要件を掲載し、また、当該装置に必要な追加エネルギーに関する情報等も付録にまとめた「船上CO₂回収貯蔵装置ガイドライン」を2023年4月に発行した（第1.0版）。その後、付録の一部内容を明確化する修正を加えた第1.1版を同年6月に発行した。

本ガイドラインでは、当該装置に関わる安全要件をCO₂回収装置関連設備（2章）及びCO₂貯蔵装置関連設備（3章）の2つに分類して規定した。また、船級符号への付記（4章）については、上述の各々の設備の船舶への設置状況により分別可能な記号の設定や、船舶への将来的な設置を見据えた設計を行った場合に対する記号の設定など、状況に応じて柔軟に対応可能な内容とした。さらに、付録では、CO₂吸収塔サイズの簡易計算方法、CO₂回収貯蔵装置の稼働に必要な追加エネルギーの試算、また、液化CO₂タンクの容量等、当該装置の設計上有益と考え得る情報についても記載した。



電気自動車安全輸送ガイドライン（第1.0版）

世界的に電気自動車の登録台数の大幅な増加に伴い、自動車運搬船での電気自動車の輸送台数も増加する事が予想される。電気自動車はリチウムイオンバッテリー（LIB）に蓄えられた電気エネルギーが駆動源であり、LIBから出火した場合、もしくはLIBに類焼した場合、電気自動車火災を鎮火するためにはガソリン車とは異なった火災対応が必要となる。

IMOでも電気自動車を含む新エネルギー車を輸送する船舶に関する火災安全措置について議論が開始されたが、その規則策定までに数年にわたる審議が見込まれている。

一方で、すでに電気自動車の海上輸送は始まっており、船社が自発的に火災安全対策を検討し、実施しているのが現状である。

本会では、そのような状況の下、電気自動車の火災時の特徴や留意点などを整理すると共に、有効と考えられる火災安全措置の注意すべきポイントを示した「電気自動車安全輸送ガイドライン」を発行した。有効と考えられる対策を講じた船舶にその旨を船級符号に付記できるようにし、船社が自発的に火災対策も評価する事のできる枠組みとしている。

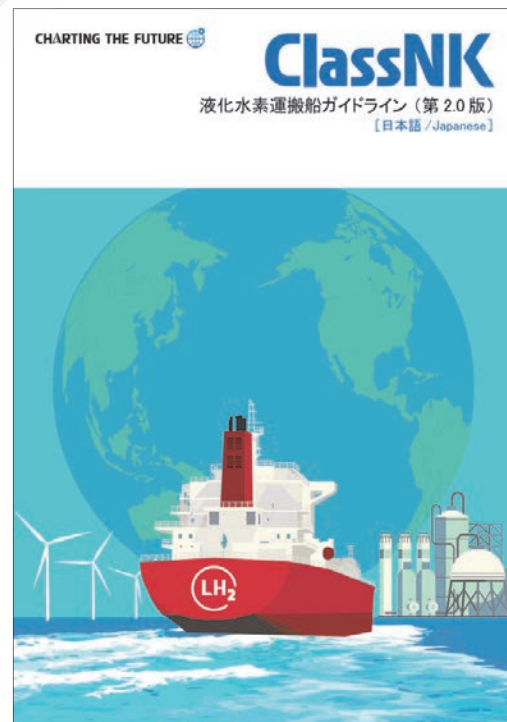


液化水素運搬船ガイドライン（第2.0版）

脱炭素社会におけるクリーンエネルギーとして期待される水素のサプライチェーン構築に向け、大規模かつ効率的な輸送を可能とする液化水素運搬船の開発が活発に進められている。

IMOでは、マイナス253度という極低温を維持しての液化ガス輸送に従事する液化水素運搬船の安全要件整備の検討が行われており、2016年には「液化水素ばら積み運送のための暫定勧告」が採択された。2017年に公表した本会の「液化水素運搬船ガイドライン」は、この暫定勧告をベースに、関連する国際規格や本会の研究成果をふまえ、より具体的な要件を規定した。世界初となる液化水素運搬船「すいそ ふろんていあ」の設計審査および検査は、本ガイドラインを基に実施された。

本会は、「すいそ ふろんていあ」への関与の他、開発中の液化水素運搬船コンセプトの審査を通じて得られた知見を反映し、第2.0版として、ガイドラインを更新した。今回の改正では、個々の要件をより明確かつ合理的な内容に洗練させるととも



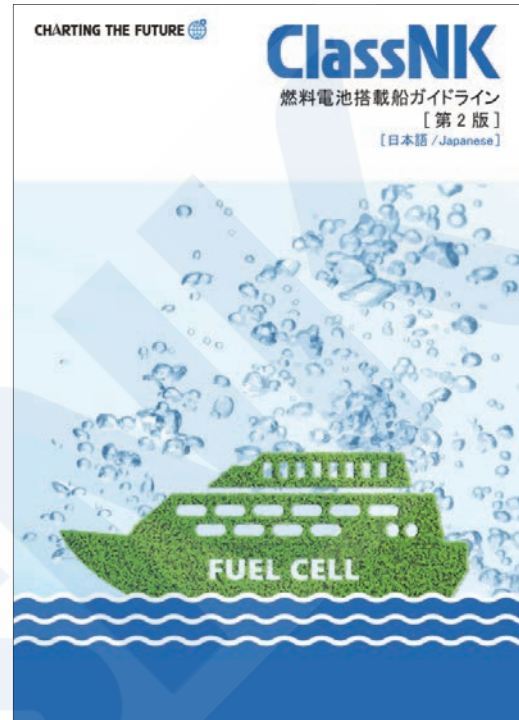
に、附属書に、個別プロジェクトごとに要求されるリスク評価のプロセスの指針および潜在的な危険源への対策検討の指針を追加することで、ユーザーにとってより実用的なものとなっている。

燃料電池搭載船ガイドライン（第2版）

燃料電池は水素と酸素の化学反応で得られる電気のエネルギーを利用した発電システムであり、発電過程において二酸化炭素を排出しないことから、船舶からのGHG排出量削減に寄与する有望な手段としても注目されている。

一方、燃料電池はその機構上、従来のガス燃料とは異なる特性を多く有する水素を取り扱うため、安全性確保に向けた十分な措置を講じることが不可欠となる。IMOは、船舶における燃料電池の使用に関わる安全要件をIGFコードに追加すべく審議を進めており、MSC105では「燃料電池搭載船の安全に関する暫定ガイドライン」が承認された。

今般、本会が更新した「燃料電池搭載船ガイドライン（第2版）」には、IMO暫定ガイドラインの内容を取り入れ、燃料電池を船舶に搭載するにあたっての関連設備の設計方針、火災安全、電気設備、制御・監視および安全装置などの最新の安全要件を規定するとともに、要件に適合した船舶に対する船級符号の付記（ノーテーション）について定めた。また、関連するIEC規格などに基づき、燃料電池発電システムを対象とする審査の要件を附属書として追加した。



船舶に搭載される有害物質一覧表に関するガイドライン（Ver. 5.00）

2023年6月26日に発効するシッフサイクル条約において要求される有害物質一覧表（IHM）に関して、2023年7月に開催された第80回 IMO海洋環境保護委員会（MEPC80）において、RESOLUTION MEPC.269(68)を改正するRESOLUTION MEPC.379(80)“2023 GUIDELINE FOR THE DEVELOPMENT OF THE INVENTORY OF HAZARDOUS MATERIALS”が採択された。改正内容は、2023年1月よりAFS条約において船体防汚塗料へのシブトリンの使用が制限されたことを受け、有害物質一覧表（IHM）に記載すべき有害物質としてシブトリンが追加された。Resolution MEPC.379(80)へ対応するため、2019年10月に発行した「船舶に搭載される有害物質一覧表に関するガイドライン（Ver.4.00）」を更新し、本ガイドラインをVer.5.00として発行した。



船舶水中騒音ガイドライン（第1.0版）

2000年代前半に水中騒音が原因と想定されるイルカやクジラ等の海洋生物の座礁事故が頻発し、船舶の水中騒音が海洋生物に与える影響に関する研究が実施された。これらの調査結果から、水中騒音規制導入に向けた機運が国際的に高まり、国際海事機関（IMO）においても、水中騒音規制導入に向けての活動がなされ、2014年3月に非強制ガイドラインが採択された。その後、より実効性を高める議論が高まり、昨年7月に船舶水中騒音管理計画の作成等を盛り込んだ改訂ガイドラインが採択された。そのような国際的な動向に対応するために、本会としてガイドラインを発行した。本ガイドラインでは、水中騒音低減のための設計要件、ISO17208に準拠した水中騒音計測の規定及びその結果に基づいた船級記号付与の基準等を定めている。

本稿末に本ガイドラインの概説を示す。



船上のシステム及び機器のサイバーレジリエンスに関するガイドライン（第1.0版）

船用システムへもIoT技術の導入が進み、船舶がサイバー攻撃を受けるリスクが高まっている。サイバー攻撃を受けると、船舶の安全性や信頼性を損なうだけでなく、海上における人命と財産の安全確保及び海洋環境の汚染防止に対して脅威を与え得る。

そこで、IACSは船舶のサイバーセキュリティ確保に必要な対策について検討を進め、UR E26及びUR E27を2022年4月に新規発行し、対策を要件として定めた。UR E26は船舶、UR E27は船上のシステム及び機器を対象としている。本会は、これらを鋼船規則X編に取り入れ、2024年7月1日以降の建造契約船から適用予定である。

本ガイドラインは、UR E27を取り入れる鋼船規則X編4章について、サイバーセキュリティに関する専門的な内容や本会の承認プロセスについて解説することで、本章の対象として想定する船用システム及び機器の製造者（供給者）をサポートすることを目的としている。



バイオ燃料使用に向けたテクニカルガイド（第1.1版）

船舶の脱炭素化に向けて燃料転換への取り組みが進む中、バイオ燃料は原料となる植物が成長過程で大気中のCO₂を吸収することから、「カーボンニュートラル」な燃料とされ、また既存の油焚きディーゼルエンジンや機関設備に大きな改造を必要とせず使用できるドロップイン燃料として、注目を集めている。一方で、バイオ燃料は使用実績が浅く、2023年時点で統一的な船用燃料としての規格も存在しないことから、長期的に使用した際のリスクなども懸念されている。

本テクニカルガイドでは、バイオ燃料の特徴や、石油由来の燃料油との違いから起こりうる事象、スラッジ対策やバイオ燃料使用時の機関設備への注意事項に加え、NO_x規制やGHG削減規制における取り扱いやバイオ燃料の将来シナリオについて取りまとめた。また、国策としてバイオ燃料の利用を推進しているインドネシアにて使用状況をヒアリングしたレポートや、顧客からの質問が多い内容を取りまとめたFAQについても掲載している。

本稿末に本ガイドラインの概説を示す。



船舶水中騒音ガイドライン概説

金子 博文*, 上入佐 光*

1. はじめに

2000年代前半に水中騒音が原因と想定されるイルカやクジラ等の海洋生物の座礁事故が頻発し、船舶の水中騒音が海洋生物に与える影響に関する研究が実施された。これらの調査結果から、水中騒音規制導入に向けた機運が国際的に高まり、国際海事機関（IMO）においても、水中騒音規制導入に向けての活動がなされ、2014年3月に開催されたIMO第66回海洋環境保護委員会（MEPC66）において、非強制ガイドラインである「商船からの水中騒音低減のためのガイドライン（MEPC.1/Circ.833）」が採択された。また、2021年5月に開催されたIMO第76回海洋環境保護委員会（MEPC76）において打ち出された方向性に基づき、ガイドラインのレビューと改正作業に着手し、2023年7月に開催されたMEPC80において、改定水中騒音ガイドラインが承認された。これらの動向を踏まえて、本会は2023年10月に「船舶水中騒音ガイドライン（第1.0版）」を発行した。

本稿では、大型外航商船分野では馴染みの薄い水中騒音に関する技術的な概説を行うものである。

2. 水中騒音について

水中騒音の発生源は、主にプロペラ及び船舶に搭載される機器であり、そのレベルは船体構造及び運航条件等によって変化する。水中騒音は多くの場合は、プロペラキャビテーションにより引き起こされる。特に船尾流れの不均一度が高く、高効率のプロペラを求められる大型肥大船の場合、プロペラキャビテーションに起因し水中に放射される船舶水中騒音が支配的であるものと考えられる。

なお、「水中放射騒音レベル」とは、次式で与えられる音圧レベル（dB）をいう。

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \quad (\text{dB})$$

L_p : 音圧レベル, p_0 : 基準音圧 (= $1 \mu\text{Pa}$)

音圧レベルはその発生源から1mの距離におけるレベルに換算される。

3. ガイドラインの概要

本ガイドラインは、総則、提出図面及び書類、検査、設計要件、水中騒音計測および保守及び運行の6章で構成されている。本稿では、そのうちの設計要件、水中騒音計測について概説する。

3.1 設計要件

船体、プロペラ及び主機及び補機等に対する適切な水中騒音対策設計要件が規定されている。

3.1.1 船体

キャビテーション発生を抑制するために、船殻形状を伴流場が可能な限り一様となるよう設計すること、船体とプロペラの設計は相互に適応させること及び船体への固体伝搬音及び励振反応を減少させるための構造の最適化及び温室効果ガス（GHG）排出量を削減するための技術的対策との調和等を規定している。

3.1.2 プロペラ

通常運転状態下におけるキャビテーションを低減させるために可能な限り均一化された伴流場の中でプロペラ負荷変動を最適化すること及びプロペラ設計を最適化するために、キャビテーション水槽等の施設で模型試験を実施すること等を規定している。

3.1.3 主機及び補機等

冷凍プラント、空気圧縮機等の船舶に搭載する機器に対し、防振架台、動的釣り合わせ、構造減衰等の適切な振動制御方法を講じること、船上設備を適切に配置すること及び基礎構造を最適化すること等を規定している。

3.2 水中騒音計測

海底での音響反射の影響が極限されるISO 17208に準拠した深海域での音響計測評価について規定している。

3.2.1 計測箇所

水深が150m以上もしくは船長の1.5倍以上のいずれか大きい方及び交通量が輻輳しない海域での計測を規定している。

* 開発本部 技術研究所

3.2.2 計測条件

海上試運転時に原則満載状態で行うこと、海象及び気象状態が計測に影響がないこと、BFスケール4以下、風浪階級2以下で実施すること及び主機関は常用出力の85%とすること等を計測条件としている。

3.2.3 計測手順

ハイドロホンまでの最接近距離（DCPA：Distance to the Closest Point of Approach）は100mもしくは船長の大きい方とする。DCPAの許容範囲は規定しない。また、計測に使用するハイドロホンは全指向性で、3台を着底式、浮体式または支援船から吊り下げて設置することとしている。着底式の場合の設置例を図1に示す。

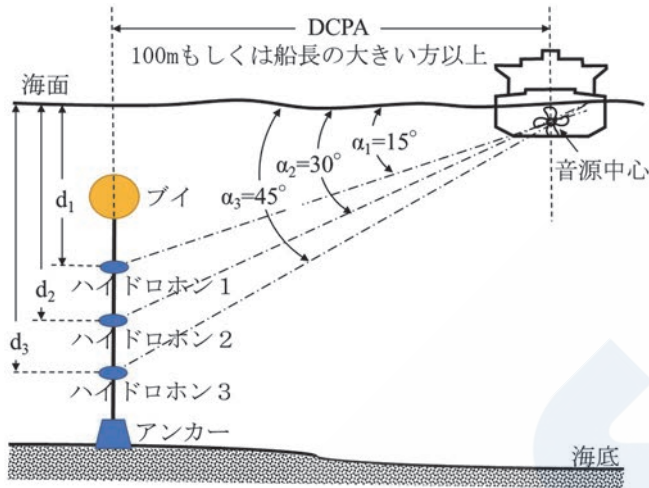


図1 着底式設置例

計測区間は、ハイドロホンを中心として $\pm 30^\circ$ の範囲とすること、航行及び計測回数は、ハイドロホンを中心として右舷側および左舷側に2回とする。試験航路における水中騒音計測構成例を図2に示す。

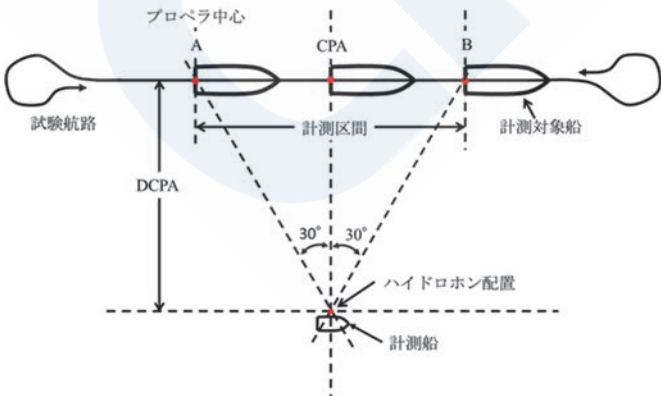


図2 水中騒音測定構成（試験航路等）

3.2.4 分析方法

狭帯域分析（1Hz毎）及び1/3オクターブ分析を

実施すること、背景雑音の処理、距離補正及び海面反射補正等について規定している。

3.2.5 評価基準

船級符号に「*Silent Underwater Noise-X*（略号SUN-X）」の記号を付記する。Xは2021年に実施された一般財団法人日本船舶技術研究協会が実施された大島沖水中騒音計測結果に基づき決定された基準騒音レベルに従って、*Silent Underwater Noise-Controlled*（略号SUN-C）、*Silent Underwater Noise-Advanced*（略号SUN-A）を付与する。なお、詳細な数値についてはガイドラインを参照されたい。

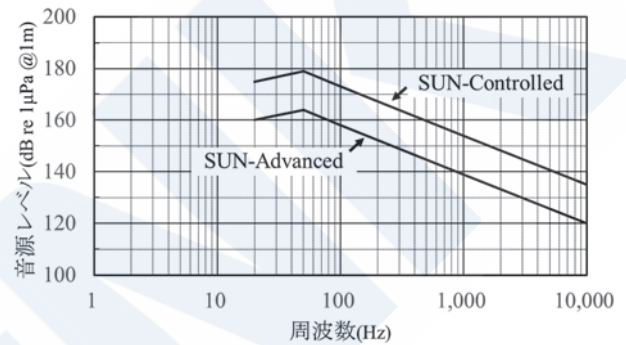


図3 基準騒音レベル（1/3オクターブバンド）

4. まとめ

近年、欧米において船舶から放射される水中騒音も海洋生物に対する環境汚染のひとつと考える方向にある。それに対する国際的な規制の動きに対応した本会としてのガイドライン（第1.0版）について概要を紹介した。本稿が各ステークホルダーにおいて検討の資となれば幸甚である。

既にIMOにおいて水中騒音低減を実効あるものとするために各船舶に対する騒音管理計画の作成等次の段階に向けた議論が進みつつあり、本会としてもそれに対応したガイドラインの適宜アップデート及びそれに対応したサービス提供等を行っていく所存である。

船用燃料としてのバイオ燃料油

十倉 拓也*

1. はじめに

昨今、地球温暖化への懸念から世界的に脱炭素の流れが加速し、海事産業においても脱炭素への取組が進む中で、今後もしばらくは建造されるであろう「油」を燃料とする船舶にとってGHG排出削減が可能なバイオ燃料油が注目されている。本稿ではバイオ燃料油が船用燃料としてどのように使用されようとしているのか、その一端を紹介するものである。

2. バイオ燃料油のニーズ

2023年7月にIMOの第80回海洋環境保護委員会 (MEPC 80) にて「2023年版IMO GHG削減戦略」が採択され、遅くとも2050年頃までにGHG排出ネットゼロとするとの目標が掲げられた。これらの目標を達成すべく、海事産業では従来の石油由来の燃料から、使用時にCO₂を出さない水素やアンモニアといった代替燃料への転換が検討されている。

これらの代替燃料が普及するには技術開発やサプライチェーンの構築、船員の育成、規則整備など課題が多く、普及までに長い時間を要する。しかし、進行する地球温暖化は代替燃料の普及を待ってはくれない。石油由来燃料油を燃料とする現存の船舶からGHG排出を削減する手段は無いのか？

その答えの一つが、船舶の機関設備に大きな対策を必要とせず使用できるバイオ燃料油である。

2.1 バイオ燃料油によるGHG排出削減

このバイオ燃料油とは主に粗バイオ (SVO : Straight Vegetable Oil) や、FAME (Fatty Acid Methyl Ester)、HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) を指す。SVOは植物の実や種の抽出油であり、FAMEやHVOはSVOを原料として製造される。いずれもエンジンで使用すれば石油由来燃料と同様にCO₂を排出するが、原料植物の成長時にCO₂を吸収するため、生産・輸送・消費 (船上での使用) までのプロセス全体、つまり「Well to Wake」でCO₂収支を評価すれば、バイオ燃料油は石油由来燃料よりGHG排出量が少ないと見做すことができる可能性がある。

2.2 バイオ燃料油の使用動機

現在、ARA (Amsterdam, Rotterdam, Antwerp を指す略称) やシンガポールなどではバイオ燃料油と石油由来燃料を基材とする船用燃料油 (以後「バイオブレンド燃料油」と呼ぶ) が供給されており、多くのバイオブレンド燃料油供給事業者がGHG排出削減量の評価のためISCC EU認証 (持続可能なバイオ燃料生産に関する欧州再生可能エネルギー指令 (EU RED II) の要件に準拠していることを証明する認証スキーム) を取得しているようである。

なお、ARAではB30と呼ばれる主にFAMEとVLSFO (Very Low Sulfur Fuel Oilという硫黄分0.5質量%の残渣油) を30 : 70で混合したもの (通称Bio-VLSFO) や主にFAMEとMGO (Marine Gas Oilの略称; 軽油を指す) を30 : 70で混合したもの (通称Bio-MGO又はBio-DMA) が、シンガポールではB24と呼ばれる主にFAMEとVLSFOを24 : 76で混合したものが既に流通している。

ところで、上述のB30のバイオブレンド燃料油の供給価格をご存じだろうか。2023年末時点でVLSFOの約1.5倍強の価格で取引されており、いくら環境に良いとはいえ経済合理性に欠ける状況となっている。それでもなおこのバイオブレンド燃料油を使用するモチベーションは特に欧州で先行するGHG排出規制であろう。

特にEU域内排出量取引制度 (EU-ETS) は2024年1月から海運業界にも適用となった制度であり、EUに寄港する航海で排出したGHG排出量について、船級等の第三者機関の検証を受け、当該GHG排出量に相当する排出枠を船会社が購入し、管轄当局へ償却 (納付) することが求められるというものである。その罰則規定は厳しく、仮に2年以上連続で管轄当局への報告を忘れるなど必要排出枠を償却しなかった場合、EU/EEA加盟国への入港が拒否される可能性がある¹⁾。

この対応のため、GHG排出を削減する手近な方法は減速運転 (Slow Steaming) による燃料消費量の削減である。一般的に燃料消費は速力の2乗に比例することから、理論上は速度を1/2にすると燃料消費は1/4となる。そのため多くの船舶は船速を落

* 開発本部 技術研究所

として運航することを選択している。一方、コンテナ船や自動車運搬船などのスケジュール確保が重要な船舶は船速を下げるのが難しいため、バイオブレンド燃料油はこのような船舶からのニーズが高まっているとの調査結果もある²⁾。

2026年からは日本版GHG排出量取引制度であるGX-ETSが本格稼働することから、日本国内でもバイオブレンド燃料油のニーズが出てくることが予想される。

3. バイオブレンド燃料油の性状特徴

船用燃料として想定されているバイオブレンド燃料油を使用するにあたって、その性状特徴を認識しておくことが重要となる。この基材である「バイオ燃料油」がもつ流動点が高く酸化し易い（酸化し易さはSVOとFAMEのみ）という特徴と、石油由来燃料である「VLSFO」の性状にばらつきがあるといった特徴について紹介する³⁾⁴⁾。

3.1 バイオ燃料油の特徴

前述の通りバイオ燃料油はSVO, FAME, HVOに分類される。

- **SVO : Straight Vegetable Oil**
主に植物油（使用済み食用油である廃食油（UCO : Used Cooking Oil）を含む）
- **FAME : Fatty Acid Methyl Ester**
メチルエステル処理した植物油（アルカリ触媒によりSVOとメタノールを反応させ製造）
- **HVO : Hydrotreated Vegetable Oil**
水素化した植物油（高温高压下で触媒によりSVOと水素を反応させ製造）

また、各バイオ燃料油のサンプルを撮影したものを図1に示す。

全て質量は6gだが、SVOは他の2つに比べ体積が最も小さく色も濃い。対照的にHVOは最も体積が大きく、色はほぼ無色透明であり、FAMEはそれらの中間的な存在である。これは、FAME製造におけるメチルエステル処理により分子量が小さくなり密度が下がった結果、重量あたりの体積がSVOに比べ増え、また、処理過程で不純物が取り除かれるため、光の透過度がSVOに比べ増したためと考えられる。そして、HVOについては、製造において不純物が取り除かれることに加え、水素化処理により分子量が小さくなり酸素原子もなくなったことで密度が下がった結果、FAMEよりも重量当たりの体積が大きくなり、精製による不純物除去に加え水素化処理による不飽和結合の消失等により光の透過度が更に増したと考えられる。

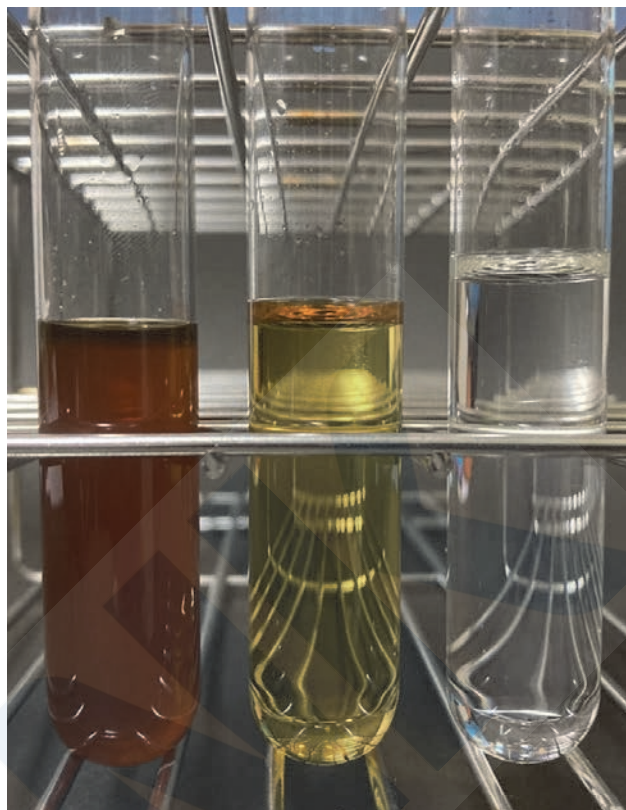


図1 各バイオ燃料油サンプル（全て6g／左からSVO（廃食油）、廃食油FAME、HVO）

これらのうち、HVOは水素化処理により植物油の特性が消失しており、軽油に類似した性質をもつ。

一方、SVOとFAMEには植物油の特徴である酸素と反応し易いという傾向があり、これは分子構造に炭素の二重結合が含まれることで生じる。その結果、酸化が進むと最終的にギ酸や酢酸などの低級脂肪酸が生成され、これらは弱酸であるものの燃料油タンクの底に溜まる水分（ドレン）に溶解込み凝縮すれば金属が腐食する環境が生じる可能性がある。加え、SVOやFAMEは極性をもち、酸化が進むほどこの極性が強まる。この極性により、機器のシール部品などに使用されるニトリルゴムなどのゴム製品を膨潤させ、強度を低下させてしまう可能性がある。

なお、実際には酸化防止剤の添加や石油由来燃料との混合により酸化反応が緩やかになる可能性もあるが、バイオブレンド燃料油の基材にSVOやFAMEを使用する場合は上述のような現象が発生する可能性があることを特徴として認識しておくべきである。

また、SVO, FAME, HVO全てに関連するのが低温流動性である。上述にてSVOやFAMEは分子構造に炭素の二重結合を含むことを紹介したが、この二重結合が少ない場合、酸化はしにくくなるが流動点（流動性を失い固形化する温度）が高くなる傾

向がある。また、HVOの場合は流動性を向上させる異性化処理がなされていなければ同様に流動点は高くなる。流動点が高ければ常温でも流動性を失って固化化してしまう可能性があることから、バイオブレンド燃料油は流動点が高い可能性があることも特徴として認識しておくべきである。

3.2 VLSFOの特徴

なぜ石油由来燃料の特徴を紹介するのか？ それは、4年前の世界的な規制強化により性状が大きく変化してしまったためである。2020年にMARPOL条約において船舶の排ガスに含まれる硫黄化合物(SO_x)の排出規制が厳しくなった。多くの船舶は規制対応のため今まで使用してきた硫黄分3.5質量%のHigh Sulfur Fuel Oil (HSFO)の使用を止め、硫黄分0.5質量%のVLSFOを使用することとなった。

図2は本会で収集したHSFOとVLSFOの性状データであり、VLSFOはHSFOに比べ動粘度や密度が大きく低下していることがわかる。また、図2における動粘度毎の件数分布を図3に示す。

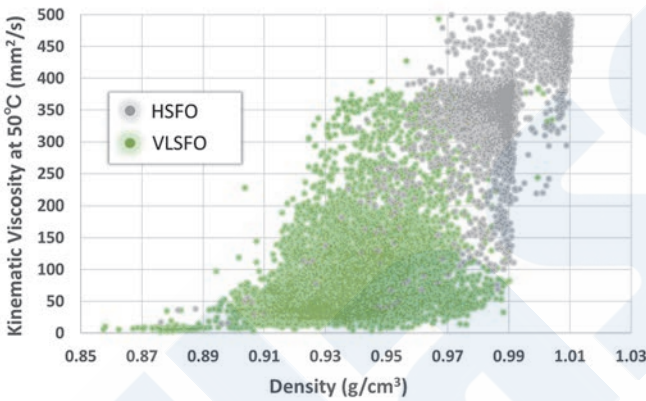


図2 HSFOとVLSFOの密度－動粘度分布

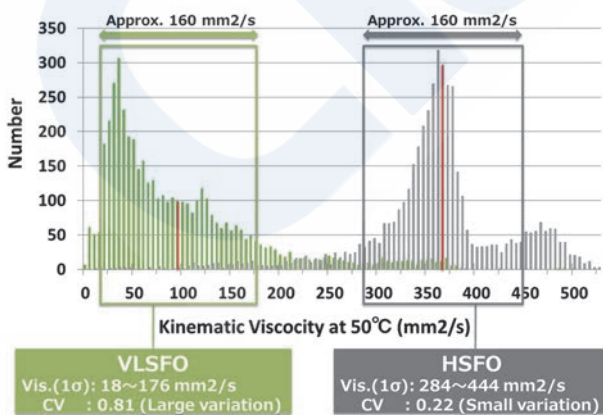


図3 HSFOとVLSFOの動粘度毎の件数分布

HSFO、VLSFOいずれも平均値を中心とする160mm²/sの範囲に約70%が分布（平均から±1標

準偏差(1σ)の範囲)しており一見ばらつきは変わらないように見えるが、データのばらつきを示す変動係数(CV: Coefficient of Variation)はHSFOが0.22であったのに対し、VLSFOは0.81となっておりVLSFOの動粘度ばらつきが大きくなっていることがわかる(一般的に変動係数が1を超えるとばらつきが非常に大きいと判断される)。

このばらつきは船舶における作業に大きく影響する。多くの船舶は機関室内だけでも燃料油加熱のために少なくとも4つのヒーターと燃料油配管保温用に配管トレースヒーターが設置されている。燃料油はこれらの複数の燃料油加熱設備の絶妙な加熱バランスで加熱されているが、それぞれの設備の温度制御は連携しておらず、船員により各設備の設定温度変更などの調整がなされている。そのため、燃料油の加熱温度が大きく変わる場合、それぞれの加熱設備を試行錯誤で調整し、新たな加熱バランスを見つけるなど作業が煩雑になる。

そして、加熱が必要となる理由は船用重油の動粘度はエンジンで使用するには高く、加熱して動粘度を下げる必要があるためである。エンジンで使用するためにはエンジン入口で約12mm²/s(常温の「みりん」程度の動粘度)まで動粘度を下げる必要がある。図3に示すHSFOとVLSFOの動粘度範囲に対し、それらを12mm²/sに調整するための加熱温度範囲を図4に示す。

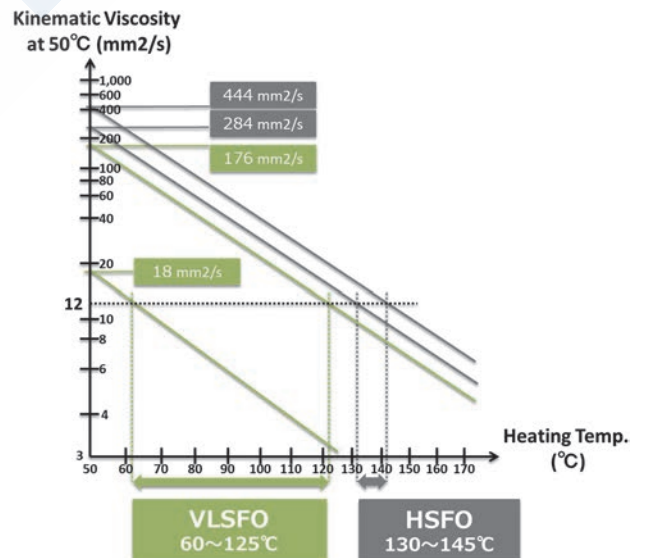


図4 HSFOとVLSFOの加熱温度範囲

HSFOの加熱温度幅は約130°C~145°Cと狭かったのに対し、VLSFOは60°C~125°Cと広がっている。これはVLSFOを給油する度に加熱温度の大きな調整が必要となる可能性が高いことを示している。燃料油の温度調整が適切でなければエンジンで

異常燃焼が起こりエンジンの運転に支障が出る可能性がある。これに加え、VLSFO自体の安定性や流動点によっては加熱し過ぎればアスファルテンスラッジが、加熱不足でワックススラッジが燃料油中に発生する可能性がある。これらのスラッジがフィルターに詰まると燃料油をエンジンに十分供給できなくなり、これもまたエンジンの運転に影響する。そのため、VLSFOは温度調整に注意が必要な燃料であることを特徴として認識しておくべきである。

4. バイオブレンド燃料油の使用対策

船舶にとって安全は何よりも優先される。船舶のトラブルにより海難事故が発生すれば、船舶を運航している船員の生命を脅かすだけでなく、油の流出による海洋汚染や、航路を阻害することによる海上物流への影響も計り知れない。

これまでにバイオブレンド燃料油を実船で中短期的に使用した船舶においてトラブルが起こったという情報は聞こえてこない。しかし、長期的にSVOやFAMEを基材とするバイオ燃料油を使用した場合のリスクは未知数である。そのため、長期的な使用にあたり必要となる船舶の機関設備対応、トラブル燃料を避けるための対策、貯蔵時や使用時の対策について以下に紹介する³⁾。

4.1 船舶の機関設備対応

バイオブレンド燃料油の使用に向けた機関設備対応として、主にSVOやFAMEのもつ特徴によるゴム膨潤や金属腐食への対策が主となり、ニトリルゴムが使用されるシール部品や、腐食環境が起こりうる金属部品などが対象として挙げられる。エンジン、ボイラー、清浄機、ポンプ、バルブ、フィルターなど燃料油を扱う機器について、各メーカーに使用予定のバイオブレンド燃料油の性状や想定される貯蔵期間などを伝え、メーカーのアドバイスに従い部品交換や貯蔵期間を検討することが推奨される。

4.2 トラブル燃料を避けるための対策

トラブル燃料を避ける対策としては、現在の船用燃料でもISO8217による品質確認がなされており、基材に軽油相当のHVOを使うのであれば同規格への適合で十分であると考えられる。しかし、基材にSVOやFAMEを使用するのであれば同規格への適合に加え、酸化安定性を確認することも重要となる。というのも、現状のISO8217には酸化し易さを評価する項目が無いためである。そのため、自動車用のバイオ燃料規格であるJIS K 2390, EN 14112, EN 15751などに規定されるランシマツ法などを実施しておくことが推奨される。このランシマツ

法はSVOやFAMEが酸化されることで発生する水溶性の低級脂肪酸（ギ酸や酢酸）の発生度合いから酸化し易さを評価しており、船舶に補油する直前にこの試験を実施すれば特に金属腐食に懸念がある燃料油の入手リスクを下げるができる可能性がある。なお、上述の機関設備対応で十分とも考えられるが、機関設備は金属部品で構成されているため腐食要因を最小限にしておくことは重要である。

4.3 貯蔵時や使用時の対策

貯蔵時については、一定の品質が確保された燃料油を入手したとしても、その品質は永久に担保されるわけではなく時間経過による酸化劣化は避けられない。そのため、バイオブレンド燃料油を短期間で消費することが重要であるが、運航状況によっては長期間貯蔵せざるを得ない場合もある。よって貯蔵時の酸化を抑制することも重要となる。アレニウスの法則では貯蔵温度が10℃高くなれば劣化速度は2倍になるとされている。そのため、酸化し易いSVOやFAMEを基材とするバイオブレンド燃料油を使用する場合、燃料油の加熱温度を上げ過ぎず、固化を防ぐため流動点まで温度を下げ過ぎずを使用することが推奨される。（その他、酸化防止剤を燃料油に添加して酸化抑制することも対策の一つに挙げられる。）

但し、約0～40℃は微生物にとって適温であり、温度に加え栄養源（炭化水素）と水分の3要素が揃うと燃料油と水分の境界面でカビやバクテリア、酵母、放線菌等が繁殖し、スライム状や海苔状のスラッジが発生する可能性があり、微生物性スラッジの抑制も重要となる。このスラッジが燃料油配管のフィルターに詰まればエンジンなどに燃料油を十分供給できなくなる。加え、この水分はSVOやFAMEの酸化により発生する水溶性の脂肪酸を凝縮して金属の腐食環境を作る可能性もある。そのため、各燃料タンクの底に溜まるドレン水を頻繁に除去することが推奨される。（その他、防カビ剤を燃料油に添加して微生物性スラッジを抑制することも、微生物性スラッジ対策の一つに挙げられる。）

4.4 使用対策まとめ

使用時は、特に動粘度のばらつき対策として、燃料油の温度調整に注意を払うことが重要となる。

また、各機器から排出される燃料油ドレンは流量が多くないため、ドレン排出経路にバイオブレンド燃料油が長時間留まり、酸化が進むことで腐食環境を生じさせる可能性がある。これを予防することは難しく、腐食を早期察知するために各機器の燃料油ドレンラインも今まで以上に入念にチェックすることが推奨される。

5. おわりに

海運業界と同様に長距離を運航する航空業界においても、粗バイオ（SVO）を原料とする持続可能な航空燃料（SAF：Sustainable Aviation Fuel）の検討がなされている。船舶も航空機も常温常圧で液体かつエネルギー密度の高い「油」に依存してきたため、油からの脱却はそう簡単な話ではない。

割高だがGHG排出削減効果が期待できる「油」であるバイオ燃料油やSAFは、原料である粗バイオの供給可能量に限界があるため、少なくともこれらの2つの業界が必要とする量を確保することは難しい。そのため、海運業界にどの程度のバイオブレンド燃料油が流通するかは不透明な状況である。更に、このバイオブレンド燃料油を使用する主なモチベーションは国際規制や地域規制であり、規制の内容やバイオ燃料油の価格によってはGHG排出量の削減よりGHG排出枠を購入するなど規制コスト負担の方が、経済合理性が高いという可能性も想定される。

規制の本来の意図であるGHG排出削減とは逆行する可能性が考え得ることもバイオブレンド燃料油の流通の不透明さを助長している。

とはいえ、バイオ燃料油は現存する船舶だけでなく、今後もしばらく建造が続く油を燃料とする船舶にとって限られたGHG排出削減手段である。今後の規制内容やバイオ燃料油の価格動向を注視しつつ、バイオブレンド燃料油が本格的に流通する可能性も想定し、長期的な使用も視野に入れ事前の準備をしておくべきであろう。

引用文献

- 1) EU, FAQ - Sanctions and enforcement of Maritime transport in EU Emissions Trading System
- 2) 国土交通省海事局，船舶におけるバイオ燃料の利用に関する調査検討委員会 船舶におけるバイオ燃料の供給可能性に関する調査結果（2023年12月）
- 3) 一般財団法人日本海事協会，バイオ燃料使用に向けたテクニカルガイド（2023年12月）
- 4) 十倉，第93回（令和5年）マリンエンジニアリング学術講演会シンポジウムIMO 2020適合燃料油"VLSFO"のレビュー（2023年9月）