

# ClassNK 技報

特集記事：デジタルイゼーション

No.1

2019年（I）



—目 次—

ClassNK技報の創刊に際して……………会長 富士原 康一…… 1

特集記事 デジタライゼーション

デジタライゼーション特集について……………執行役員 技術研究所長 松本 俊之…… 3

海事分野におけるデジタライゼーション……………(株)MTI 安藤 英幸…… 5

デジタライゼーションを活用したビジネス変革の取組みが、海事分野においても活発になっている。本稿は、海事産業におけるデジタライゼーションについての基調的な考えを纏めたものである。まずこれまでのコンピューター技術活用の歴史を振り返り、続いて今般のデジタライゼーションの本質やデジタルツインについて述べる。さらに、データ解析におけるドメインの専門家との協業の役割やデータ共有のためのオープンプラットフォームについて述べる。最後に、海事産業の課題とデジタライゼーションの役割を述べて、纏めとしている。

サイバーセキュリティの現状と船舶における課題

……………KDDIデジタルセキュリティ(株) 福島 健二…… 13

船舶に対してのサイバー攻撃のリスクが増加している。その根底には、衛星通信経由のインターネット常時接続化、船舶IoTを始めとした船舶のデータ利活用促進、船用機器の汎用OS化などがある。船舶のシステムが、陸上のシステム的环境に近づくことで想定されるサイバーリスクについて、陸上でのサイバー攻撃の知見を基に考察した。

人工知能の現在地と付き合い方

……………滯標アナリティクス(株) 井原 渉, 水村 オリビア…… 19

1956年のダートマス会議からAIの歴史は始まった。しかし、AIは2度のAIブームの後に2度の冬の時代を経験した。AIの歴史からみた、AIの現在における技術を俯瞰する。その上で、AIにできない事、AIが得意な事をまとめ、適切なAIに対する向き合い方を示唆する。これによって、AIに対する不必要な警戒を除き、今の3度目のAIブームが社会に定着する事を推進したいと考える。

NKのデジタライゼーションの取り組みについて

……………デジタルトランスフォーメーションセンター…… 25

近年、海事産業においてもデジタライゼーション、さらにはその先のデジタルにおける業務変革(デジタルトランスフォーメーション)の動きが活発になってきている。NKは船級協会として、これまでもIT基盤の整備及び関連サービスの提供などの取り組みを行ってきたが、現在さらにこの動きを加速させている。本稿では、NKのこれまでの取り組みと共にこれからの海事産業のデジタルトランスフォーメーションに向けた活動を紹介する。

## NKの自動運航船に対する取組み ..... 技術研究所..... 31

国内及び海外において自動運航技術の研究開発が盛んになってきており、研究段階から開発段階へ進展しつつある。既に実船での実証実験も実施され始めてきている。そういった状況の中で、本稿では、船級協会の立場から自動運航船の安全性をどのように評価すべきかについて、その考え方を中心に記載する。

### 技術一般

## 「2020年からのSO<sub>x</sub>排出規制適合油の使用に関するガイダンス」の概要 ..... 技術研究所..... 35

MARPOL条約附属書VIの第14規則に定めるSO<sub>x</sub>及びPM規制により、2020年1月1日以降、一般海域で使用される燃料油中の硫黄分の規制値は従来の3.50% m/m以下から0.50% m/m以下に引き下げられる。

本会では、同規制に適合した燃料油（規制適合燃料油）の使用時に一層考慮すべき5つの燃料性状に対して、想定される潜在的リスク、およびリスクを軽減するための適応策について整理をしたガイダンスを発行した。本稿では、その概要を紹介する。

## 水中検査へのROV活用に関して ..... 技術研究所..... 43

入架又は上架による船底検査の代替方法として潜水士を起用した水中検査が実施されているが、ROV（Remotely Operated Vehicle）の活用も新たな可能性として期待できる。その有効性を検証すべく、ROVを用いた水中検査トライアルを実施した。本稿ではその結果について紹介する。

## 2018年度 損傷まとめ ..... 技術研究所..... 49

本稿では、最初に本会船級登録船を対象に、2018年度（1月1日から12月31日まで）に報告された海難事故について報告する。次に、バラスト水管理とSO<sub>x</sub>排出に関する規制強化への対応が進められている中で、バラスト水処理装置の不具合と燃料油が関係すると推定される機関損傷が報告されていることから、これらの損傷について代表的な事例を紹介する。

## AISデータを用いた疲労強度評価用荷重の設定 ..... 船体開発部..... 59

実態に即した合理的な疲労強度評価を行うためには、船舶が実際に受ける荷重を用いる必要がある。そこで、著者らは船舶が実際に受ける荷重を把握するため、約3年間に亘る約25000隻分のAISデータを解析し、船種、船のサイズ毎の標準的な航路を特定した。また、特定した標準的な航路における波浪発現頻度表を作成し、この頻度表に基づく適切な設計荷重の設定方法について検討した。

## 帆走式洋上風力発電システムの特性解析 ..... 再生可能エネルギー部..... 69

帆走型洋上風力発電システム（Ocean Energy Harvesting Vessel）の基本概念に基づいて、パラメトリックリサーチ法による基本特性解析を行った。まず帆走性能を評価する簡略化した演算ソフトによって各種帆走装置の比較を行い、AIST-Rigと名付けられた形式を選択した。次に空中翼の揚力係数など代表的な特性についてのパラメトリックリサーチを行い、結果として空中翼の揚力係数と船体の摩擦抵抗係数が全体性能を支配する最も重要な因子であることが明らかとなった。

本稿では、IMO（国際海事機関）における国際条約等の審議動向を紹介する。今号では、IMO第74回海洋環境保護委員会（MEPC 74）及びIMO第101回海上安全委員会（MSC 101）の審議概要を紹介する。





## ClassNK技報の創刊に際して

日本海事協会 会長

富士原 康一  
Koichi Fujiwara



ClassNK技報創刊号の出版にあたり、一言ご挨拶を申し上げます。

これまで、弊会では技術的な情報発信の場として、「日本海事協会会誌」（和文）および「ClassNK TECHNICAL BULLETIN」（英文）をそれぞれ発行して参りました。

近年の情報通信技術（ICT）やAI技術の著しい発展と社会実装によって、Society 5.0に象徴されるような新たな社会が出現しようとしています。この動きは、海事産業においてもデジタルトランスフォーメーションとして、急速な進展を遂げようとしています。

一方、海事産業はGHG排出削減という地球的な課題に直面しており、遅くとも2050年までには国際海運におけるGHG排出量を、2008年比で半減するという目標達成に取り組む必要があります。

このような状況の下、海事産業においても他の産業と同様に、従来の枠組みを超えた、革新的な研究開発、技術開発の取組みが求められています。

弊会におきましても、2017年に策定いたしました研究開発ロードマップに沿って、中長期的な展望に立った研究開発に取り組んで参ります。

造船や海事産業を取り巻くこのような環境の変化に対応し、技術情報の発信をより強化することを目的として、今般「日本海事協会会誌」および「ClassNK TECHNICAL BULLETIN」を統合し、総合的な技術情報誌として「ClassNK技報」（和・英）を発行することと致しました。

海運産業における新たな変化の動きに対して、この「ClassNK技報」がいささかなりとも業界の皆様のお役にたつことを願っております。

最後に、日頃の皆様からのご愛顧に感謝申し上げますとともに、引き続きのご指導、ご支援を賜われますようお願い申し上げます。



## デジタルイゼーション特集について

執行役員 技術研究所長 松本俊之

冒頭の富士原会長のご挨拶にありますように、弊会では情報技術の発信をより強化することを目指して、総合的な技術情報として「ClassNK技報」を新たに発行することと致しました。

ClassNK技報第1号では、海事産業が直面しているデジタルイゼーションについて、特集を組みました。

特集では、海事分野におけるデジタルイゼーションに関する基調的な考えを株式会社MTIの安藤様に纏めて頂きました。また、KDDIデジタルセキュリティ株式会社の福島様にサイバーセキュリティの現状と船舶における課題について、濤標アナリティクス株式会社の井原様、水村様に人工知能の現在地と付き合い方について、それぞれご執筆を頂きました。この場を借りて、厚く御礼申し上げます。

さらに、デジタルイゼーションに関連した弊会の活動や、自動運航船に関する弊会の取組みにつきまして、それぞれご紹介させて頂いています。

海事産業におけるデジタルイゼーションの取組みにおいて、本特集がいささかなりともお役に立てれば幸いです。





# 海事分野におけるデジタルライゼーション

安藤英幸\*

## 1. はじめに

デジタルライゼーションやデジタルを活用したビジネスの変革についての関心が高まり、従来型産業でも、デジタルライゼーションを統括するCDO（Chief Digital Officer）と言った責任者の役職を設けたり、デジタル専門部署を設置したりする企業の取り組みが見られる。何をデジタルライゼーションの戦略とするのか、デジタル化を担うのは新しいデジタルの部署かあるいは既存の事業部署か、それぞれの置かれた状況で様々な模索、試行が行われている<sup>1)</sup>。

従来型産業の経営陣がデジタルライゼーションに力を入れる背景には、GAFGAが体現するように、コンピュータやインターネットのパワーを、自社の活動に組み入れないことには、中長期の事業戦略で競争力を失う危機感があるのだろうと思う。

こうした動きは、海事産業にも押し寄せており、欧米や日本の船会社、大手メーカーを中心に、CDOや専門の部署を設置する同じような動きが見られるし、船級協会においても検査など船級サービスのデジタル化やデジタルライゼーションの流れに沿ったガイドラインの作成や規則の改定が競って行われるようになってきている。

著者は、これまで大学、造船、海運で、海事分野でのコンピュータ技術の応用に関する研究開発に関わってきた。本報では、最初に、過去に日本が進めてきたコンピュータ技術の活用の歴史を振り返り、次に、今般のデジタルライゼーションの本質、それとの関連においてデジタル・ツインについて述べ、自身のこれまでの経験・仕事に基づき、データ解析におけるドメインの専門家との協業の役割、データ共有のためのオープンプラットフォームについて述べる。最後に、海事産業の課題とデジタルライゼーションの役割を述べ、まとめへと進める。

## 2. 海事分野におけるコンピュータ技術利用

ところで、今回のデジタルライゼーションは、従来の情報システムの導入と何が異なるのだろうか？まずは、日本の造船や海運におけるこれまでのコンピ

ュータ技術導入を簡単に振り返ってみたい。

造船や海運は、他産業と比較しても早い段階で最新の情報技術を導入してきた。造船では、1970年代からメインフレームを導入して有限要素法（FEM）と言った高度な数値計算手法の構造設計への活用を進め、1980年代後半にはワークステーション上のCADを用いた詳細設計やそこからNC工作機械と言った生産システムへのデータ出力による設計作業の合理化が行われた<sup>2)</sup>。

また、水槽での模型試験とCFD（数値流体力学）を組み合わせて船型開発を行う技術や、プロダクトモデルによる生産プロセスのシミュレーションや生産計画の利用など、造船の船型開発と生産性の向上に貢献してきた。

海運でも、造船と同じ時期、1970年代にメインフレームの導入が行われ、B/L（船荷証券）の発行や貨物情報の管理と言った業務の合理化が進められ<sup>3)</sup>、その後、コンテナ船や自動車船など船種毎に本船の積付けコンピュータの導入によるオペレーション業務の合理化や、船舶運航や船舶管理のための運航管理システムの導入が進んだ。

また、船舶の設備装置そのものについても、1960年代から自動操舵のためのオートパイロットの導入<sup>4)</sup>、同じ時期の、夜間の機関室業務の無人化のためのMO（“エムゼロ”と呼ぶ）仕様の策定<sup>5)</sup>と統合制御監視システムが開発された。1990年代以降、GPSや電子海図（ECDIS）の導入やオートパイロットと連携したTCS（Track Control System）、AISの導入など、コンピュータの技術革新と共に、それを使った制御技術や情報システムが導入されてきている。主機関においても、従来、カムを用いて機械的に実現していた燃料噴射をソフトウェア制御に置き換えた電子制御エンジン<sup>6)</sup>が2010年代に普及するなど、コンピュータ技術の活用が進んできた。

このように過去の経緯を振り返ると、造船、海運共に、その時々最新のコンピュータ技術を自社の業務、そして船舶そのものに取り入れて合理化・効率化に利用してきたことが分かる。

\* 株式会社MTI

### 3. デジタライゼーションの本質

こうした従来のコンピュータ技術、情報システムの導入と、今般のデジタライゼーションを比べると、もちろん携帯端末の利用やAR、VRと言った便利なデジタルの道具を活用する面も重要ではあるが、この点は従来の情報システムの導入でも取り組まれてきたところであり大きな違いは無い。

今回、デジタライゼーションの目的として言われていることは、従来の産業のあり方の中に内在する無駄を明らかにし、それを削減し、合理化を進めると言う視点があり、そのためにデータやシミュレーション、最適化などデジタルの道具を使い、ある意味で、複雑な現実世界にコンピュータの世界の論理を持ち込む発想がある。デジタルの道具を活用することで、会社の枠組みを超えた合理化・効率化を進める。よりリーンな、贅肉をそぎ落とした産業のあり方を目指し、顧客やサプライヤーとの新しい形の連携を通して、従来よりも競争力のある産業構造を作るような発想が、デジタライゼーションという言葉には本質的に含まれている。

データによって状況が視覚化され、透明性が高まり、分析によって無駄が明らかになり、顧客と連携して、筋肉質な状況を目指すことを企業の競争力に変えられないか？それがデジタライゼーションに積極的に取り組む経営者の視点ではないかと思う。

### 4. デジタル・ツイン

昨今、注目されるキーワードにデジタル・ツインがある。ここでは現実世界の双子のモデルをコンピュータ上に作り、IoTによって現状のデータを取り出してコンピュータ上のモデルに反映し、コンピュータ上でシミュレーションや最適化計算を通して、最適解を導き、現実世界に反映させようと言うもので、ここでも基本的には、現実世界に存在する無駄を浮き彫りにして、改善することがコンセプトになっている。

デジタル・ツインのコンセプト自体は、CAD/CAM/CAEなどエンジニアリングにおけるコンピュータ利用から発展したもので、PLM (Product Life Cycle Management) の考え方の中で、従来、製造業の中に閉じていた製品モデルを製品の運用まで広げると言う発想に基づいている。

一方で、デジタル・ツインは非常に強力なコンセプトで、様々な産業分野において、それぞれの視点で現実の一部を切り出してコンピュータ上にモデル化して表現して、IoTでセンシングした現在状況を

モデルに反映し、先の将来についてシミュレーションや最適化計算を行い、おかれた現状において、どのようにふるまうのが最適なのか、今後、企業はその時々の重要な判断を、almost realとでも言うべきシミュレーション予測をベースに行い、常に最適化された選択肢を取ることを志向すると思われる。

例えば、Uberの配車サービスを例にとると、スマートフォンのアプリに現在、周囲にいる車が表示され、それぞれの場所から乗車する現在地までの予測到着時間が表示され、車種や料金、ドライバーのランキングと言った属性情報も参考にしながら、配車する車を選ぶ。Uberに限らずタクシー会社の配車サービスや配車センターのシステムでも同じようなフリート管理が行われていると思うが、IoTで得た車の位置情報と最適ルート計算のアルゴリズムに基づく着時間予測、属性情報のデータベースを合わせて、これを使い勝手の良いアプリにして提供する。こうして利用者は自身の基準で最適なドライバーをいつでも見つけることが出来、ドライバーも仕事が出来るときだけサービスを提供する。ユーザーも、ドライバーも支払いは全て電子的に行う。このように従来あった様々なレベルの無駄を省く点でデジタライゼーションがイメージする例であり、また、その実現にデジタル・ツイン的なツールが中心的な役割を果たしている。

もう一つのデジタル・ツインの例として、GE社の風力発電用タービンの例を示す(図1)。風力発電用タービン設備は既にネットワークに接続され、センサーデータが送られると言う意味でIoT化しており、運転状況はリモートで監視することが出来る。このデータを活用して、コンピュータ上に発電所を構成する風車のフリートをモデル化し、この例ではCFDシミュレーションと最適化計算を組み合わせ、それぞれの風車が向くべき方向を最適化して、置かれた風況下での発電量を最大化するコンセプトが示されている。

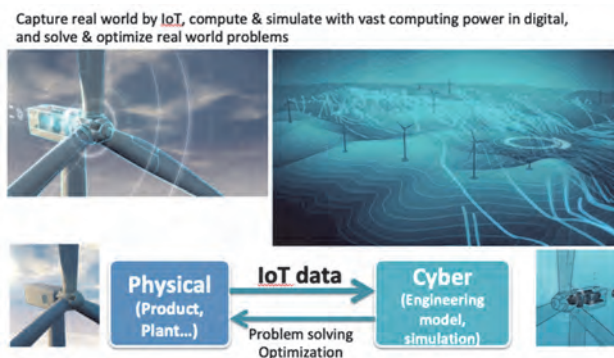


図1 GE社の風力発電タービンにおけるデジタル・ツインの事例

ここで重要と思えるのは、CFDに関するエンジニアリングの知見は、従来は設計・生産に必要な技術知識であったが、こうした風力発電のオペレーションにおけるデジタルライゼーションを進める上でも、エンジニアリングの知見が必要になると言う点である。IT技術者による協力だけでは最適なオペレーションは実現できず、エンジニアリングとITの両者の専門家が協力し、それぞれの技術を上手く組み合わせることなくしては、実際のデジタル・ツインの実現、活用は難しい。

海事産業も同様であるが、従来型産業におけるデジタルライゼーションでは、エンジニアリングなどドメインの専門家とITの専門家との協業が非常に重要になる。

## 5. ドメインの専門家との協業

さて、以前2003年頃、大学院の教員として勤務していた際、大学院修士課程の学生と一緒に、船の機関室のトラブル事例のテキストマイニングによる分析に取り組んだ<sup>9)</sup>。発端は、IEEEのIntelligent Systems誌で、ある航空会社で、航空機の部品の交換時期を、過去のメンテナンス記録から予測するのに飛行機から送られるセンサーデータと保守記録の機械学習を用いるとの記事を読んだことであったが<sup>10)</sup>、当時、ベテランの機関長の方から随分と色々と指導を受けながら、まずはデータのあった過去の故障報告書を分析するという研究を行った。

細かな話は省略するが、自然言語処理や人工知能の技術を色々と利用して、機関の故障について、コンピュータで過去のトラブル事例を分析し、人間がそれを補完することで、信頼性工学で用いられる故障木 (Fault Tree) を少ない手間ですべて抽出する、と言う研究を行った。

当時はまだビッグデータと言う言葉は無く、こうしたデータからのパターン発見は、データマイニングと呼ばれていた。データマイニングでは一般に、データを整理、様々な機械学習の手法によって解析してパターンを発見して、最終的に、そのパターンをドメインの専門家がレビューして評価を行い、何らかの知識を発見すると言った、データからのお宝探しのようなことが目的だったので、その意味では、一通り、そうしたプロセスを実現する手法の構築はした。

しかし、そうして過去の故障報告書から得られた知識（この場合には故障木）を、日本郵船の機関長の皆さんに説明したところ、「なるほど、素人にしてはよく整理をしたね。」、と言うようなことくらい

までは評価を頂いたが、当然のことながら、大ベテランの機関長を唸らせるような価値ある知識と言うようなことは出来なかった。

これは当然のことで、ある意味で、故障報告書の内容を、故障木の格好に再整理しただけのことであって、当然、記述された以上の内容にはならない。やはり、本来は、そうした故障報告書の原因の裏にある真の要因 (root cause) を、メーカーの設計者やあるいは機関長が掘り下げて、それを防ぐための方法や、あるいはそうしたトラブルが起こった後の対処を検討することで、本当の意味での価値ある知見が得られるのである。

もっとも、その後で、我々の研究からヒントを得て、先コメントをした機関長の部署では、過去の事故を洗い出し、その時に、それによる損失金額を教師データとして付加し、損失規模の大きなものに絞って、詳細な原因分析を行い、考え方としては、データマイニング的な仮説検証の繰り返しと、教師付きの機械学習に似たやり方で、合理的に対策マニュアルを作成した。その後、対象とした機関トラブルについてはトラブル数と結果としての損害額を減らすことが出来た、と言う後日談を聞いた。やはり、当事者であるドメインの専門家が、データ解析の考え方を理解して、問題の解決に当たろうと言う強い動機を持って取り組む場合に、こうしたデータマイニングであり、今で言うところのビッグデータ的な取り組みは価値が変わると言う一つの例かと思う。

それから15年以上が経過し、今となっては、機関のビッグデータ活用にあたる専任チームを腕利きの機関長がリードし、引き続きドメインの専門家として貴重な視点や判断を示し、全体の活動をリードしながら、一方で大量のデータをハンドリングしたりや機械学習のプログラミングを活用して機関長がイメージする数値を算出することに長けたデータサイエンティストが協力して、船からのセンサーデータを活用して異常発見に取り組んでいる様子を見るようになった。まさにこうした協業こそが、デジタルライゼーションによる仕事の変革なのだろうし、データを活用して真に問題を解決するアプローチだと言う確信を深めている。

また、そうした状況を作り出すためには、一方で、センサーデータを集め、それを解析出来るような形に整え、そのためのシステムのアーキテクチャを設計・開発・運用するデータのハンドルに長けたインフラのIT技術者が必要であるし、このような基盤のシステムを開発し保守を続ける費用も必要である。これらトータルの費用に対する効果も踏まえて、データ活用に取り組むことへの経営のサポートも必要

であるし、デジタルライゼーション的な活動を、組織の中に導入していく支援、事業部署の理解を得て彼らによるドライブも必要である。このように会社が変わっていくことが、デジタルライゼーションによる変革なのだろうと思う。

また、デジタルライゼーションと言うことで、コンピュータのパワーを活用し、手間やコストをかけないように標準化やツール導入を進め、許容できる手間とコストで継続的にデータを活用出来るサイクルが回り、データから継続的に学習する組織（learning organization）を目指し、それが一つのデジタルライゼーションで目指すべき理想なのではないかと思う。

先の機関長とこの話をすると、考え方としては、データを集めてそれを分析して、それに基づいて客観的に判断するという活動は、随分昔から会社の中で、現場では、伝統的に行われてきているし、現にデータの集め方の手順を示した公文もあり、誰でもがデータ収集、解析が出来るようにしてきた、と言う説明を聞いた。今回、データを集める手段が自動化され、IoT化されたことで、データ量が増え、解析の道具も機械学習のようなツールも整ったことで、それに長けたデータサイエンティストの活躍の場が出来たが、「本質的には、ずっとこれまでも現場で行われてきたことと一緒になんです、と説明すると、現場も喜ぶよ。」と言うコメントを得た。

先に述べたデジタル・ツインもある意味で、その結果を踏まえてどのようにオペレーションするかと言う現場の実務での利用を考えれば、より複合的な、コンピュータのモデルやシミュレーションには考慮されていない要素も加味して総合的な判断をする必要は引き続きドメインの専門家に残り、一方で、我々デジタルの技術者は、データの収集や解析、シミュレーションと言った現代の道具をしっかり活用する術を磨きながら、実務を担うドメインの専門家と協業を進めて行く中に、目指す現代のデータ活用、デジタルライゼーションの姿があるように思う。

## 6. データ活用のためのオープンプラットフォーム

ここまでで述べて来たように、従来型産業でデジタルライゼーションを進める上では、データを活用すると言うのが非常に重要で、また、データの活用をドメインの専門家との協業を持って進めることが重要である、と考える。

これは、船と言うプロダクトについてのドメインの専門家である、造船所、メーカー、船級、また、海事ビジネスの専門家である、海運、船舶管理、保険、ブローカーなど、それぞれの道の実務の専門家

とのデータを共有し、データを活用した協業が重要である、と言う考えにも繋がる。

著者らは、2008年頃から、船会社のオペレーション改善のために船舶のデータ収集を開始し、この際には、船舶の性能と運航状況を正確に把握するためにデータ収集装置を搭載したのだが、安全上の目的や造船など船舶設計者にとってもこうしたデータ活用の用途は広くあり、彼らとデータを共有することで新たな価値を生み出す可能性があると考えた。また、一方で、目的毎にデータ収集用のコンピュータを本船に搭載していたのでは、手間もコストもかかりすぎて無駄が多く、結局データ活用は実現しないので、データ収集用のコンピュータは汎用化、一本化が必要で、そのためにはデータ収集用のコンピュータの仕様を何らかの形で標準化しようと言う考えに至った。

当時、日本船用工業会の「環境への全体最適を狙ったスマートシップ研究会」の活動の中でこうした議論を行い、その後、その議論を受けて、2013年2月から、日本船用工業会に、スマートナビゲーション研究会（SSAP: Smart Ship Application Platform Project）の活動を開始し、日本から船上のデータ収集サーバーの標準化の提案を目指した。

研究会の活動の中では、本船上データサーバーの試設計、プロトタイプ開発と内航船でのトライアル、船陸オープンプラットフォームのコンセプト作成（図2）が行われ、それらの経験を踏まえ、最終的に2つの新規のISO規格の提案NP（New work item Proposal）を、日本のISO/TC8の公式な事務局である日本船舶技術研究協会（船技協）と連携して行った。

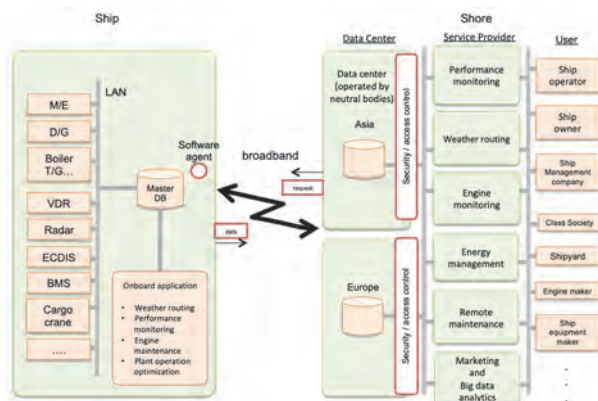


図2 船陸オープンプラットフォームの概念図

その後、2015年8月からの新スマートナビゲーションシステム研究会（SSAP2 Project）においてISO化に向けた作業を船技協と進め、ノルウェーやデンマークをはじめ各国のエキスパートの協力を得て規

格案の修正を行い、2018年10月に正式にISO19847（船上データ収集サーバーの仕様）とISO19848（船上データサーバーで利用するデータフォーマット）として登録された<sup>11,12)</sup>。

航海系のデータについては、従来からIEC61162と呼ばれる国際標準規格があり<sup>13)</sup>、各機器が出力するIEC61162信号を取り出すことは比較的容易であったが、機関係のデータが集まる統合制御監視システムからのデータ出力は、決まったプロトコルが存在せず、データ点数も数百～数千と多く、個船毎にこれに対応すると従来は手間とコストがかかっていた。しかし、今回のISO19847/ISO19848により、これに準拠した装置を採用すれば、システムが収集するタグ名称のリストや各タグの時系列データを標準化された方法で取り出すことが出来るようになり、データ収集の手間を大きく軽減することが期待される。

また、こうして船舶から収集されるデータを陸に転送し、陸のデータセンターで海事分野をはじめとする参加者と、セキュリティやアクセス権限をコントロールした上で共有する仕組みとして、ClassNKの100%子会社としてShipDCが2015年末に設立された。ここに参加するユーザーグループであるIoS-OP (Internet of Ships - Open Platform) コンソーシアムが2017年の準備期間を経て、2018年に設立された。IoS-OPでは、①データ共有のためのルール、②データ品質、③データカタログに関する協議が行われている。

ここでは詳細の説明は割愛するが、ISO19847/19848とShipDC/IoS-OPが提供する、船舶データの名前付けのフレームワークは、船舶で収集するデータを最終的なアプリケーションに紐付けるための構造化された仕組みを用意しており、理論的には、どのようなアプリケーション、あるいは本船上のセンサーデータも、このフレームワークの中でしっかりと繋がる仕組みが構想に組み込まれており、非常にシステムティックなものとなっている（図3）。今後、ますます船舶の性能、運動、構造、機関、補機、カーゴなど様々な対象でデータ活用の機運が高まると考えられるが、それらを体系的に扱うスキームそのものの保守も行いながら、こうしたデータ活用が様々なドメインの専門家との協業によって促進されることを期待したい。

このように、先のISO19847/19848の国際技術標準と、ShipDC/IoS-OPから構成されるデータ共有のためのオープンプラットフォームは、中立的なデータ共有のための基盤で、データ活用のルール整備など産業データの共有、活用に関するビジネス上の

合意形成を産業として図る、世界的に見ても、他産業から見ても非常にユニークかつ先進的な事例になっている。従来から様々な技術連携が行われてきた日本の海事クラスターの特徴、良さを活かした取り組みで、今後、グローバルに賛同者、利用者を増やして、海事分野におけるデータ共有のスタンダードとして定着し、日本がこうしたデータ活用に関して世界をリードする役割を果たすことが期待される。

### 船舶IoTデータ名称フレームワークとその活用戦略

- ・ IoTデータにしっかり名前を付けることは、地道な作業ですが、AI、ビッグデータなどデータ活用における非常に重要な基本です。
- ・ 船舶IoTデータ名称に関するフレームワークにおいて、ISO19848 AnnexBに記載の標準辞書(名前規則とコードブック)及び標準データカタログを保守・更新していくことで、論理的には、どんなIoTアプリケーションにも対応可能。

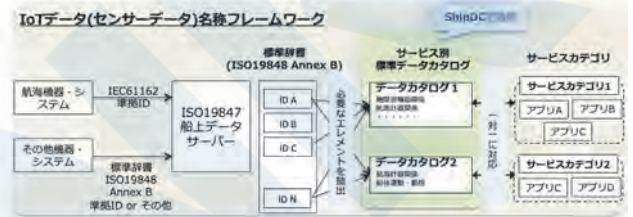


図3 船舶IoTデータ名称フレームワーク

## 7. デジタルイゼーションの今後の課題

次に、デジタルイゼーションを海事産業に取り込んでいく上での今後の課題について述べたい。

まず、海事産業を構成する荷主、海運、造船、船用、船級、保険、ブローカーと言ったそれぞれの立場で、それぞれの業務や顧客との関係において、デジタルイゼーションが進んで行くと考えられる。ビジネスの課題なので、なかなか外からは分かりにくいですが、やはり実際のビジネスやオペレーションの改善は非常に速いスピードで進化していくのだろうと思う。ここでもそれぞれのビジネスの専門家とITの専門家の協業は必須である。

また、海運全体としては、船舶のゼロエミッションに向けた技術開発と自律船の実現による船舶運航の省力化の二つの大きな課題がある。

ゼロエミッションに向けた取り組み分野は、今後、課題の整理が進むと思うが、一つには現在、模型試験をベースに船型・プロペラの最適化が行われているが、実船の計測技術、実船スケールのCFDなど解析技術が進んでいくので今後、実船スケールでの船型設計・プロペラ設計の最適化が進むことが期待される。造船所、船会社、メーカーが連携して、先端的なコンピュータ技術や計測技術を駆使することで出来る取り組みである。

実海域性能の評価技術も期待される分野である。現在、海上技術安全研究所が中心となり共同研究プ

プロジェクトOCTARVIAが進められているが、風波下の船舶の性能に関する共通の物差しを作ろうと言うもので、同時に解析ツールも開発されるので、海運、造船、船舶の共通の基盤技術として期待される。

また、船舶の構造ヘルスマニタリング、エンジンやタービンをはじめとする機器の状態診断、余寿命診断と言った技術も、船舶の設計、運航をより合理的に改善するための手法として、現在、研究が進んでおり、今後の実用化が待たれる。

以上に述べた、様々な今後の課題に共通するものとして、船舶で収集するデータがある。是非、前述のオープンプラットフォームがこうした様々な目的で活用され、研究や実用化が進むことを期待する。

また、もう一つ大きな課題として自律船の技術開発がある。ここでは主に、船舶メーカーの技術開発のテーマと、もう一つは、広くこうした高度で複雑なシステムをどのように我々は安全にオペレーションをするか、と言う運用、制度、社会的な課題も大きい。しかし、少子化する日本の中で、この課題への取り組みは避けられず、また、歴史的にも日本は1970年代以降、盛んに研究に取り組んできた実績もあり、こうした技術のタネを育て、社会的に受け入れられるような状態にレベルアップすることが求められる。そこでは、総合的な安全性評価、システム・インテグレーション、ソフトウェア信頼性、サイバーセキュリティなど、新しい課題もあり、これらの多くは極めてコンピュータ技術やソフトウェアに関するものである。

今後、日本の海事産業は、これらの課題の克服のためのハード・ソフトの両面において、研究開発、実証、実用化、運用を着実に進めて行くことが世界から期待されている。データ共有の枠組みも活用しながら、海事分野全体としてデジタルライゼーションを進めることは、ゼロエミッションや自律船といった海事分野の大きな課題解決に向けた動きと、極めて密接な関係がある。

## 8. まとめ

海事分野のデジタルライゼーションについての一見解を述べさせて頂いた。会社を超えて、海事分野全体として、デジタルライゼーションによって合理化・効率化を進めて行くことが求められており、その上ではデータの活用が重要で、ドメインの専門家とITの専門家との協業の重要性について述べた。船舶データの活用においては、日本からオープンプラットフォームの枠組みを提案しており、今後、この活用が期待される。

今後、そして、ゼロエミッションや自律船と言った大きな課題に向かって進んでいく必要があるが、データと膨大なコンピュータのパワー、そしてドメイン知識を活用して、海事産業全体の合理化・効率化を進めていくことが、グローバルな社会経済の一員である海事産業のデジタルライゼーションの目指すところと考えている。

## 参考文献

- 1) マイケル・ウェイド, DX実行戦略 デジタルで稼ぐ組織をつくる, 2019
- 2) 尊田雅弘, 造船システムの現状と今後の展望, 日本造船学会講演会論文集 第5号, 2005
- 3) 日本郵船株式会社百年史, 1988
- 4) ディーゼル油送船(含兼用船)NK-MO 機関部 自動化標準仕様, 日本船舶機関学会 第9巻 第1号, 1974.1
- 5) 小山 健夫, 外洋航行中の船の最適自動操舵系に関する研究, 造船協会論文集, 1967年122号 p.18-35, 1967
- 6) 電子制御ディーゼル機関とは?  
[http://www.marine-engineer.or.jp/images/denshiseigyo\\_diesel.pdf](http://www.marine-engineer.or.jp/images/denshiseigyo_diesel.pdf)
- 7) Michael Grieves, Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management (English Edition), 2012
- 8) Tomas Kellner, Wind in the Cloud? How the Digital Wind Farm Will Make Wind Power 20 Percent More Efficient, GE Industrial Report, Sep 2015  
<http://www.gereports.com/post/119300678660/wind-in-the-cloud-how-the-digital-wind-farm-will/>
- 9) 安藤, 大和, 堀, 増田, 白山, テキストマイニングを用いた故障報告書分析手法の研究, 日本造船学会論文集, 2002年192号 p.475-483
- 10) S. Letourneau et.al.,: Data Mining to Predict Aircraft Component Replacement, IEEE Intelligent Systems and their Applications, Volume 14 Issue 6 Nov/Dec 1999
- 11) ISO 19847:2018 - Ships and marine technology — Shipboard data servers to share field data at sea
- 12) ISO 19848:2018 - Ships and marine technology — Standard data for shipboard machinery and equipment

- 13) IEC 61162-1:2016 - Maritime navigation and radio communication equipment and systems  
- Digital interfaces - Part 1: Single talker and multiple listeners

ClassNK





# サイバーセキュリティの現状と船舶における課題

— 陸上でのサイバー攻撃手法からみた船舶におけるサイバーリスク —

福島 健二\*

## 1. はじめに

ここ数年、「船舶IoT」や「スマートシップ」といったキーワードを頻繁に目にするようになった。船舶IoTは、航海中の船舶から衛星通信を通じて位置情報、速度などのデータや、エンジン、発電機などのデータを陸上のサーバへ送信し、ビッグデータとして分析を行う仕組みである。その分析結果から故障の兆候等を見分け、大規模な故障を未然に防ぐことや、効率的な航路を選定し、燃料費を削減することなどが可能になる。この様な船舶IoTの活用に向け、データ収集サーバの仕様の標準化や、AIによるデータ分析手法の開発などが進められている。船舶IoTが普及に向かう背景として、衛星通信サービスの高速化や常時接続化があり、陸上と同様のIT環境へ近づきつつある。それに伴い、船舶においてもマルウェアなどインターネット上の脅威に対するリスクが高まっている。

世界の物流インフラの中で非常に大きな役割を担っている海運業において、船舶の運航に影響を与えるようなセキュリティインシデントが発生した場合、社会に与えるインパクトがとても大きい。2017年には、デンマークのA.P. Moller・Maersk社で、コンピュータウイルスによるサイバーセキュリティ事故が発生した。報道\*1によると、10日間に渡る業務停止により約330億円の損害となり、海事業界における最大規模のセキュリティ事故となった。

本稿では、陸上でのサイバーセキュリティの知見をもとにして、船舶におけるサイバーセキュリティリスクについて考察し、今後の課題について言及する。

## 2. 陸上におけるサイバー攻撃の現状

まず、サイバー攻撃の攻撃者とその動機について

整理したものを図1に示す。

	興味 自己顕示欲	自己主張・ 思想	金銭	国益・国防
国家			ランサムウェア 仮想通貨 事業者	サイバー戦争
組織			ハッキング/ ビジネス メール 詐欺	スパイ行為 (国家スパイ/企業スパイ)
個人	スクリプトキ ディ	ハクティ ビスト	ランサムウェア インターネットバン キング 不正送金	サイバーテロ

図1 サイバー攻撃の攻撃者と目的

インターネットが一般化してきた1990年代頃の攻撃は、コンピュータの知識に長けた個人が中心であり、自己の技術力を試し、自己顕示欲を満たすことがその目的であった。また、興味本位でハッカーの真似事を行う「スクリプトキディ」も増加していった。一方、政治的な思想を主張するために、WEBサイト改ざんやDDoS攻撃\*2等を行う組織や個人は「ハクティビスト」と呼ばれ、世界的に有名なハクティビストの集団に「アノニマス」がある。ハクティビストによるサイバー攻撃自体は2015年をピークとして減少傾向となっている\*3。

逆に、年々増加傾向にあるのが、金銭目的や諜報活動や破壊活動を目的とした組織的なサイバー攻撃である。金銭目的では、ランサムウェア、インターネットバンキングの不正振り込み、仮想通貨の不正流出を狙った標的型攻撃などが挙げられる。

一方、国家同士のサイバー戦争も現実化しつつある。サイバー空間は陸・海・空・宇宙に続く「第5の戦場」とも呼ばれており、水面下で他国の政府機関や企業に対しての諜報活動や破壊活動が現実として行われている。また、自国の企業を競争優位にする為に、産業スパイ活動を国家として行っている国

\* KDDIデジタルセキュリティ株式会社

\*1 ZDNetJapan, 「海運大手マースク、2017年の「NotPetya」攻撃による深刻な影響を公表」, <<https://japan.zdnet.com/article/35113829/>>, 2019年8月22日アクセス。

\*2 インターネットに接続した多数のホストを利用して、特定のネットワークやWebサービスを、意図的に利用できないようにする攻撃行為。

\*3 ZDNetJapan, 「ハクティビストによる攻撃が大幅減少、その理由とは—IBM調査」, <<https://japan.zdnet.com/article/35137171/>>, 2019年09月6日アクセス。

もあると言われている。ハッキングを行う部隊を国内に組織し、ハッカー育成も行われている。サイバー攻撃は、実際の攻撃者を突き止めるのが難しく、攻撃コストも安価で済むことから、経済力の低い国家でも容易に攻撃を行うことが可能となっている。

### 3. 船舶におけるサイバーセキュリティリスク増加の要因

第2章では陸上におけるサイバー攻撃の現状を述べてきた。船舶のIT環境が陸上のIT環境に近づくことで、船舶でも、陸上と同様の脅威に晒されるリスクが増加している。その要因は大きく分けると3点ある。一つ目は、船舶の通信インフラの進化である。船舶の通信インフラは、陸上に比べて10年から15年遅れていると言われてきた。しかし、衛星通信でもインターネットへ常時接続可能なサービスや、大容量通信が可能なサービスの提供が開始され、インターネットから隔離されたネットワークでは無くなってきている。二つ目は、長期に渡って船舶上のシステムが利用され続けている点である。一般的なIT機器のライフサイクルは概ね5～6年程度であり、それを超えるとハードウェア、ソフトウェア、OSなどのサポートが終了していく。それに対し、船舶上のシステムは、造船時に搭載されたシステムが10年以上継続して使用されることも少なくない。その結果、船用機器のOSのサポート切れとなり脆弱性が残ったまま使用されることで、「マルウェア\*4」に感染するリスクが高くなっている。三つ目は、船内におけるIT機器管理の問題である。現在でも船員が持ち込んだPCやスマートデバイス、USBメモリなどからマルウェア感染事故が発生している。ルールを設定し、船員に守らせることで防ぐことも可能だが、航海ごとに船員が入れ替わることが多く、徹底させることが難しくなっている。

### 4. 陸上のセキュリティ対策と船舶のセキュリティ対策の相違点

陸上のセキュリティ対策と船舶におけるセキュリティ対策の相違点は2点挙げられる。一つ目は、セキュリティ対策で何を重視するかという目的の違いである。情報セキュリティの三要素としては、「機密性」「完全性」「可用性」の3つがある。一般的に

情報セキュリティでは情報漏洩対策などが重視され、「機密性」を侵害される方が重く受け止められる傾向にある。それに対して船舶では、航行の安全を守ることが第一の目的となるため、「完全性」と「可用性」の方が重視される。セキュリティ対策を実装するにあたり、この目的に沿った対策を選定する必要がある。二つ目の相違点としては、船舶特有の環境が挙げられる。通信環境は、ほぼ衛星通信経由に限られており、常時接続サービスが普及しつつあるものの、陸上ほど大容量の通信ができる環境ではない。それに加えて、洋上では機器故障や事故が発生した場合でも、陸上からすぐに駆け付けることが出来ない。サイバーセキュリティ対策を導入するにあたり、このような保守性も考慮すべき点となる。

### 5. 代表的なサイバー攻撃手法から考察する船舶におけるサイバーセキュリティ脅威

5章では、陸上での代表的な攻撃手法を中心として、船舶に対しての脅威について考察を行う。

#### 5.1 ランサムウェア

##### 5.1.1 ランサムウェアとは

ランサムウェアは、コンピュータウイルスの一種で、感染したPCの利用者に対して身代金を要求する機能を持ったマルウェアである。2015年頃から被害が増加しており、2017年に「WannaCry\*5」のように自己伝染機能を持ったランサムウェアが出てきたことで、更に被害が拡大している。

##### 5.1.2 ランサムウェアの仕組み

ランサムウェアの仕組みを図2に示す。

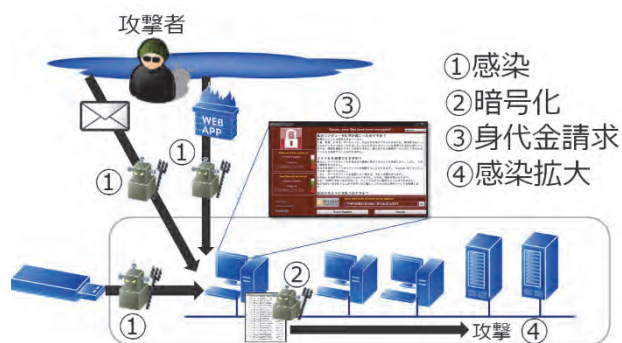


図2 ランサムウェアの仕組み

ランサムウェアの主な感染ルートは、Eメール、WEBサイトからのダウンロード、USBデバイスの

\*4 不正かつ有害に動作させる意図で作成された悪意のあるソフトウェアや悪質なコードの総称。コンピュータウイルスやワームなどが含まれる。

\*5 Windowsを標的としたワーム型ランサムウェア。2017年5月から大規模なサイバー攻撃が開始され、150か国の23万台以上のコンピュータに感染し、28言語で、感染したコンピュータの身代金として暗号通貨ビットコインを要求する。

3つである。PCがランサムウェアに感染（①）すると、PC上のファイルが、次々に暗号化され開けなくなる（②）。一通り暗号化を実行すると、ファイルの暗号化を解除する為の鍵と引き換えに、身代金を要求する画面が表示される（③）。更に、自己伝染機能を持つランサムウェアの場合、ネットワーク上の他のPCへ感染を拡げる（④）。

### 5.1.3 ランサムウェアの被害事例

第1章で、海事業界におけるランサムウェアの被害事例として、2017年6月に発生したデンマークのA.P. Moller - Maersk社の被害事例を挙げた。この事例の発端となったランサムウェア「NotPetya」は、Wannacryと同様に自己伝染機能を持ったランサムウェアである。NotPetyaは、不特定多数を狙ったランサムウェアであったが、偶々、同社のネットワーク内のPCが感染したことで、そこから45,000台のPC、4,000台のサーバまで感染が拡大し、ターミナルの業務が10日間に渡り停止に追い込まれる被害となった。

### 5.1.4 ランサムウェア被害のシナリオ

Windowsが使用されているあらゆる機器で、ランサムウェアの被害に遭う可能性がある。船舶においては、航行に関わる機器がランサムウェアに感染し、航行不能に陥ることが、最も懸念されるシナリオである。ECDISなどの機器には、WindowsOS上で稼働しているものもあり、その場合、ECDIS自体がランサムウェアに感染する可能性がある。仮にコンテナ船やタンカーなどの大型船の航行に関わる機器がランサムウェアに感染し機能停止した場合、航行不能となり、やむを得ず身代金を支払わないといけないことも想定される。

## 5.2 標的型攻撃

### 5.2.1 標的型攻撃とは

IPA（日本情報処理推進機構）では、「情報セキュリティ10大脅威\*6」を毎年発表している。その中でランサムウェアと同様に、ここ数年上位を占めている脅威に「標的型攻撃」がある。この攻撃は文字通り、特定の標的（ターゲット）を狙った攻撃である。攻撃者は、ターゲットの企業／組織へ標的型攻撃マルウェアを送り込むことで内部のPCへ侵入する。その後、侵入したPCを外部からリモート操作することにより、組織内の機密情報を盗みだすことや、社内システムへの攻撃を行う。

### 5.2.2 標的型攻撃の仕組み

標的型攻撃の仕組みを図3に示す。

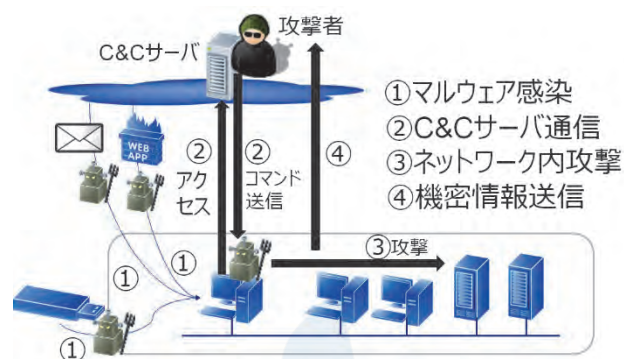


図3 標的型攻撃の仕組み

標的型攻撃は、「標的型攻撃マルウェア」をターゲット組織に送り込み、組織内のPCをマルウェアに感染させることが、最初のステップとなる。感染経路はランサムウェアと同様に、Eメール、WEBサイトからのダウンロード、USBメモリなどが使われる（①）。マルウェアに感染したPCは、攻撃者が管理するインターネット上の「C&Cサーバ\*7」へ接続される（②）。攻撃者はC&CサーバからターゲットPCへコマンドを送り込むことで、外部から様々な操作を行うことが可能である。侵入したPCを足掛かりに、社内システムや、より権限の高いユーザを乗っ取り（③）、機密情報を収集し外部へ送信をおこなう（④）。機密情報を盗み出す以外にも、社内の特権ユーザ権限を奪取し、システムのデータ改ざん、メール盗聴による詐欺行為のための情報取得などを目的とした標的型攻撃が行われる。

### 5.2.3 標的型攻撃の攻撃シナリオ

船舶において、標的型攻撃によって内部に侵入されると、攻撃者のリモート操作により、様々な脅威が想定される。ECDISやAISの位置情報を偽装され、実際とは違う位置を表示させることも可能である。

今後、自立運航船が普及してきた場合、外部から船の操舵をコントロールされ、意図しない航路へ誘導される危険性も出てくる。その結果、サイバーテロとして大型船舶を港に衝突させることや、大型船舶同士を衝突させるなどの実害に至る可能性もある。今後、国家間の争いの中で海運業界が狙われた場合、大規模な被害となることが懸念される。

## 5.3 IoT機器へのサイバー攻撃

### 5.3.1 IoT機器へのサイバー攻撃とは

インターネットに接続されている機器の数は2020年

\*6 IPA(2019),「情報セキュリティ10大脅威2019」, <<https://www.ipa.go.jp/security/vuln/10threats2019.html>>, 2019年8月7日.

\*7 マルウェアに感染したコンピュータへ遠隔からコマンドを送り、制御するサーバ（コマンド&コントロールサーバ）。

には400億台に達すると予想されている\*8。オフィス機器や、自動車、家電製品、産業用機器など、従来は通信機能を持っていなかった機器が、IoT機器としてインターネットに接続されるようになってきた。これらのインターネットに接続されている機器の中には、サイバーセキュリティ対策が考慮されていないものも多く、初期設定のパスワードで外部からログイン出来てしまうことも珍しくない。その為、外部からカメラの画像を盗み見られる盗聴や、他のサーバなどを攻撃する為の踏み台に使われるなど、被害が発生している。

### 5.3.2 IoT機器検索ツールを使用した攻撃

IoT機器検索ツールの代表的なものにSHODAN\*9がある。SHODANはインターネットに接続されたIoT機器に対して、ポートスキャン\*10、バナーチェック\*11等を行い、収集した情報を公開しているWEBサイトである。この仕組みを図4に示す。

SHODANが公開されている本来の目的は、IoT機器の管理者が自社のシステムを診断することだが、攻撃者にとっては、ターゲットを探すためのツールとなっている。船舶上の機器がインターネットに接続されていた場合、SHODANで検索可能となり攻撃ターゲットとなる可能性が出てくる。あるフランスのセキュリティ研究者は、攻撃者がインターネット経由で船上のシステムを簡単にハッキングできることを公開した\*12。研究者はSHODANを使ってVSATシステムを搭載している船舶を検索した。その中で見つけた船舶上のVSATシステムへ、初期設定の認証情報を入力したところ、リモートでログイン出来たことを明かした。

通信機器にログイン出来た場合、パケットフィルタリングの設定を変更し自由に外部から接続することや、通信機器を踏み台にして、船舶内部のネットワークを探索することが出来てしまう可能性がある。そうなれば、船内の機器へ不正にログインされる可能性も出てくる。

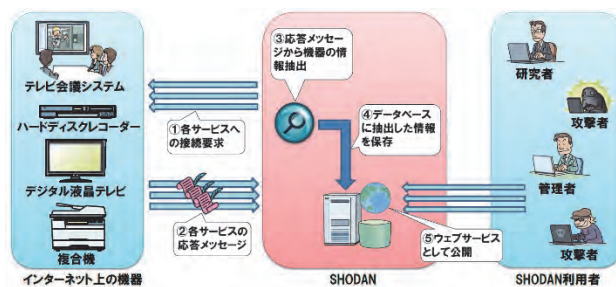


図4 SHODANの仕組み

(出典) IPAテクニカルウォッチ「増加するインターネット接続機器の不適切な情報公開とその対策」

### 5.3.3 IoT機器を狙ったマルウェア

2016年頃からIoT機器を狙ったマルウェアがインターネット上で感染を拡げている。代表的なマルウェアとして「Mirai」が挙げられる。Miraiは自己伝染機能を持ち、インターネット上の他のIoT機器を狙って自動的に攻撃を仕掛け、マルウェア感染範囲を拡大していく。Miraiに感染した機器の集合体はボットネットと呼ばれる。攻撃者はこのボットネットを使い、企業や組織を狙ったDDoS攻撃など、大規模な攻撃を仕掛ける。船舶上の機器が、このMiraiに感染した場合、結果として通信回線を圧迫し、本来必要な業務の通信を妨げる可能性がある。

## 5.4 GPS (GNSS) に対するサイバー攻撃

### 5.4.1 GPSに対するサイバー攻撃とは

船舶においてGPSの位置情報は、AISやECDISなど航行に関わる重要な機器に使用されており、欠かせないものとなっている。しかし、GPS信号自体は非常に微弱な電波である。また、GPSの民生用の信号から位置情報を計算する方法については公開情報となっている。その為、GPSの仕組み自体が攻撃に対して脆弱な面があり、攻撃者からは、この脆弱な面が狙われている。

### 5.4.2 GPSに対する攻撃手法

GPSに対するサイバー攻撃手法としては、ジャミング、スプーフィング、位置情報の偽装などがある。

ジャミングは、GPSの本来の電波よりも強い電

\*8 総務省 (2018), 「平成30年版情報通信白書」, p7 図表1-1-2-1, <<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h30/pdf/index.html>>, 2019年9月6日アクセス。

\*9 SHODAN, <<https://www.shodan.io/>>, 2019年9月6日アクセス。

\*10 攻撃者がシステムに侵入するために、ターゲット機器の空きポートを探す手法。ツールとしては、NMAPなどが使用される。

\*11 攻撃前の下準備として、サーバ上で動作しているソフトウェアへ外部からデータを送り、その応答内容からソフトウェアの種類やバージョンをチェックする手法。

\*12 Twitter(2017), 「Shodan now live tracking ships via VSAT antennas exposing web services」, <[https://twitter.com/x0rz/status/887238046172753920/photo/1?ref\\_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etweetembed%7Ctwterm%5E887238046172753920&ref\\_url=https%3A%2F%2Fmashable.com%2F2017%2F07%2F18%2Fhacking-boats-is-fun-and-easy%2F](https://twitter.com/x0rz/status/887238046172753920/photo/1?ref_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etweetembed%7Ctwterm%5E887238046172753920&ref_url=https%3A%2F%2Fmashable.com%2F2017%2F07%2F18%2Fhacking-boats-is-fun-and-easy%2F)>, 2019年9月6日アクセス

波を発信し、正規のGPS通信を妨害する攻撃である。ジャミングの被害としては、2012年頃より韓国ソウル周辺で航空機がGPSを利用できなくなる事例が報告されている\*13。また、米国では、GPSの妨害電波を発信することのできる装置が、PPD (Personal Privacy Device) と称して、インターネット上で20ドル程度から販売されていた。主にトラックドライバーが自車の位置情報を会社に捕捉されない目的として使用されていたが、現在は違法となっている。

GPSのスプーフィングは、GPS信号を独自に生成して本物のGPS信号をなりすます攻撃である。GPS信号を作り出すソフトウェアがフリーウェアで公開されており、無線の知識があればGPSスプーフィング装置を個人で作ることも可能である。

GPS電波を偽装する攻撃とは別に、GPSアンテナで受信した位置情報のデータ信号を偽装する攻撃がある。このGPS位置情報の偽装が悪用された事例がいくつか報告されている。スマホゲームの「ポケモンGO\*14」で、GPSの位置情報を偽装し、世界各地で発生するポケモンを捕まえることができるアプリが出回り、ゲーム提供者側からアカウントが停止されるという事態となった。また、ショッピングセンターのイオンが提供するスマホアプリで、GPSの位置情報からイオンの来店ポイントが加算される仕組みがある。これにGPSの位置情報偽装を悪用し、各地のイオンへ269万回訪問した記録を残し、538万円相当のポイントを搾取しようとして逮捕された事例も発生している\*15。

#### 5.4.3 GPSに対するサイバー攻撃のシナリオ

GPSの攻撃で一番怖いのは、位置情報を偽装され、本来向かうべき目的地とは別の方向へ誘導されることである。万が一、船舶が不正に誘導された場合、その先に浅瀬があれば座礁事故につながり、他の船舶に向けられた場合、衝突事故となる危険性が

ある。サイバーテロや海賊行為のために、このようなGPSのハッキングを行うことは十分に考えられる。技術的にも、2013年には、テキサス大学オースチン校で、GPSスプーフィング装置を用い、実際の船舶の位置とは違う座標へ誘導し、目的地とは違う航路を航行させる実験に成功している\*16。

#### 5.4.4 GPSハッキングによる攻撃事案（疑い）

2017年6月、ロシアのゲレンジーク港沖で20隻以上の船舶のGPS位置データが、間違った位置データとなる事象が発生した\*17。近隣にいた船舶のAISトレースデータが、すべて同じ間違ったGPS位置情報（30Km以上離れた国際空港近く）を示していた。また、同じくロシアのクレムリン周辺では、2016年頃からGPSの位置情報が大きく狂うという事象が確認されていた。こちらも、30km以上離れた国際空港に現在位置が飛ばされてしまう事象であった\*18。空港に位置情報が偽装されるという事象の要因は、ロシア政府の建物周りをドローンが飛行するのを防ぐことが目的ではないかと推測されている。市販のドローンの多くは、GPSの位置情報をもとに、空港などに近づくことができない「ジオフェンス機能」を搭載している。この機能によりロシア政府の建物近くに不審なドローンを近づけないようにしているのではないかと考えられている。

## 6. 船舶におけるセキュリティ対策の取り組み

IMOの海上安全委員会（MSC98）において、安全管理システム（SMS）でサイバーセキュリティリスクを管理する方針が承認された。これを受けて日本では、2019年2月にClassNKより「船舶におけるサイバーセキュリティマネジメントシステム（要求事項及び管理策）[第1版]」が発行された\*19。このガイドラインは、主にISMS（ISO27001およびISO27002）を参考にして作られている。ISMSは、

\*13 産経ニュース（2016）、「韓国上空1007航空機にGPS障害 北朝鮮が妨害電波と結論」、<<https://www.sankei.com/world/news/160623/wor1606230042-n1.html>>, 2019年9月6日アクセス。

\*14 アニメのポケモンの世界をARの技術を使い、現実の世界と融合させて、ポケモンを捕獲、育成するスマートホン向けのゲーム。ゲーム内では、GPSの位置情報と連動し、特定の場所でポケモンが発生する仕組みとなっている。

\*15 朝日新聞デジタル（2018）「イオンから来店ポイント詐取容疑 PCで位置情報偽装」、<<https://www.asahi.com/articles/ASLCD6R60LCDTIPE03N.html>>, 2019年9月3日アクセス。

\*16 Todd Humphreys(2013), 「Secure PNT for Autonomous Systems」, <[https://radionavlab.ae.utexas.edu/index.php?option=com\\_content&view=article&id=351:secure-pnt-for-autonomous-systems&catid=30&Itemid=37](https://radionavlab.ae.utexas.edu/index.php?option=com_content&view=article&id=351:secure-pnt-for-autonomous-systems&catid=30&Itemid=37)>, 2019年9月6日アクセス。

\*17 C4ADS(2019), 「ABOVE US ONLY STARS」, <<https://www.arcgis.com/apps/Cascade/index.html?appid=b919c8d91b0a4f868f02acfd9bc428d7&classicembedmode>>, 2019年9月6日アクセス。

\*18 CNNbusiness(2016), 「Getting lost near the Kremlin? Russia could be 'GPS spoofing」, <<https://money.cnn.com/2016/12/02/technology/kremlin-gps-signals/index.html>>, 2019年9月6日アクセス。

\*19 日本海事協会（2019）、「船舶におけるサイバーセキュリティマネジメントシステムを発行」、<[http://www.classnk.or.jp/hp/ja/hp\\_news.aspx?id=3662&type=press\\_release&layout=1](http://www.classnk.or.jp/hp/ja/hp_news.aspx?id=3662&type=press_release&layout=1)>, 2019年9月6日アクセス。

企業における情報セキュリティルールの策定、セキュリティ対策の実装、見直し、改善が継続的に実施されていることを認証する仕組みである。

ClassNKにおけるサイバーセキュリティアプローチ<sup>\*20</sup>としては他に、2019年2月に「船舶におけるサイバーセキュリティデザインガイドライン」、2019年5月に「ソフトウェアセキュリティデザインガイドライン」が発行されている。

この2つのガイドラインはセキュリティ・バイ・デザインという考え方がベースとなっている。セキュリティ・バイ・デザインは、セキュリティを企画・設計段階から組み込むという考え方であり、それぞれ、造船時のセキュリティ、船用機器のセキュリティについて、企画・設計段階から予め実装することを提案している。

## 7. 船舶のサイバーセキュリティ対策における課題

船舶のサイバーセキュリティ対策における課題は、大きく3つある。一つ目の課題は、船舶における環境の特殊性という点である。陸上のセキュリティ対策は、インターネットの普及から様々な製品やサービスが提供されてきた。しかし、全てのセキュリティ対策製品やサービスが、そのまま船舶に実装できる訳ではない。設置環境、通信環境、保守性、運用体制などが、適合しないケースもある。船舶上ではシステム管理者が居ないため、複雑な運用が必要な場合、対応が難しい。また、既存のセキュリティ製品の特徴として、パターンファイル等のアップデートが必要なものも多く、衛星通信では通信コストがかかり現実的ではない。また、船舶自体は耐用年数が長い為、搭載された船用機器のOSがサポート年数を超えて使用されてしまう状況もある。二つ目は人材面の課題である。海運業界に限った話ではないが、サイバーセキュリティを推進できる人材を十分に確保できる企業は少数である。また、現場で働く船員の入れ替わりが激しく、求められる専門性も大きく異なるため、現場でITリテラシーを浸透させるのが難しいという要因もある。その為には、サイバーセキュリティの専門家の協力を得て、仕組みを作ることや継続的なセキュリティ啓発活動が求められる。三つ目は投資コストの課題である。急激に船舶に対してのセキュリティ対策が求められており、

新たに投資が必要なケースも多い。また、新船だけでなく既存船も対象であり、造船時の実装だけでなく、運航中の船舶でもセキュリティ対策が求められている。2019年11月に、経済産業省から「サイバーセキュリティ経営ガイドラインVer2.0」<sup>\*21</sup>が発行されているが、これは、サイバーセキュリティ対策について、経営者自身が企業の経営課題として投資判断を行うことを提言している。

## 8. まとめ

本稿では、15年以上サイバーセキュリティ業界に身を置いてきた知見から、船舶管理会社様、船主様、造船会社様、船用機器メーカー様から状況をお伺いさせて頂いた内容を踏まえて、船舶におけるサイバーセキュリティ対策の現状と課題について整理してきた。この課題も踏まえた上で、適切なサイバーセキュリティ対策を行うことで、安心してAIやIoTの利活用をおこなうことが出来るようになる。海事業界として今後も発展していくためには、効果的なIT活用の推進と並行して、安心、安全の為のサイバーセキュリティ対策への取り組みが望まれる。

## 謝辞

本稿の執筆にあたり、ご協力いただいた日本海事協会及び日本海事協会研究所の関係者の皆様、お話を聞かせて頂いた海事各社の関係者の皆様、KDDIデジタルセキュリティ株式会社のメンバーへ感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) JPCERT (2015), 「SHODANを悪用した攻撃に備えてー制御システム編ー」, 2015年6月9日.
- 2) IPA (2014), IPAテクニカルウォッチ「増加するインターネット接続機器の不適切な情報公開とその対策」, 2014年2月27日.
- 3) 坂井丈泰 (2018), 「GPSのセキュリティ: 脆弱性とその対策」, 電子情報通信学会 (IEICE Technical Report), SANE2018-33, 2018年8月.

<sup>\*20</sup> 日本海事協会 (2019), 「ClassNKサイバーセキュリティアプローチを公表」, <[http://www.classnk.or.jp/hp/ja/hp\\_news.aspx?id=3562&type=press\\_release&layout=1](http://www.classnk.or.jp/hp/ja/hp_news.aspx?id=3562&type=press_release&layout=1)>, 2019年9月6日アクセス.

<sup>\*21</sup> 経済産業省 (2017), 「サイバーセキュリティ経営ガイドラインVer2.0」, <[https://www.meti.go.jp/policy/netsecurity/mng\\_guide.html](https://www.meti.go.jp/policy/netsecurity/mng_guide.html)>, 2019年9月6日アクセス.

# 人工知能の現在地と付き合い方

— 人工知能は脅威なのか —

井原 渉\*, 水村オリビア\*

## 1. はじめに

人工知能という言葉は1956年のダートマス会議において、ジョン・マッカーシーが初めて「ARTIFICIAL INTELLIGENCE」という言葉を使った<sup>1)</sup>。ここからAIの歴史は始まった。しかし、AIはスムーズに社会に溶け込んだとは言い難く、2度の冬の時代を経験した。今の3度目のAIブームが社会に定着し、普及する上で、本稿では、AIの歴史からみた、AIの現在における技術を俯瞰した上で、AIにできない事、AIが得意な事をまとめ、適切なAIに対する向き合い方を示唆し、AIに対する不必要な警戒を除き、AIの社会実装を推進したいと考える。

## 2. AIの歴史

前述の通り、AIは今（2019年）から50年以上前からある技術である。その歴史は、順調に普及の一途をたどったとは言い難い。1956年から始まった第一次AIブームは1960年代に一度、終焉を迎えた。第一次AIブームで取り上げられた技術は探索・推論が中心でビジネスに活用するというよりは、迷路やパズルを解くことが中心的であった。そのため、研究は盛り上がりを見せたが、まだまだコンピュータが高価で、汎用的ではなかったため、研究にとどまった<sup>2)</sup>。

次に1980年代から1995年ごろまでに第二次AIブームが来た。ここではエキスパートシステムと呼ば

れる、人間が既に獲得できている知識を基にルールを生成し、処理をするシステムが誕生した。汎用コンピュータが爆発的に普及し、ブーム初期にはWINDOWSやMacが登場し、パソコンをみんなが持つようになった。これにより、エキスパートシステム自体はファジィ理論として1965年にロトフィ・ザデーがファジィ集合を提起した時から存在したのだが、安価に広く普及をし、ブームを形成した。ブームの末期の1997年にはオセロやチェスといった分野で当時の世界最強の人間を破るまでに成長した。そして、ブームとしての終焉は迎えるが、それは第一次AIブームとは大きく異なり、ルールベース処理と呼ばれ、多くのシステムに組み込まれ、社会に定着した。「もし、Aの値が10以上であれば、クーポンを発行する。10以上で効果がなければ、11以上に変更する」といったルールベースでの処理が当時はAIと呼ばれていたが、今では一般的なプログラムに期待されている挙動の一種になった。

そして、今もその中にいると言われている第三次AIブームが2010年代に来了。ここでは、ディープラーニングを中心とした機械学習が広く使われるようになった。よく使われている畳み込みニューラルネットワーク（CNN）は1988年には音素認識<sup>3)</sup>に1989年には文字認識<sup>4)</sup>に適用され始めていた技術であった。これが理論の進化もあったが、主にはウェブの発達によりデータ収集が容易になった事によるビッグデータとGPUの普及やメモリの発達による計算機器の処理スペック向上により実現できるようになった。1993年からスーパーコンピュータの



図1

\* 濠標アナリティクス株式会社



性能をランキングしているTOP500の性能の進化をグラフ化した物が下記図1である<sup>5)</sup>。この図の縦軸は1メモリ上に行く毎に幅を10倍にしてある。1993年には世界500位のスーパーコンピュータは0.4GFLOP/秒であった物が2017年には434TFLOPS/秒と約100万倍に計算処理能力が向上している。このコンピュータの処理能力向上とビッグデータにより、非常に大量のデータを使った複雑な計算をする事が可能になり、精度の高い予測ができるようになった。これが第三次AIブームである。

ルールベースでは人間がルールを書く必要があったため、複雑な問題を解こうとすると、ルールが膨大になり、現実的ではなかった。それを機械学習という考え方をを使う事で、大量のデータから機械がルールを探り出せるようになった。これにより、人間がルールを書くよりも複雑な計算式で予測ができるようになり、精度の飛躍的な向上につながった。下記図2がILSVRCという画像認識の国際的なコンテストでの不正解の割合である<sup>6)</sup>。

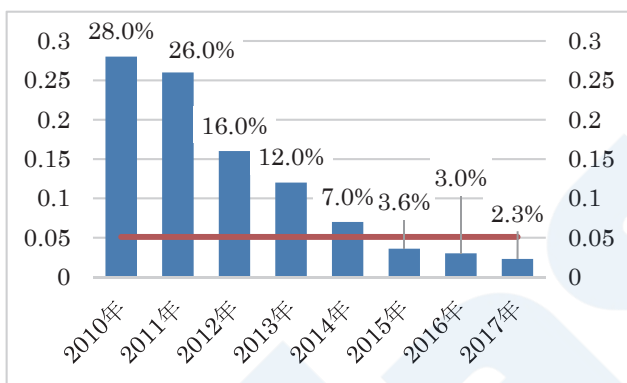


図2 ILSVRCの誤り率の推移

参考に人間の正解率の5.1%に横線を引いてある。2012年からディープラーニングが普及し、精度が飛躍的に向上している。2015年には一般的な人間の精度である、5.1%を抜いている。

こうして、複雑な問題においても人間並みかそれ以上の精度を出す事ができるようになり、現在の第三次AIブームが形成された。このブームの特徴は、今までのブームに比べて、ビジネスの現場にかなり近い所で起きており、規模が大きいことである。これにより、多くの人がAIに興味を持つに至っている。

### 3. AIで出来るようになった事

#### 3.1 AIの得意不得意

第三次AIブームにおけるAIは前述の通り、ビッ

グデータに裏打ちされた機械学習が中心である。そのため、データが必要となる。これがAIにできる事とできない事を分けていると言える。つまり、例えば、過去の規則性が当てはまらない場合や判断基準に使われている要素がデータにない場合にはAIであっても十分な精度は期待できなくなってしまう。また、基本的には確率論で判断をしているため、ミスが絶対に許されない場合にも使う事が難しくなる。

一方において、1万人分のログを全件チェックして、異常な取引を1秒以内に24時間探し出すといった業務は得意である。また、その日の気分や天気左右されず、データに基づき、常に同じ結果を返す事も可能である。

### 3.2 AIの使われ方

#### 3.2.1 画像処理

よくネットでの広告などでバナー広告が出てくると思うが、どのバナーがどれくらい成果に寄与しているのかを画像処理を使って実施しているケースがある。特徴を当初はディレクターが付ける事を想定していたが、バナーの数が増えると必要になる時間が無限に増えるのに加え、人によって判断が微妙に違うため、複数人で分担する事も困難であった。そこで、画像をAIが処理して、いくつかの特徴を抽出する、そしてその特徴が成果にどれくらい関係しているかを相関で取り出している。優秀なディレクターが全ての画像の評価をする事は不可能なので、その代替をしている。結果としては、成果が数倍に上がると共に、ディレクターは本業である、記事やキャッチコピーの作成、各種調整に専念できるようになった。

他にも、OCRで文字の読取をしている。旧来の画像処理はルールベースであったため、事前にルールを書き、マルが右上にあり、直線が2つあり、上が狭く、下が広い物は「パ」である。といったように記述されていた。そのため、印字された文字は得意だが、手書き文字などはルールから外れる事が多く、認識精度が上がりづらかった。それが、ディープラーニングなどの機械学習とネットなどを通じて収集された大規模な手書き文字画像を組み合わせる事で、精度が99%を超えている<sup>7)</sup>。そして、このサービスは修正された結果を学習し、精度が更に向上する仕組みを有している。

最近に増えてきているのは製品などの画像を使って、不良品や施工不良を認識させるケースである。ただ、前述の通り、判断基準が静止画でも分かる状態になっている必要がある。西日が当たっているの、このオレンジは問題がないといった状態では、西日が当たっている事をAIに教える必要がある。

### 3.2.2 人間行動の解析

商品棚の棚割にもAIは使われ始めている。まずは、今の商品棚のどこに何があるかをAIに認識させている。次に、どの商品棚をどんな顧客が、どれくらい見ていたかをAIを使い、収集する。そして、天候や価格などを基に棚割がどれくらい売りに上げに影響していたかを解析し、どんな棚割が売りに上げにどれくらい貢献できているかを定量化するのである。このように複数のAIを組合せるケースは増えてきている。

他にも、作業員の労災を予測するようなAIも増えてきている。ただ、このような問題では労災が起きる可能性は任意の1日においてはほぼなく、不均衡問題と呼ばれる現象を起こす。何も労災を起こさないと予測すると、非常に精度が高いモデルと評価されてしまうという問題である。そのため、まずは労災をいくつかに分類し、今日の各労働者の状況に似た各分類を予測した。つまり、何らかの労災は起こった物とし、起こるとしたらどんな労災が起こるのかを予測している。

転職サービスでもAIの活用は増えてきている。人材派遣サービスにおいて、応募した人材をどの職に紹介するのが良いのかをAIが決めていたサービスがある。単なるレコメンドをすると、相対的に良いとされる職に多くの求職者を紹介し、それ以外の仕事には全く人が来なくなってしまう。しかし、職業には枠があり、良い職で採用されるのは全体のごく一部である。そのため、殆どの求職者は落ちてしまう。これを解決するために、均等にその人にとって、受かりやすい職を紹介している。元々は人間でしていた仕事をAIに代替した。これによって、40人でしていた仕事を3人で出来るようになった。37人には、履歴書の添削などのAIには難しく、価値の高い仕事を担当してもらえようになった。

### 3.2.3 物に関する情報の解析

稼働している車や製造機器の情報の解析にもAIを活用する事が増えてきている。GEは飛行機の飛行状況をIoTでデータ収集している<sup>8)</sup>。このデータを解析する事でAlitalia航空は4,600万ドルの燃料費削減を実現し、実際に不具合が起きやすくなる飛行距離を飛行機の状況ごとに予測している。このデータをベテラン作業員が全件、見る事ができたとするともっと精度が高い予測ができ、発生頻度の低い異常も発見できるだろう。しかし、Alitaliaだけでも100機以上を常時運行させており、全機体のログを全て人間が見るのは現実的ではない。これを24時間リアルタイムに監視し、小さな異常でも検知できているのはAIの力である。

また、稼働の情報を使って、使用されている環境や状況、目的をAIが予測し、その状況等に合わせた情報をユーザにリアルタイムに提供するようなケースも自動車業界を中心に増えてきている。

### 3.2.4 オンライン行動の解析

この分野は古くからAIなどの技術と親和性が高かったが更に活用が加速している。ゲームでの行動を使って、翌月に課金するユーザをユーザID単位で予測してみた事例での精度が図3である。

予測確率(%)	UU数	実際の課金	課金率
100%	535	513	96%
90%~99%	1,329	1,248	94%
80%~89%	811	707	87%
70%~79%	901	771	86%
60%~69%	961	733	76%
50%~59%	1,172	886	76%
40%~49%	1,758	1,176	67%
30%~39%	2,952	1,657	56%
20%~29%	6,033	2,768	46%
10%~19%	24,152	7,069	29%
0%~9%	822,461	27,880	3%

図3 課金者予測の精度

中間層が外れているが、確率の上下では精度高く予測できている。この予測が精度の高い理由には、使っている変数がある。この分析には過去の消費間隔などの変数が使われている<sup>9)</sup>。使用しているデータは約2百万件あり、課金したユーザだけでも45,408名いる。これをベテランでも見ていく事は不可能であるのは当然であるし、予測は7秒できている。この計算速度はAIの特徴の一つである。ただ、消費間隔を変数に使う事を考えたのは人間であり、この結果を基にゲームの改修を行っているのも人間である。

### 3.3 AIにできること

現時点において産業界でよく使われているAIできている事は人間が意思をもって使うと決めたデータから、人間が定義した変数を基に、過去における正解を再現する事である。自らデータを収集する訳ではなく、自ら正解を定義しているわけではない。そのため、経験豊富な人間がじっくり時間をかけて出した結論に勝てるケースは極めて少数である。AlphaGOの囲碁やBonanzaの将棋というルールは完全に定義されており、とりうる手は有限で、無限に人工的な環境で試行する事ができる場合は、人間に勝てる。ただ、囲碁や将棋のルールを作るのは人間で、その環境を再現しているのも人間である。

Bonanzaの場合、演算の効率化に3つの駒の動きを評価関数に使用している<sup>10)</sup>。ただ、この変数を使うべきだと定義したのは人間に過ぎないのである。

第二次AIブームとの差異で言うと、人間が全てのルールを定義する必要は確かになくなったが、どのデータからどうやってルールを取り出すかを定義する必要は相変わらず存在する。そして、これらの定義がAIの性能を決める。最適ではないデータを使ってアルゴリズムを作ると、そのデータに即したモデルができてしまう。例えばだが、履歴書を使って採用のAI化を実施したとする。教師データにおいて、A大学がほとんど通過していたが、B大学はあまり通過していないとするとAIはA大学の人間を通過させる。そうするとB大学は落ちてしまうので、AIがそのデータを使って再学習させると、さらにB大学は落ちてしまうようになる。このようにAIはデータに偏りがあると、その偏りを再現する。この再現のうまさAIの賢い所でもあるが、弱点でもある。

## 4. AIをうまく使いこなす

### 4.1 AIの導入ステップ

AIの導入に関しては、ステップを整理する必要がある。ここでは8つのステップに整理してみた<sup>11)</sup>。

- ・ステップ1：課題を設定する
- ・ステップ2：使えるデータを選定する
- ・ステップ3：手法を選定する
- ・ステップ4：使い方を考える
- ・ステップ5：機械学習プログラムの作成
- ・ステップ6：本番適応
- ・ステップ7：再学習
- ・ステップ8：モデルの調整

まずは、なんのためにAIを導入するのかを整理し、コンセンサスを得る。次に、その課題の解決に関係するデータを集め、データの状況を確認する。そして、実際に統計モデルを作ってみて、精度や計算時間、足りないデータなどを確認してみる。その上で、現状での使い方を検討してみる。そして、機械学習をプログラミングし、使える事を確認してから本番適用する。このようなステップでAIを導入する事で、AIを開発し始めてからデータが足りない事が分かった、思ったような精度が出ない、精度をどう評価していいか分からないといったAIを導入する際の様々な問題に対応ができるようになる。

### 4.2 AIとの付き合い方

AI脅威論なる物が世間によくあり、AIが雇用を奪うとよく言われている。10～20年以内に労働人口

の47%が機械に代替されるリスクが70%以上の仕事についているというリサーチ結果もある<sup>12)</sup>。事実、AIによって人の仕事の一部はすでに代替され始めている。しかし、既にかいたとおり、現在主流となっているAIには学習の基となるデータが必要になる。そのデータから特徴量を取り出してくる。そして、そのデータは人間が選び出してきている。つまり、熟練工が一つ一つ丁寧に見た時の精度に勝つのは非常に困難である。つまり、ルーティンになっているタスクで高度な判断を伴わない仕事である必要がある。ただ、全てのデータやケースを見逃すことなくチェックし、瞬時に判断させるのには非常に向いている。

他にも、AIから出てきたデータを基に人間が判断するというAIとともに働くという選択肢もある。事実、1997年にチェスはAIが人間に勝利したがその8年後の2005年にPAL/CSSフリースタイルトーナメントという試合があり、当時世界最強のHydraというAIも参加し、チェスのグランドマスターも参加していたが、市販の5つのチェスソフトとアマチュア選手の混成チームが優勝した。彼はチェスソフトの結果から、良いと思う手を選び、指して言った事で優勝した。AIと人間のどちらかが強いではなく、AIの結果をうまく人間が理解し、人間が判断したのである。

### 4.3 海事におけるAI化

よく海事におけるAI化であると自動航行や画像による故障検知が出てくる。しかし、運航は経験豊富な船長や水先案内人がおり、容易に自動化できる部分には既に自動化されている。自動車の自動運転は練度が様々なドライバーがいて、通路も複雑に交差し、急制動が容易な車においては、有用性が高いが船舶に関してはこれが当てはまらない。その中で、どこの航行を自動化するのかはちゃんと定義されなければならない。また、画像診断も人間の目による検査は精度が高く、それに勝つのは容易ではない。衝突回避もルールが明確にある船舶においては、第二次AIのルールベースで十分になる。ただ、公海上における水面監視の一部や船内の各種センサーから上がるデータを活かした故障予知、各種マニュアルの検索高度化、積み込み時の計量を使った現場での積み荷最適配置、リアルタイムでの水面環境や風を考慮した船舶燃料の最適化、衛星画像を使った遠隔地からの水面監視、小型船舶の河川航行自動化、混雑海域における周辺船舶の航路予測といった分野においてはAIを活用する余地は多くある。これらは終日実施する必要はあるが常に熟練者が全てのデータや水面を見る事ができない、全てのデータだと

膨大になりすぎて熟練者が見る事が難しい、全ての現場に熟練者を配置する事が困難であるといったケースになり、AIが熟練者の補助や代替をする事で、熟練者の負荷軽減や未熟練者による熟練者並みの業務遂行を可能にする事ができる。

AIのできる事を探す手法は残念ながら、まだ確立されていない。熟練者がしているが、その中でデータを見れば分かる業務を積極果敢にAI化できないか試してみるしか、今の所の方策はない。

## 5. まとめと展望

本稿において、筆者の知りうる限りの2019年時点での現状を基に記述した。AIは確かにブームではあるが、第三次AIブームは産業界に非常に密接した物となっている。GAFaを中心にAIに蓄積されたデータを基にビジネスを成長させているケースは非常に多くあり、AIを脅威であるとして、避けて通る事は難しい。しかし、AIも全能ではなく、無理に期待するのを正しくない。AIのできる事できない事を踏まえて、AIのできる事をAIに任せ、AIができない事を人間がするというようなAIと協創する考え方がこれからは中心になる。

このような変革はコンピュータの登場によって、人類は経験している。コンピュータによって人間の仕事が奪われると脅威が叫ばれ、コンピュータ進化によってロボットが人間の代わりに働くと夢想された。しかし、実態はコンピュータを使って人間が様々な仕事をしているに過ぎない。

AIもコンピュータ同様に社会に根付く日が来るであろう。その時に海事業界がどう変わるかを考え、ぜひ業務に活用して頂けると幸いである。

## 参考文献

- 1) J. McCarthy, M. L. Minsky, N. Rochester, C.E. Shannon : A PROPOSAL FOR THE DARTMOUTH SUMMER RESEARCH PROJECT ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE
- 2) 松尾豊 : 人工知能は人間を超えるか
- 3) Toshiteru Homma, Les E. Atlas, Robert J. Marks II : AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR SPATIOTEMPORAL BIPOLAR PATTERNS
- 4) Yann Le Cun : Generalization and Network Design Strategies
- 5) <https://www.hpcwire.jp/archives/12646/>

20170619-june-2017-top500-performance-development

- 6) <http://image-net.org/>
- 7) <https://dx-suite.com/>
- 8) <https://www.forbes.com/sites/ptc/2014/06/23/will-the-internet-of-things-revolutionize-the-aircraft-industry/#47c2b1dc3a75>
- 9) Yuta Kaneko, Katsutoshi Yada, Wataru Ihara, Ryunosuke Odagiri : How Game Users Consume Virtual Currency
- 10) Hoki Kunihiro : Optimal control of minimax search results to learn positional evaluation
- 11) 井原渉 : AI導入の教科書
- 12) Frey&Osborne : Frey&Osborne research 2013



# NKのデジタルライゼーションの取り組みについて

佐々木 吉通\*

## 1. はじめに

近年、新聞やTVなどのマスメディアにおいて“デジタル”や“デジタルライゼーション”といった言葉を見ない日はないと言っても過言でない。自動車や航空機、風力発電などの多くの産業は各情報のデジタル化やそれらの活用を積極的に行っている。

本分野は日進月歩で急激に変化していること、時に異なった意味で用いられる場合もあることから、初めに本稿に於ける主要な用語の定義を以下のように明確にしておきたい。

- ・デジタルライゼーション：紙などのアナログデータをデジタルデータ化すること
- ・デジタルライゼーション：プロセスをデジタル化し効率化すること。
- ・デジタルトランスフォーメーション（略称、DX）：デジタル技術による経営やビジネスモデルの変革

デジタルライゼーションやデジタルトランスフォーメーションは、特にBtoB企業の場合、単独で推進することは困難な場合があり、産業全体もしくは国家的に推進されている。我が国においても経済産業省が中心となり、デジタルトランスフォーメーションを推進するガイドライン<sup>1)</sup>等を公開している。

さて、海事産業においては、通信環境の問題や、航行時に機器の堅牢性がまず求められた背景から、デジタル化に関連する取り組みは他産業に先んじているとは言い難い状況であった。しかしながら、近年では情報通信技術の進歩と、環境保護、安全性向上、効率化の観点から、船舶で発生するデータを有効活用する動きが飛躍的に活発になってきている。

## 2. NKのこれまでの取り組み

### 2.1 デジタル化に関するアプローチ

日本海事協会は、船級協会として120年の歴史を持ち、船級規則の開発運用、条約検査の実施等いわゆる“Regulator”として認知されている。一方、設計及び建造から運航に至る船舶の一生に関わる立場、すなわち船舶の生涯にわたるデータを利用し易

い立場でもあり、近年はこれらデータを用いた“Innovator”として、あるいは業界の“Innovation”をサポートする立場として、業界に貢献すべきとの要望も多くなってきている。

そのため、本会はデジタル化に関連する基準やガイドライン等の作成及び基盤やサービスの提供等“Infrastructure”の整備を進め海事産業のデジタル化に貢献する方針の下、様々な活動を加速させている（図1参照）。

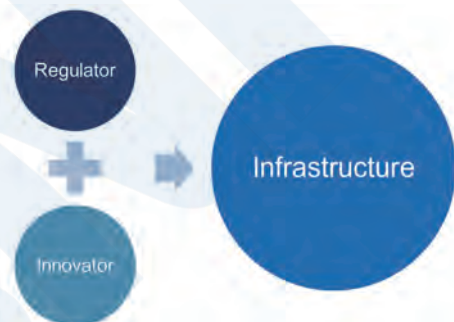


図1 NKのアプローチ

### 2.2 活動事例

図2に2010年以降NKが提供してきたデジタル化に関する基盤、サービス及びガイドラインを年表形式に纏めた。

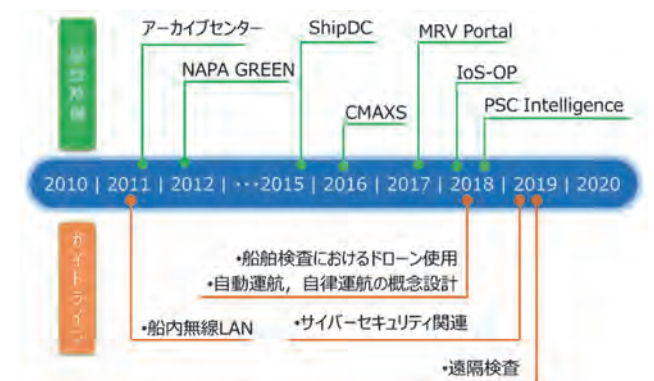


図2 NKのデジタル化に関するこれまでの活動

以下に、代表例を紹介する。

#### 2.2.1 IoS-OP

IoS-OP（Internet of Ships Open Platform）は、

\* デジタルトランスフォーメーションセンター

船上データ等のデータ流通基盤であり、**図3**に示すように船上データを収集、陸上へ送信し、陸上に保管されたデータを共通のルールに基づいて利用者に流通させるようになっている。これにより、データの発生から活用まで公平で透明性のある共有を実現し、各社が得意分野に自由に参画できる特徴を持つ。データ収集、陸上への転送の効率化を図ると共に、陸上に蓄積された膨大なビッグデータを用いた新たなソリューションの展開を目的としている。

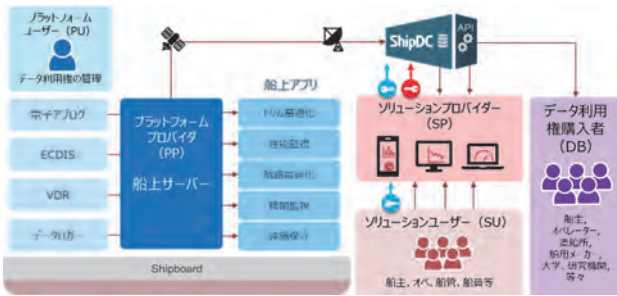


図3 IoS-OPにおけるデータフロー

データ提供者の利益を維持しつつデータ流通を促進するためIoS-OPコンソーシアムが設置され、共通ルール (IoS-OP規約) の整備、セキュリティ等の技術的検討、ビジネスの場の提供等の活動が行われている。コンソーシアムには国内企業を中心に58企業及び団体が参加しており、海外への展開も積極的に行っている状況である。なお、IoS-OPのデータ流通事業は、ビジネスにおけるデータ流通の革新的取り組みと認められ、総務省、経済産業省及び国土交通省から“公的データ提供要請制度”の初認定<sup>2)</sup>を受け、国などが保有しているデータの提供を要請できるようになった。

### 2.2.2 モニタリング

船舶の運航には安全かつ定時性が求められる。そこで、船舶の状態を収集し分析するモニタリング技術が重要となる。

国内では大手オペレータ等が主導することにより、モニタリングに関する多くの研究開発プロジェクトが進行中であり、既に一部は実用化の段階に入っている。また、海外では大手の主機メーカーやシステムインテグレータ等がモニタリングデータの活用に向けた活動を加速している。このような状況の下、NKは業界のトップランナーの活動を支援すべく、適宜、研究開発プロジェクトへの参画するとともに、業界関係者との意見交換等を積極的に進めている。

また、船上機器に関するモニタリングのソリューションとして、本会は多数の機器メーカーとアライアンスを結び各種船上機器のモニタリングと適切な保守管理を支援する「ClassNK CMAXS」を展開

している。大きく「機器の状態監視システム」と「保守管理システム」の2種類のグループで構成され、船内で実施された保守作業や各機器の状態監視情報は、船上の各システムを通じてクラウドデータベースであるCMAXS Data Baseに格納され、世界中のどこからでも閲覧可能である。特に「機器の状態監視システム」では、**図4**に示す機器の自動異常診断の他、自動状態診断に加えてトラブルシュート機能を装備しており、また機器によってはセンサーデータに加えて気海象等の航海データを含めたビッグデータ分析を行い、機器に対して早期の異常診断が可能である。

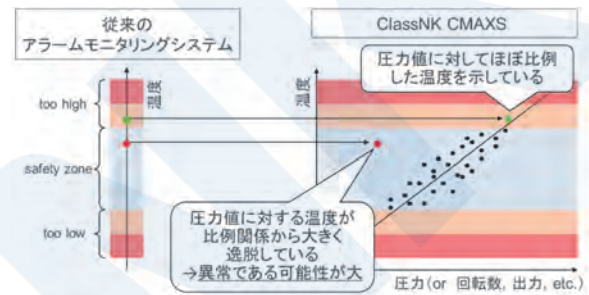


図4 CMAXSの一例

一方、船速、船位などの運航情報と貨物積載重量及び実海域での気海象データ等から船体にかかる応力を推定し、船体構造の疲労余寿命等の分析を行う「船体モニタリング」技術についても、実用化に向けた検討を進めている。

### 2.2.3 ClassNK MRV Portal

燃費消費実績報告制度に関する欧州規則の制定<sup>3)</sup>及びMARPOL条約付属書VIの改正<sup>4)</sup>により、各船舶における燃料消費量等のデータ収集を行い排出報告書 (エミッションレポート) の提出が義務付けられるようになった。NKは、これらの要求事項への対応をサポートするためのシステム“ClassNK MRV Portal”を提供している。**図5**に示すように、モニタリングデータと信憑書類 (Bunker Delivery Notes等) を、本船もしくは陸上からサーバーへ送信、蓄積されたデータによるエミッションレポート作成のサポートを行うとともに、受信されたデータギャップの検知機能も提供している。

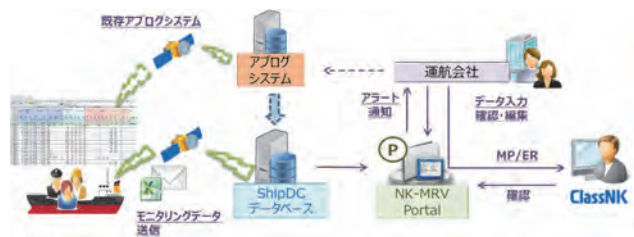


図5 ClassNK MRV Portal概念図

## 2.2.4 PrimeShip-PSC Intelligence

ポートステートコントロール（PSC：寄港国検査）のパフォーマンス向上及び船舶管理システムの改善をサポートする情報システムである。各国、港の拘留件数や指摘欠陥の傾向分析、その傾向に基づく各国、港のPSCチェックリストの出力及び管理船舶に頻繁に指摘された欠陥内容を分類、レビューすることが可能である。PSC Intelligenceの概念図を図6に示す。



図6 PrimeShip-PSC Intelligence概念図

## 2.2.5 Data Driven Regulation

これまで、船級規則の改正を行うにあたっては就航船検査の結果を基とした研究結果のフィードバックが主体であった。しかし、現在では検査結果の他に設計、建造、運航といった船舶の一生で発生するデータを用いた規則改正を行うことが可能である。

図7は、構造規則の強度評価のために用いる設計波の検討に関するコンセプトを示している。船体構造の安全性確保するには、船舶が遭遇する最も厳しい海象を基に検討されるが、通常、船舶は荒天海象を避ける操船を行うことが一般的である。現在では、自動船舶識別装置（AIS：Automatic Identification System）から運航データが入手可能で、個々の船舶の実航路情報を得ることができる。これに全球レベルの気象データを掛け合わせ、船舶が実際に遭遇する波の波高、出会い波向き、荒天海象下での船速の実態を把握することができる。現在、NKでは、これまで得ることができなかった数万隻分の操船の実態を参考にして、規則設計波の開発に取り組んでいる。

## 2.2.6 Cyber Security

デジタル化及びデータ共有化が進むと、通信傍受、データ改竄などのサイバーリスクが高まり、これらに対する措置いわゆるサイバーセキュリティの確保が重要になる。海事産業においても、BIMCOなど

の民間組織がサイバーセキュリティに関するガイドライン<sup>6)</sup>を公開し、IMOからもサイバーセキュリティに関するガイドライン<sup>6)</sup>や非強制決議<sup>7)</sup>を、国際船級協会連合（IACS）からもサイバーセキュリティにおける推奨事項<sup>8)</sup>が公開されている。

NKは、これら国際機関や海事関連団体の動向も踏まえ、サイバーセキュリティに対する基本的な考え方として「ClassNKサイバーセキュリティアプローチ」を発表している。

「安全運航の確保」を船舶におけるサイバーセキュリティ対策の最重要事項と位置付けた上で、図8に示すようサイバーセキュリティ対策を5段階の階層で整理し、「どの関係者が何をすべきか」について明確にした。更に、技術の進展や国際動向を踏まえ、最新のサイバーセキュリティに関する情報を分析しその時点におけるベストプラクティスを提案していくこととしている。

この考えに基づき、サイバーセキュリティ対策の実施主体者と対策内容を示した3つのガイドラインを「ClassNKサイバーセキュリティシリーズ」として公表している。

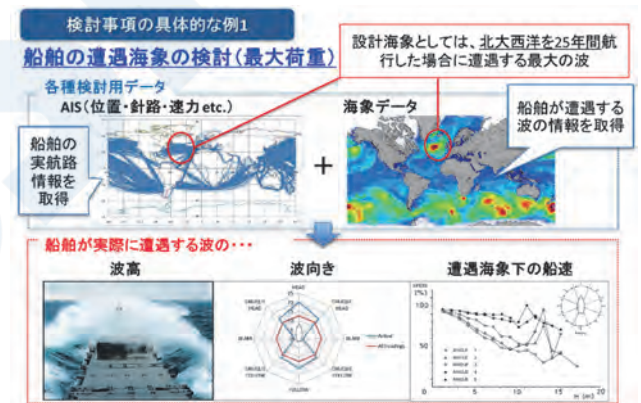


図7 データを用いた規則改正の一例

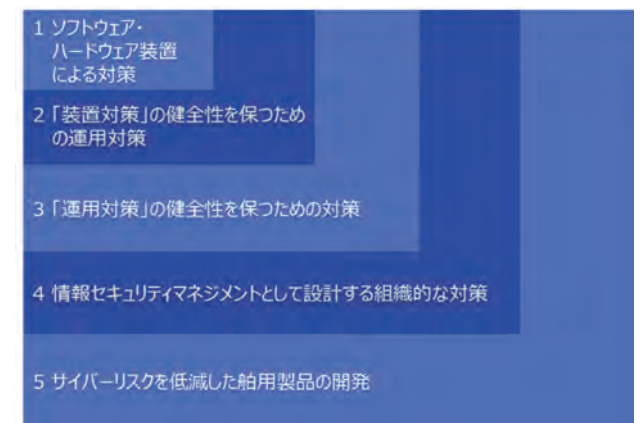


図8 サイバーセキュリティ対策の階層



## 2.2.7 CBM

2.2.2で紹介したような機器の状態監視により得られた結果から必要な保守点検を行う状態監視保全 (CBM: Condition Based Maintenance) については、1994年から本会の設備規則に取り入れ、1997年には鋼船規則等において、船級維持検査として状態診断結果に基づく検査方式を採用できる旨明記している。さらに現在、近年の計測技術等の発展に伴いCBMの活用を推進すべく、検査に関する規則体系の見直しを行う規則改正を進めている。具体的には、これまで個船毎に全ての機器に対して同一の検査方式を求めていたが、これを機器毎に検査方式を選択できるよう、すなわち一部の機器にのみCBMを採用し残りの機器には機関継続検査\*1を選択するといったことが可能になる予定である。

## 3. デジタライゼーションの先へ

ここまで、NKのデジタライゼーションに関する取り組みを紹介してきた。しかし、業務をデジタル化することは手段の一つであって目的とはならない。NKは、業界のデジタライゼーションの先にある、デジタル技術を用いた業務変革 (デジタルトランスフォーメーション: DX) を起こし、海事業界全体のさらなる安全性向上と効率化に寄与したいと考えている。

### 3.1 DXセンターの設立

業界全体のデジタルトランスフォーメーションを検討するにあたっては、各業務範囲での検討ではなく、広範囲な視野でそれぞれの業務課題、将来構想を結び付けて検討する必要がある。そのため、NKは2019年1月にデジタルトランスフォーメーションセンター (略称: DXセンター) を、事業本部から独立したデジタルトランスフォーメーションの専任部署として設立した。

このDXセンターは、海事社会のデジタル化に対応した規則及び指針の整備、検査の革新及び高度化更に関連する技術サービスの開発等、NK内外のデジタルトランスフォーメーションを目指して活動を進めている。

### 3.2 デジタルグランドデザインの策定

デジタルトランスフォーメーションを進めるうえで、冒頭にふれた経済産業省のDX推進ガイドラインは押さえるべき事項の一つとして、「ビジョンの提示」を挙げている。そこで、これまでのNKのデ

ジタル化の取り組みを整理しつつ、海事産業を取り巻く社会や技術などの環境変化を踏まえた課題の明確化を行い、デジタルトランスフォーメーションのアクションプランとなる「NKデジタルグランドデザイン」の作成を進めている。各種動向調査等が必要なため、現在も作業中であるが、近日中に公開する予定である。

### 3.3 検査のデジタル変革

デジタルトランスフォーメーションの一例として、就航船検査について図9のような変革を検討している。

船上で収集された機器のセンサーデータや運航データは陸上のデータセンターに送信、格納される。これらのデータは気海象データを含めてモニタリング技術で処理され、その結果はデジタルツインデータベースに登録され設計及び建造データと連携される。デジタルツインとは、サイバー空間に現実世界の事象を再現することであり、すなわち船舶の今の状態をPCの中で再現したシステムである。このデジタルツインデータをNKの「統合型検査支援システム」が解析を行い、個船の状態に応じた検査項目を決定する。更には、船舶管理会社にそれら検査項目と運航情報を加味した検査場所、検査日の候補を提案することを検討している。

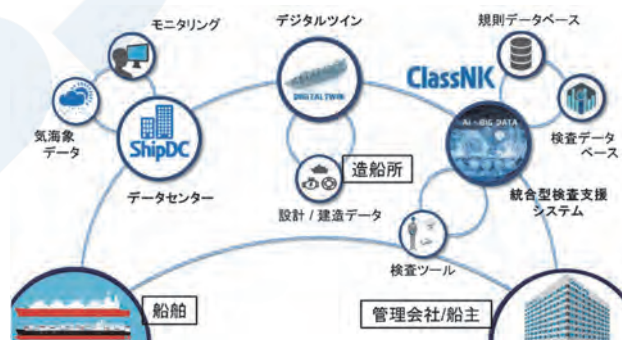


図9 Data Driven Survey Scheme

従来の規則では、検査項目は船齢や船種といった船舶要目で定められているが、将来的には個船のデータに基づく状態診断結果に応じて検査項目を定めていく“Data Driven Survey Scheme”への変革を見越して、技術的な検討を進めている段階である。

### 3.4 設計のデジタル変革

一方、造船所等で行われる設計業務においても、図10のようなデジタル変革を検討している。

造船所でのCADシステムと連動したクラウドベ

\*1 機関継続検査: CMS (Continuous Machinery Survey) のこと。対象機器の検査を、NKにより承認された検査計画書に従って、それぞれの対象機器の開放期間が5年を超えないように、開放検査を順次行う検査方式である。

ースの「規則評価システム」を提供し、設計データでシームレスに評価を行う環境を整備する。同システムはCADデータのオブジェクトを分析し、データベース化された規則から要求される要件を自動判別し評価を行う。

設計検討が完了した設計者は、CADデータの承認申請を行う。NKの審査担当者は、評価条件の確認やサンプリング評価を実施し、設計検討段階に適切な評価が行われたことを確認する。確認後、CADデータに対して承認ステータスを付与し、コメント等がある場合はCADデータの当該箇所に直接付していく。

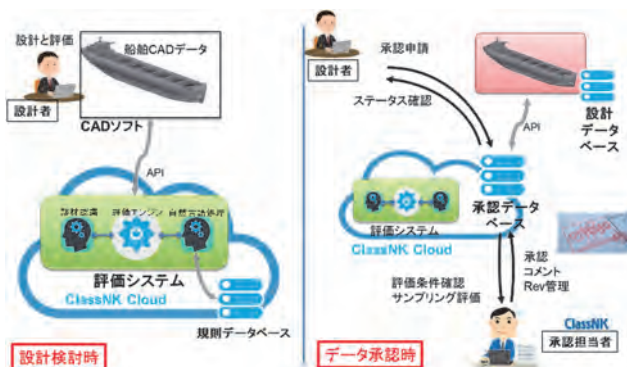


図10 データ承認コンセプト

これまでの紙情報を主体とした図面承認では、CADデータを提出図面用に加工したり、別途評価用のモデルを準備したり、紙図面に付されたコメントをCADモデルに手動で反映する等の作業が必要であった。すなわち設計データと承認に関するデータが分離されており、人がその間に介在して作業を進めていた。NKはデータ承認によって、設計データと承認データのシームレス化を想定している。実現には様々な解決すべき課題があるが、技術的な検討を一つずつ進めている段階である。

#### 4. まとめ

本稿では、NKの海事産業のデジタル化についての取り組みについて紹介を行った。船級協会の立場として、デジタル化に関する基盤の整備、サービスの提供、ガイドラインの作成などを行うとともに、デジタル技術を用いた業務変革（デジタルトランスフォーメーション）に向けた検討を進めている。

一方、船級協会自身が創出するデータは船舶の生涯にわたるデータのごく一部であることから、海事産業の多くのステークホルダーと一緒に、それぞれのニーズとシーズを結合して、業界全体のデジタルトランスフォーメーションを実現したいと考えてい

る。

今後各位の協力を得ながら、ますますの安全性向上と効率化が実現するよう、海事産業全体のデジタルトランスフォーメーションを目指した活動を続けていく所存である。

#### 参考文献

- 1) 経済産業省：デジタルトランスフォーメーションを推進するためのガイドライン，2018
- 2) 総務省 情報流通行政局 プレスリリース：公的データ提供要請制度を活用できるデータ共有事業を初めて認定しました，2019年6月24日
- 3) REGULATION(EU) 2015/757 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL : on the monitoring, reporting and verification of carbon dioxide emission from maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC, 2015
- 4) IMO : Amendments to MARPOL Annex VI (Data collection system for fuel oil consumption of ships), RESOLUTION MEPC.278(70), 2016
- 5) BIMCO他 : THE GUIDELINES ON CYBER SECURITY ONBOARD SHIPS
- 6) IMO : GUIDELINES ON MARITIME CYBER RISK MANAGEMENT, MSC-FAL.1/Circ.3
- 7) IMO : MARITIME CYBER RISK MANAGEMENT IN SAFETY MANAGEMENT SYSTEMS, RESOLUTION MSC.428(98), 2017
- 8) IACS : Recommendation, REC153 Recommended procedures for software maintenance of computer-based systems on board ~ REC164 Communication and Interfaces, 2018



# NKの自動運航船に対する取組み

山田 智章\*

## 1. はじめに

### 1.1 背景

近年、センシング技術やAI、IoT等の技術が急速な進歩を遂げており、様々な分野で活用されている。自動車分野においては、これらの技術を活用して自動運転技術の研究開発や実証実験が積極的に行われており、ブレーキやアクセル、ステアリングなどの一部機能の自動運転技術は既に実用化されている。

船舶の分野においても、ヒューマンエラー防止による安全性の向上や、乗組員の作業負担の軽減による労働条件の改善等を目的として、国内及び海外において、自動運航技術の研究開発が盛んになってきている。

海外においては、研究段階から開発段階へ進展しつつあり、特に北欧を中心に自動運航船の実証実験が行われている。日本国内においても、国土交通省が2018年6月に自動運航船の実用化に向けたロードマップを策定すると共に、自動運航船に必要な要素技術開発を促進させるための支援事業、自動運航船の実用化を促進させるための実証事業、自動運航船のコンセプト構築を目的としたプロジェクト等が立ち上げられており、産学官が一体となって2025年までの自動運航船の実用化を目指しているところである。

### 1.2 社会的課題

自動運航船に関する技術開発は着々と進められている一方で、自動運航船の実現のためには、自動運航船が安全に運航できるための法整備が必要である。IMOにおいて、2017年6月に開催されたMSC98から自動運航船が議題として取り上げられるようになり、現在は自動運航船に関わるIMOの諸規制の論点整理が進められている。また、2019年6月に開催されたMSC101では、自動運航船を開発する際のトライアルに関する暫定ガイドライン（以下、IMO暫定ガイドライン）が承認され、自動運航船関連のシステムやインフラの試験的な運用の際に考慮すべき基本方針が取りまとめられている。

このように法整備についても作業が進められている一方で、技術開発のスピードにまだ追いつけてい

ないのが現状である。特に、事故時の責任の所在等、運用時に非常に大きな影響を与える項目については、慎重な議論が必要である。

### 1.3 技術的課題

IMOでは自動運航船を以下に示す4つに分けて定義づけている。

Degree one: Ship with automated processes and decision support

Degree two: Remotely controlled ship with seafarers on board

Degree three: Remotely controlled ship without seafarers on board

Degree four: Fully autonomous ship

Degree oneの場合、乗組員の作業負担軽減が開発の主眼になる。人間は認知、判断、対応といったプロセスを経て意思決定を行う。船員も同じで、刻々と変化する環境に対して、状況を正しく認知し、その状況下における最適な判断を行い、対応につなげることで船舶の安全を維持している。この認知、判断、対応の意思決定プロセスの中では、認知と判断が自動化の難易度が高い。

例えば、乗組員が行っている見張り（認知）を自動化しようとする、人間と同等のセンシングが可能な技術を開発する必要がある。既存のレーダーでは見つけきれないボートや漁具なども探知できる超高性能レーダーを開発する、あるいは、センサーフュージョン技術を高度化する、陸上から支援する等の方法論があると思うが、真に「人間と同等」を実現するためには相当に高い技術が必要である。

また、判断の自動化においては、AI技術を活用するという発想があるが、使用する人間から見たとき、機械の判断根拠が明確でない場合、素直に機械の判断を信用できないのが実状である。人間が何気なく行っていることを自動化しようとした場合、いかに人間が高度なことを行っているかを思い知らされる。

Degree twoにおいては、遠隔制御者に正しい情報が適切な時間軸で提供可能な通信環境を構築することが最初にクリアすべき技術的ハードルとなる。航行海域を限定することでこのハードルを下げるこ

\* 技術研究所

とは可能であるが、それ以外にも、通信が遮断されたときの対応や外部からのサイバー攻撃への防御手段も技術的に確立させなければならない。

また、Degree threeとDegree fourのように完全無人化を目指す場合には、陸上からの支援体制の整備も含めた、要素技術単位での更なる技術開発が必要である。特に、限定領域とフォールバックをどのように設計するかが重要なポイントになる。

なお、自動運航船の実現は段階的に進むと考えられており、その過程において自動運航船と非自動運航船が混在する状態が必然的に発生する。このように多種多様な特性を持った船舶が混ざり合った状況にも対応しないといけないことも技術的ハードルを高くしている。

## 2. 船級に求められるもの

船級協会は、完全に独立した第三者として、これまでの船舶に対して、規則や技術基準を開発し、設計や建造時の品質をチェックし、就航後も必要最低限の運航能力が維持されていることを検査や審査の手法を用いて確認することで、その役割を果たしてきた。自動運航船においてもその原則は変わらない。

自動運航船の規則や技術基準の開発においては、最上流にあたるIMOにおいて健全な議論がなされることが重要である。時には日本の船級協会として、時にはIACSメンバーとして、技術的にサポートすることが本会の役割となる。特に、国際的な取り決めは、安全を担保する上での必要最低限の内容でなければならない。規則に落ち度があり事故が発生してしまうことは論外であるが、過度に安全側に規則設定してしまうことで技術の進歩を妨げてしまうこともあり得る。船級協会には、そういった観点からのバランス感覚が求められる。

適切な規則や技術基準を開発するためには、何よりも船級協会自身が自動運航船について精通していなければならない。そのためには、国会自身の研究開発とともに、業界と連携した研究開発が必要である。本会の場合、幸いにして、既に国内で複数の自動運航船のプロジェクトが立ち上がっており、それらに対して本会も実施者や評価者といった立場で参加させていただいている。実プロジェクトから得られる知見は非常に貴重であり、船会社、造船所、船用機器メーカー、大学、研究機関からの参加者の直接の声も聞きながら、合理性のある規則開発に繋げていきたい。このように業界の全ての関係者が揃っていることは日本の大きな強みである。

これらの取組みを通じて得た知見については、ガ

イドライン等にまとめ、自動運航船関連技術の開発者に対し、実装に向けた手順や手続きを明確化することで、業界の技術開発の一助になるよう務めていきたい。

## 3. NKの取組み

### 3.1 概念設計ガイドラインの発行

本会は2018年3月に「自動運航、自律運航の概念設計に関するガイドライン（暫定版）」を発行した。このガイドラインは、自動運航船の設計開発が多様な形態やコンセプトのもとで行われることを想定した上で、自動運航船の安全性確保のために考慮すべき要件を取りまとめたものである。なお、本ガイドラインでは、アラームのON/OFFといった単純な自動化を担うシステムとの区別を行うべく、認知・判断・対応といった人間の意思決定プロセスの一部もしくは全てを担うシステム（以下、自動化システム）を対象としている。

自動化システムの設計においては、以下に示す安全性確保のための基本要素を概念設計の段階から可能な限り明確化し、適切なリスク評価の手法に基づいて設計の安全性の検証を行うことが重要である。

- (1) 自動化の対象
- (2) 自動化システムと人間の役割分担
- (3) 限定領域
- (4) フォールバック
- (5) ヒューマンマシンインターフェース
- (6) サイバーセキュリティ
- (7) コンピュータシステムの信頼性

特に、自動化システムが使用される前提であり設計条件ともなる「前提条件」、システムが適切に機能を果たす範囲である「限定領域」、限定領域から逸脱した際に危険を最小化するために行う「フォールバック」の3つが自動化システムの安全性を検証する際の技術的なポイントになる。この3つの領域を広げることができれば、より高次元の作業の自動化が進んでいくと考えている。

### 3.2 実証事業への参加

1.1でも少し触れたが、国土交通省が2025年までの自動運航船の実用化に向けた取組みとして、自動運航船のコアとなる自動操船機能、遠隔操船機能及び自動離着岸機能に対する実証事業を2018年7月より開始した。本会はこの実証事業に対し、実施者あるいは評価者の立場で参加させて頂いている。実証事業が安全に実施されるように注力すると共に、システムの開発段階からプロジェクトに入り込むことで、近い将来に実現される自動操船機能、遠隔操船

機能，自動離着機機能の3つの機能に対する評価技術の確立を図っている。

### 3.3 自動化システムの開発並びに船舶搭載に関するガイドラインの作成

#### 3.3.1 基本的な考え方

自動化システムの実装のためには，3.1に記載した概念設計に加え，自動化システムの設計開発，自動化システムの製造，自動化システムの船舶への搭載のそれぞれのステージにおいて，その安全性が確認されなければならない。同時に，運航中の保守管理についての方法，手順についても明確化しておかなければならない。こういった思想の下，本会は2019年末を目処に，自動化システムの設計開発，製造，搭載，運航中の保守管理の各ステージにおける要件を取りまとめたガイドラインを発行する予定としている。本節では，当該ガイドラインに記載予定の内容のうち，代表的なものについてその概要を記載する。

#### 3.3.2 自動化システムの設計開発時における安全性の確認

自動運航船において，多種多様に存在する船上作業の「どの部分（対象）」を「どのくらい（範囲）」自動化するのかを明確にする事が非常に重要となる。例えば，避航操船をシステムによって自動化する場合と，エアコンのように単純な温度管理を自動化する場合では，その意味するところは大きく異なる。本会が想定している自動化システムは，操船系，機関係，電力管理，貨物管理等に直接的に携わる作業を自動化するものであるが，このような相当に複雑な作業を自動化するシステムの安全性確認のためには，システム開発の段階において，以下に示す2項目について審査を行う。

- (1) 自動化システムの設計開発体制及びプロセス
- (2) 自動化システムの機能

(1)においては，設計の妥当性を評価する。自動化システムの開発者が適切な能力を有している事や設計開発が適切なプロセスで行われている事の確認が主眼となる。例えば，システムを構成するソフトウェアやハードウェアの信頼性や妥当性を自身で検証する能力を有していることが求められる。

(2)においては，開発された自動化システムが，設計時に作成された要求仕様を満足していることを検証するため，機能確認試験の実施が必要である。この機能確認試験には，システム開発者が自身で指定した試験方法と本会が指定した試験方法の2種類の試験によって実施することを想定している。

機能確認試験として，例えば，操船系の自動化システムのように，自動化システムが多種多様なシナ

リオに対応していることを検証しなければならない場合は，シミュレーションによる評価が有効である。開発者が行ったシミュレーション結果に基づき，本会は試験の網羅性，試験結果の妥当性の評価を行う。

なお，システム開発段階において自動化システムの安全性の評価を行う際，まだ実在していないシステムを対象とすることから，自動化システムの機能によっては，その有効性の検討にエキスパート判断が必要になる場合も想定される。特に，人間の関与も含めた自動化システムの安全性の確認（例えば，避航操船時の離隔距離，避航開始時期や，自動避航機能からの船員への引き継ぎ）には，自動化の対象となるタスクに対する実経験に基づいた評価が有効と考えられる。このため，操船シミュレーター等のシミュレーターを対象システムの機能を埋め込み，各種シナリオでの自動化システムの妥当性を検証することも有効な手法であると考えている。

#### 3.3.3 船舶搭載時における安全性の確認

3.3.2で述べたように，自動化システム単体の安全性が設計開発・製造の段階で確認できていれば，船舶搭載時においては，関連機器類やセンサー類と自動化システムの連結，統合が適切に行われていることを書類審査及び船上試験によって確認することになる。

自動化システムの船舶搭載までの流れとして，以下のような手順を想定している。

- (1) 個船設計に対する図面審査
- (2) 船上におけるシステム統合試験の実施
- (3) 実運航における確認試験の実施

#### 3.3.4 船員のトレーニング

いかに高度な自動化システムだとしても，それを使いこなすのは人間である。特に，有人自律を前提とする自動化システムの場合は，乗船している船員が搭載されている自動化システムを正しく理解して使いこなせるようにしておくことが重要である。例えば，フォールバックの実施主体が船員の場合，自動化システムの限定領域に対して正しく理解しておくと共に，フォールバックの手順や要する時間についても正しく理解しておかなければならない。また，自動化システムに対する過信も大きなリスクとなる。

そのため，船員を含む自動運航船の運航に関わる関係者のために，自動化システムに関する説明資料（マニュアルや自動化システムの概要や機能の解説を含んだもの）を用意し，必要に応じて活用できるように船舶へ搭載しておくとともに，船員に操作習熟のためのトレーニングを実施することが重要である。

### 3.3.5 リスク評価

自動運航船においては、予測されうる不具合が引き起こされないように十分な考慮が払われなければならない。その観点において、自動化システムの安全性を評価する手法として、リスク評価は非常に有効である。

自動化システムに対してリスク評価を行うタイミングとして、自動化システムの概念設計時(3.3.1)、自動化システム開発時(3.3.2)と船舶搭載時(3.3.3)の3つのタイミングがあるが、概念設計時に行うリスク評価は自動化システム開発時に行うリスク評価と同時に実施することもあり得る。

#### (1) 自動化システムの概念設計及び開発時に実施するリスク評価

搭載船舶の仕様が確定していない状況において、運航時における全ての状況を想定してリスク評価を行うことは現実的ではない。そこで、システム開発時に実施するリスク評価は、システム単体に対するハザードを中心にリスク評価を実施することが推奨される。また、それらのハザードに対するリスク制御対策が搭載船舶の仕様に影響されるような場合においては、システム開発時は、そのハザードの抽出に留め、船舶搭載時に実施するリスク評価の際に、具体的なリスク制御対策を講じることが重要となる。

#### (2) 自動化システムの船舶搭載時に実施するリスク評価

自動化システム単体に起因するリスクはシステム開発時に検証済みであるとの考えから、船舶搭載時に実施するリスク評価は、船舶と自動化システムの連携に関するハザードを中心にリスク評価を行うことを推奨する。

特に、下記について想定すべきハザードを洗い出し、自動化システム搭載船の安全性が確保できるように、必要なリスク制御対策を講じることが重要である。

- a) ヒューマン - マシンインターフェースに起因するリスク
- b) 自動化システムに連結されるセンサー類や制御機器の不具合
- c) 自動化システムが搭載船舶の他のシステムに与える影響
- d) サイバーセキュリティ
- e) 火災や海賊の侵入等の非常事態発生時

### 3.3.6 自動化と遠隔制御

自動運航船において、自動化と遠隔制御がひとま

とめにされて議論されることが多いが、本来、自動化と遠隔制御は全く異なる技術である。例えば、自動化システムの場合はアルゴリズムの妥当性が評価の主対象となるが、遠隔制御システムの場合は、船舶と遠隔制御施設をつなぐ通信の安定性が何よりも重要となる。

操船でのユースケースをイメージした場合、安定した通信インフラを維持できる沿岸では遠隔制御が、幅狭海域では遠隔支援と自動避航操船システムが、外海の航海では自動操船システムが使用されるといった状況が想定される。また、湾内においても、離着陸を自動化システムで行ったり、遠隔制御で行うこともありうる。ただし、いずれのケースにおいても、自動化か遠隔制御かどちらか一方の選択となる。理論上は、自動化システムのフォールバックを遠隔制御で行うことも考えられるが、現状の技術においては、非常に限定された環境下でのみ成立しうるのであり、汎用的なレベルまで技術開発が進むまでには、相当の時間を有するものと考えている。

一方で、前提条件、限定領域、フォールバックといったように、自動化技術と遠隔制御技術の両方に適用できる考え方もある。

そのため、自動運航船の安全性を正しく評価するためには、自動化と遠隔制御の違いを認識しつつ、どの船上作業にどちらの技術が適用されているかを理解しながら、それぞれの前提条件、限定領域、フォールバックの方法を中心にシステムの評価を行う必要がある。

## 4. おわりに

本稿では、船級協会の立場から自動運航船の安全性をどうやって評価すべきかについて、その考え方を中心に記載した。具体的な内容については、2019年末にガイドラインとして公表する予定である。本ガイドラインが自動運航船関連技術の開発並びに実用化に資することができれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 日本海事協会, 自動運航, 自律運航の概念設計に関するガイドライン(暫定版)
- 2) 日本海事協会, 船舶におけるサイバーセキュリティマネジメントシステム(第1版)(2019年3月)
- 3) 日本海事協会, 船舶におけるサイバーセキュリティデザインガイドライン(第1版)(2019年2月)
- 4) 日本海事協会, リスク評価ガイドライン(2017年12月)

## 「2020年からのSOx排出規制適合油の使用に関するガイダンス」の概要

技術研究所

## 1. はじめに

船舶から排出される排気ガスによる人の健康被害や大気汚染の防止を図るため、海洋汚染防止（MARPOL）条約附属書VIの第14規則に定めるSOxおよびPM規制により、2020年1月1日以降、一般海域で使用される燃料油中の硫黄分の規制値は従来の3.50% $m/m$ 以下から0.50% $m/m$ 以下に引き下げられる。

IMOが2016年に実施した規制適合燃料油（以下、適合油）の供給可能性調査の最終報告書<sup>1)</sup>によると、燃料油中の硫黄分濃度規制に対応するためには、留出油および脱硫した残渣油だけでは全ての船舶に十分な量を供給することが出来ないと予測されている。このため、2020年の需要の大部分は軽質留分以外の様々な低硫黄基材を混合して製造された適合油の供給で満たすことが前提となっており、適合油に混合される基材の比率が地域によって大きく異なる可能性が指摘されている。

混合比率の多様化に伴い、燃料油の硫黄分以外の燃料性状が従来の一般海域向け燃料油に比べて多様化することが予想される。燃料油の性状の多様化に伴い、使用時に一層考慮すべき点についてはIMOやISOの石油製品や燃料に関するWG等で議論されている。

日本海事協会でもこのような状況を踏まえ、適合油を安全に使用するために考慮すべき点、および適応策について、再調査、検討を実施し、今年3月に「2020年からのSOx排出規制適合燃料油の使用に関するガイダンス」を公表した。本稿では本ガイダンスの概要について紹介する。

## 2. 2020年からのSOx排出規制適合燃料油

## 2.1 SOx排出規制適合油の種類と製造プロセス

適合油の使用について論じる際に、予想される燃料の製造工程の変化、およびそれに伴う性状の変化について理解しておくことが重要だと考えられる。

船用燃料油の規格を定めたISO 8217:2017では燃料油の種類を表1のように分類している\*1。表1の分類は燃料中の硫黄分に必ずしも着目したものではな

いため、本ガイダンスでは、燃料中の硫黄分に応じた燃料油の略称および名称を表2のとおり定義する。

なお、これらの定義は、2019年5月に採択されたIMOガイドライン<sup>2)</sup>における定義と同一である。現在、Marine Gas Oil（MGO）もしくはMarine Diesel Oil（MDO）と一般的に呼ばれている燃料油は、表2においてULSFO-DMもしくはVLSFO-DMに分類される。

なお、ISO 8217:2017を補足する文書として公開仕様書（Publicly Available Specification（PAS））23263<sup>3)</sup>が2019年9月に策定され、適合油使用時に考慮すべき点として単独・混合安定性、動粘度、低温流動性、Cat-fines、着火性の将来の変化について解説されている。しかしながら、ISO 8217:2017から新たな基準項目の追加および既存の基準値の見直しは行われていない。

表1 ISO 8217:2017における燃料油の分類

略称	燃料の分類名称	説明
DM	Distillate Marine Fuels	ISO 8217:2017において留出油グレード（例えば、DMX, DMA, DMZまたはDMB）の規格が適用される燃料油。
RM	Residual Marine Fuels	ISO 8217:2017で残渣油グレード（例えば、RMD80, RMG180）の規格が適用される燃料油。

表2 燃料中の硫黄分に応じた燃料油の定義

略称	本ガイダンス内の名称	説明
ULSFO	Ultra-Low Sulphur Fuel Oil	ECA海域の硫黄分濃度0.10%規制に適合した燃料油。製造プロセスによってULSFO-DMとULSFO-RMに細分類される。
VLSFO	Very Low Sulphur Fuel Oil	硫黄分濃度0.50%規制に適合した燃料油。製造プロセスによってVLSFO-DMとVLSFO-RMに細分類される。
HSHFO	High Sulphur Heavy Fuel Oil	硫黄分が0.50%を超えて含まれる全ての燃料油。2020年1月1日以降は、SOxスクラバを搭載していない船舶では、0.50%を超えた燃料油は使用禁止となる。また、2020年3月1日以降は、SOxスクラバ非搭載船においては0.50%を超えた燃料油搭載も禁止となる。

\*1 ISO 8217:2017における燃料油の分類はISO 8216-1:2017の定義に従うとされている。



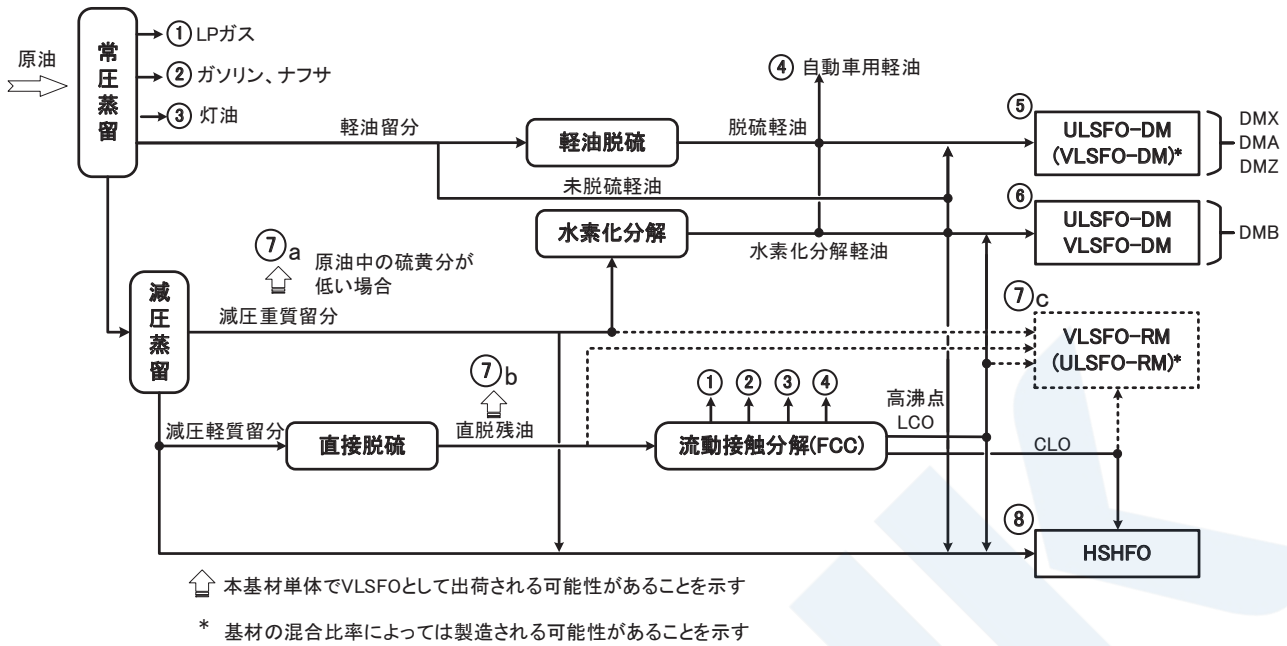


図1 予想される船用燃料油の製造工程<sup>4)</sup>

図1は船用燃料油の製造工程を示しており、点線は2020年以降予想される、硫黄分0.50%以下の残渣油グレードの燃料油（VLSFO-RM）の主な製造工程を示している。適合油は、低硫黄基材として軽油留分を主体として製造されること（例えば、図1中⑤、⑥）も考えられるが、経済的観点からは供給可能量は限定的と考えられる。つまり、多くの船で残渣分を含むVLSFO-RMを使用するものと思われる。

VLSFO-RMは図1の⑦a、⑦b、⑦cに示すとおり、主に3つの製造方法が想定されている。ただし、⑦aに関しては低硫黄原油の世界的な供給量が限られていること、並びに、⑦bに示す残渣分の脱硫については、世界の地域によっては直接脱硫の装置の容量が不足している場合もある。そのため、図中の様々な低硫黄基材が多く混合される⑦cの製法が主流になると考えられる。

低硫黄基材の候補として、流動接触分解装置（FCC）の生成油であるライトサイクルオイル（LCO）と、同じくFCCの生成油であるスラリー油からCat-finesを除去したクラリファイドオイル（CLO）がある。FCCは現在の製油所における重要な精製工程であり、ガソリン、軽油等軽質油分の収率を高めるため広く用いられている。FCCでは重質油が分解されて生成する軽質留分がパラフィン（直鎖）系主体（図1中①～②）となる一方で、中質や重質の生成油であるLCOやCLOは芳香族系主体となる。FCC装置は原理上、低硫黄留分（脱硫した減圧軽油留分、常圧脱硫残渣（一部減圧残渣））を使用するため、結果として、LCOとCLOの硫黄分は原油中の硫黄分を大きく下回る。そのため、適

合油のための低硫黄基材として、これまで以上に多く混合されるケースが多くなる。なお、上記のFCCの施設容量や原油性状が地域間、製油所間で異なることから、⑦cを製造する4つの基材の混合比は地域間、製油所間で大きく異なる。

## 2.2 パラフィンと芳香族

燃料油に含まれる炭化水素は、パラフィン系と多環芳香族系の2種類に大別される。2.1で説明した適合油の製造方法の多様化に伴い、パラフィン系を多く含む燃料と多環芳香族系を多く含む燃料の両者が2020年以降供給されることが予想される。両燃料には表3に示すような対照的な特性があると考えられる。

表3 パラフィン系主体燃料油と多環芳香族系主体燃料油の特徴

	パラフィン系主体	多環芳香族系主体
典型的分子構造	エイコサン (C20のアルカン)	ナフタレン
着火・燃焼性	良い	悪い
低温流動性	悪い	良い
混合安定性	2種の燃料油が混合されると悪化する可能性がある	

## 3. 適合油を安全に使用するために

### 3.1 低硫黄化に伴う適応策

エンジンにおいては使用する燃料油の硫黄分に合わせた塩基価（Base Number：以下BN）のシリンダ油を使用する必要がある。

現在HSHFOが使用される一般海域では2ストローク機関においてはBN70～100程度のシリンダ油が使用されているが、2020年以降は、硫黄分0.50%以下の燃料油に対応したBNのより低いシリンダ油を使用する必要がある。シリンダ油の選定については事前にメーカーに確認することが推奨される。なお、4ストローク機関においても同様に、適切なBNのトランクピストンエンジン油の選定について、事前にメーカーに確認することが推奨される。

### 3.2 燃料性状の多様化に伴う適応策

本会では、VLSFO-RMを安全に使用するために考慮すべき点および適応策について再評価を行い、混合比率の多様化に大きく影響される燃料性状のうち、特に、混合安定性、低動粘度、低温流動性、Cat-fines、着火・燃焼性の5つに注目した。なお、これら5つの性状は、PAS 23263において技術的に考慮すべきとされている。これらの性状は、ISO 8217:2017規格に準拠したVLSFO-RMであっても、燃料性状の幅が現在の燃料油より広がることで、これまでに取り扱った経験のない性状の燃料油が供給される可能性があるため、燃料油の性状によってどういったリスクが潜在しているのかを認識しておくことは重要である。これらの潜在的リスクに対しては、全く新しい知見が必要なわけではなく、実際には、これまでに蓄積してきた知見の中から、正しい答えを見つけてくる作業になると考えられる。その観点から、本ガイダンスでは、5つの燃料油性状に起因する潜在的リスクを取り上げ、それぞれのリスクに対し、これまでの知見を基に考えられる適応策の整理を行った。

なお、本稿はガイダンスの概要紹介であることから、各性状の基本的特性についての解説や適応策については本文から一部省略している。本ガイダンスはClassNKホームページにて無償で入手可能であるので、詳細な適応策については、こちらを参照頂ければ幸甚である。

#### 3.2.1 混合安定性

異なる2種の燃料油を混合した際に単独では保たれていた安定性が崩れ、いずれかの燃料に含まれていたアスファルテンスラッジ等が析出することがある。その析出のしにくさを一般的に混合安定性として定義する。ただし、PAS 23263においては、定義が追加され、参考として測定法が複数示されているものの、基準値については示されていない。

重油中のアスファルテンは、図2のように高分子量の芳香族を層状に吸着して安定なミセル (Micelle) を形成し、液状の炭化水素からなるマルテン (連続相) 中にコロイド状態として安定している<sup>5)</sup>。



図2 アスファルテンミセルの仮想図<sup>5)</sup>

アスファルテンミセルは、図2に示すように、アスファルテンの周囲に吸着する芳香族系炭化水素がアスファルテンのC/H比からマルテンのC/H比まで連続して円滑に低下する構造と考えられる。このように、コロイド状に分散しているアスファルテンが、他の燃料油との混合や熱的な変化あるいは酸化等の影響を受けて、ミセルの均衡 (バランス) がくずれ、アスファルテンからマルテンに至るまでのC/H比が不連続に低減すると、アスファルテンが凝集を開始し、さらに粒子が成長した結果、スラッジとして沈殿すると考えられる。なお、C/H比が高いことは一般に芳香族性が高いことを意味する<sup>5)</sup>。

#### (1) 想定されるリスク

前述したとおり、VLSFO-RMは、HSHFOと比べて燃料油組成がさらに多様化することが予想される。そのため、同じ油種であっても補油地により異なった組成の燃料油供給を受ける可能性がこれまでよりも高くなる。

現在においても、ストレージタンク内の油は極力使い切ってからバンカリングする努力が行われていると考えられるが、状況によってやむを得ず燃料油が残っているストレージタンク内に異なる油を補油するケースもあれば、ストレージタンクを分けていたとしても、セッティングタンクやサービスタンクでの混合、あるいは配管内等で、混合比率の異なる油が混合されることは起こりうる。そういった際に、例えば、「残渣油にCLOやLCO等の芳香族系基材を主体に製造したVLSFO-RM (芳香族系VLSFO-RM)」と「パラフィン系基材を主体に製造したVLSFO-RM (パラフィン系VLSFO-RM)」が混ざり合った場合、燃料油中の組成が大きく変化することにより単独で保たれていた安定性が崩されてしまい、混合油中にアスファルテンスラッジが析出・沈殿してしまう。

#### (2) 機器類のトラブルの推定

➤ 燃料油タンク内でアスファルテンスラッジ析出

- 燃料油配管のフィルター目詰まり
- 清浄機内でのスラッジ堆積の可能性

### (3) 適応策

以下のような対策が重要と考えられる。

- 可能な限り、ストレージタンクでは極力燃料油を使い切ってから補油する。
- ストレージタンクで燃料油を混合せざるを得ない場合は、混合比率を極力少なくするとともに、バンカー前にスラッジ分散剤を投入し、混合油は極力早めに使い切る。
- 燃料油切り替え時には、配管内もしくはサービス/セットリングタンクでの燃料油混合によるアスファルテンスラッジ発生リスクは避けられないが、運航への影響を抑えるためには、輻輳海域等で切り替えを行わない等の対策が考えられる。

### 3.2.2 低動粘度化

VLSFO-RMは、硫黄分を0.50%以下に抑える必要があるため、これまでベースとなっていた減圧残渣油、特に直接脱硫（直脱）を経ていない減圧残渣油の混合比は、これまでと比べて必然的に低くなる。また、2.1で述べたように低硫黄基材としてLCOおよびCLOが多く混合されることが予想されており、これらの基材は動粘度が減圧残渣油と比較してきわめて低いため、2020年以降に流通するVLSFO-RMの動粘度は従来のHSHFOと比べて低下すると考えられている。

一般に、燃料油の動粘度の低下に伴い、潤滑性も低下する。燃料油の潤滑性が低下すると、燃料油によって潤滑されている部品間の摺動部に損傷が発生する可能性がある。

#### (1) 想定されるリスク

低動粘度に起因するトラブルについては、2015年のECA海域における0.10%硫黄分規制が適用された際、ECA燃料（本ガイダンスではULSFO-DMに分類される）使用時に燃料噴射系機器のトラブルが発生した。その一例を図3に示す。HSHFOに代わり低動粘度のVLSFO-RMが使用されるようになり、そのVLSFO-RMの動粘度がECA燃料、例えばMGO並み、あるいはそれより更に低いものとなれば、同様のトラブルの発生が予想される。

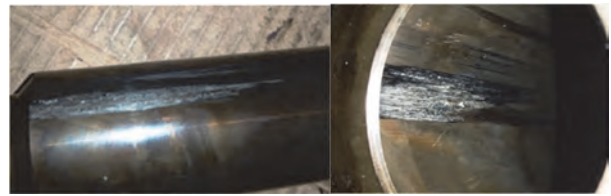


図3 主機の燃焼噴射ポンプのプランジャーおよびバレルでの掻き傷

#### (2) 機器類のトラブルの推定

基本的には、ECA燃料使用時に発生したトラブルと同じ事が起こりうると考えているが、(i)に示す4ストロークディーゼル機関における燃料弁周辺の低温腐食は、新しいリスクとなる可能性がある。

##### (i) ディーゼル機関

- 燃料噴射ポンプの固着（潤滑性の低下に起因）や起動失敗や回転数（負荷）上昇不可（内部摺動部の漏れ増大に起因）
- 燃料供給ポンプからの燃料油の供給不足に起因する回転数（負荷）上昇不可（動粘度の低下に起因）

##### (ii) 燃料弁周辺の低温腐食

- (ii) 燃料供給ポンプ/移送ポンプ/清浄機供給ポンプ
- 固着、ギアの摩耗、軸受け寿命の低下（潤滑性の低下に起因）
- 燃料供給量の不足、ポンプシール部からの漏れ（動粘度の低下に起因）

#### (3) 適応策

対象燃料油の動粘度が機関、機器類の使用に適しているか確認すること、および動粘度を確保・調整するための温度管理を徹底することが重要になると考えられる。運航中の対策例としては、機関入口において、メーカー推奨値以上の燃料油の動粘度を確保できるように燃料油の温度管理を行うことが挙げられる。（複数のメーカーにおいて下限値は2cStとされている。）

### 3.2.3 低温流動性

ワックス分が多く含まれる燃料油の低温流動性は、船舶のオペレーションに悪影響を及ぼす場合がある。

#### (1) 想定されるリスク

上述したとおり、VLSFO-RMは、従来のHSHFOと比べて低動粘度化が予想されており、燃料油をタンクから移送するための加熱を必要としない留出油並の動粘度の燃料油が流通する可能性もある。

しかしながら、低硫黄基材にはパラフィンを多く含むものがあり、それら主体に製造されたVLSFO-RMは、低動粘度かつパラフィンを多く含む（すなわち、低温流動性が悪い）ことがあり得る。このような燃料油では、温度が下がった場合、燃料油中の

パラフィンが結晶化してワックス（パラフィンワックス）として析出してしまふ。析出し、成長したワックスを含んだ燃料油が移送された場合は、燃料油ラインのフィルターの狭窄を招き、機関プラントへの燃料流量が減少し、最悪の場合閉塞してしまふ。

また、一度燃料油中に析出したワックスは熱伝導率が悪いため、液体に戻すためには多くの熱エネルギーが必要であり、析出してからの加熱では対応できない可能性がある。

## (2) 機器類のトラブルの推定

- ストレージタンクからの移送不可
- 燃料油配管内のフィルター目詰まり
- 清浄機内へのワックス付着・堆積

## (3) 適応策

パラフィンを多く含むVLSFO-RMにおいても、現在のHSHFOと同様に加熱使用すればワックス発生リスクを抑えることができる。したがって、燃料油を適切に加熱することが予防策として有効である。例として、温度管理の指標として、流動点+10℃以上に燃料油を加熱することが推奨される。

### 3.2.4 Cat-fines (Al+Si)

Cat-finesは、流動接触分解装置（FCC）で使用される触媒が使用過程で粉碎されて生じた粉末であり、アルミナ（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）とシリカ（ $\text{SiO}_2$ ）を成分とした非常に硬い粒子である。

FCCで使用される触媒は連続使用されるため製造プロセス中で回収されるが、触媒粉であるCat-finesはスラリー油に残留する。このスラリー油は、一般的には船用燃料油の基材として用いられず、製油所側でスラリー油からCat-finesを回収した上でCLOとして基材に利用されるものではあるが、CLOにも一部の触媒粒子が残留することもありうる。

燃料油中のCat-finesの含有量を推定するため、通常は、アルミナおよびシリカを直接測定することに代えて、成分元素であるアルミニウム（Al）およびケイ素（Si）を測定する。ISO 8217:2017ではAl+Siの量の上限が規定されている。

Cat-finesが船内前処理で適切に除去できなかった場合、機器に侵入して摺動部に物理的な損傷を与える可能性がある。Cat-finesがシリンダライナおよびピストンリングに埋没した様子をそれぞれ図4、図5に示す。



図4 シリンダライナに埋没したCat-finesとアブレイシブ摩耗の跡

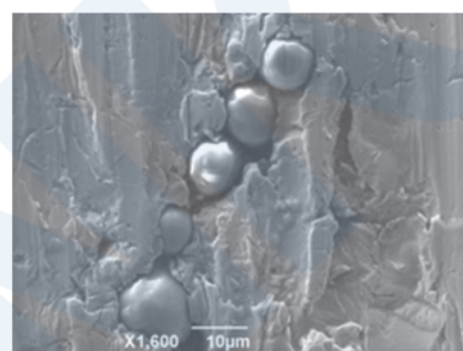


図5 ピストンリングに埋没したCat-fines

## (1) 想定されるリスク

CLOを多量に混合されたVLSFO-RMの場合、Al+Si含有量がISO 8217:2017規格の上限（RMGカテゴリーの場合60ppm）近くまで上昇する可能性が高い。そういったVLSFO-RMを使用する場合は、清浄機の負荷がこれまで以上に増大する懸念がある。

## (2) 機器類のトラブルの推定

- 燃料噴射系機器の固着・摩耗
- 燃料弁固着・摩耗・噴口不良
- ピストンリングの異常摩耗・折損
- ピストン冠リング溝の異常摩耗
- ライナの異常摩耗・スカuffィング 等

## (3) 適応策

VLSFO-RMにAl+Siが規格値上限まで含まれたとしても、セツトリングタンクでの前処理、および清浄機が正常に機能するよう保守管理を行ってれば、機関入口でのAl+Si濃度をメーカー推奨値まで落とすことが出来ると考えられるため、ハード面においては、特段の事前対策は必要ないと考えている。

従って、適応策としては、清浄機の適切なオペレーションおよびセツトリングタンクでの適切な前処理の実施が重要となる。具体例は以下のとおり。

- 適切な燃料油の温度管理、清浄機の平行運転、範囲内の通油量低減により分離性能を向上させる。

- バンカリング毎,あるいは定期的に,清浄機前後などで燃料サンプリングを行いAl+Siの分析を行う。
- セットリングタンクにおいて水やスラッジを出来るだけ排出し,タンク内に沈殿したCat-finesを除去する。等

### 3.2.5 着火・燃焼性

ここでは着火性と燃焼性を分けて考える。着火性とは自己着火のしやすさを表す燃料の性状であり,燃料が燃料弁から噴射されてから着火するまでの時間(着火遅れ)で表される。

軽油等の留出油の着火性を表す指標としてはセタン価やセタン指数が用いられる。それが重油等の残渣油には適用できないことから,代表的な指標として主に CCAI (Calculated Carbon Aromaticity Index) が使われて来た。CCAIとは,残渣油の着火性を推測するために1980年代に作られた,燃料の動粘度および密度から算出される実験式である。これが高いほど芳香族性が高いということになり,ISO 8217:2017ではRMグレードでCCAIの上限値が規定されている。

次に燃焼性を,後燃え時間や火炎長さ,黒煙・燃焼室デポジットなど未燃分割合を代表するものと定義する。つまり着火性が燃焼開始の特性を表すのに対し,燃焼性は燃焼後半から終わりまでの特性を意味する。燃焼性はPAS 23263においても定義は追加されておらず,測定法も示されていないが,IMOガイドラインにおいて適合油使用時に考慮すべき点として認識されている。

#### (1) 想定されるリスク

芳香族性の高い燃料では着火・燃焼性が問題になることがある。前述のように,VLSFO-RMには低硫黄基材としてLCOとCLOがさらに多く混入されることも考えられ,2環の多環芳香族を主とするLCOは特に着火性,4環以上の多環芳香族を主とするCLOは特に燃焼性に悪影響を及ぼす可能性がある。

#### (2) 機関・機器類のトラブルの推定

##### <低速2ストロークディーゼル機関>

代表的な損傷事例としては,以下のようなものが考えられる。

- ピストンリング異常摩耗・折損
- ライナの異常摩耗・スカuffィング
- リング・ライナ異常摩耗粉によるピストンロッド・グランドパッキンの異常摩耗・漏油過多
- 排気弁触火面の損耗および焼損 等

##### <中・高速4ストロークディーゼル機関>

回転数の高いエンジンほど着火遅れ増加の悪影響が大きく,特にシリンダ内温度・圧力の低い低負荷

で,ディーゼルノックによる燃焼の荒れ,さらにPM・黒煙排出が増加することもある。また,低速2ストローク機関で示した上記トラブルは,基本的の中・高速4ストローク機関でも起こり得ると考えた方がよい。

#### (3) 適応策およびトラブルの兆候を早期につかむための対策

以下のように機関の状態監視を強化することが主な予防策となる。

##### (i) 2ストローク機関の場合

- 燃料弁の整備を適切に行い,開弁圧を確保し噴霧状態を良好に保つ。
- エンジンの状態監視の強化。(排気温度, T/C 回転数(サージング),燃料消費率,シリンダ下部ドレン油中の鉄粉監視 等)
- センサーが付いているエンジンでは,シリンダライナ温度を監視する。等

##### (ii) 4ストローク機関の場合

- 燃料弁の整備を適切に行い,開弁圧を確保し噴霧状態を良好に保つ。
- エンジンの状態監視の強化。(排気温度, T/C 回転数(サージング),燃料消費率 等)
- 始動性を良くするため,可能ならばシリンダ冷却水のプレヒーティングを実施。

なお,ガイダンス本文には,エンジンの状態監視により,航行中にシリンダライナ・ピストンリング等に異常の兆候が確認された場合の,船上における当面の対応についても記載している。

## 4. まとめ

本会は,適合油の5つの燃料性状に注目し,継続的に安全に使用する際に考慮すべき事項をガイダンスにまとめた。本会の取り組みが適合油使用時の一層の安全運航に貢献できることを期待する。

## 参考文献

- 1) IMO, Assessment of Fuel Oil Availability - final report, MEPC70/5/3 (Executive summary) and MEPC 70/INF.6, (2016).
- 2) IMO, 2019 Guidelines for consistent implementation of the 0.50% sulphur limit under MARPOL Annex VI, MEPC Resolution MEPC.320(74), (2019).
- 3) ISO/PAS 23263:2019, Petroleum products — Fuels (class F) — Considerations for fuel suppliers and users regarding marine fuel

quality in view of the implementation of maximum 0,50 % sulfur in 2020.

- 4) 日本海事協会，2020年からのSO<sub>x</sub>排出規制適合油の使用に関するガイダンス，(2019).
- 5) 淡井ほか，“陸舶中・大型ディーゼル機関用燃料油”，山海堂，173-176, (1994).

ClassNK



# 水中検査へのROV活用に関して

— 実船トライアル結果の紹介 —

山本 貴弘\*

## 1. はじめに

近年、次世代の産業振興のためロボティクス開発は非常に注目を集めており<sup>1)2)</sup>、産業用ロボット<sup>3)</sup>、サービスロボット<sup>4)</sup>、ドローン<sup>5)6)7)</sup>、無人潜水機等<sup>1)8)</sup>、様々な分野で研究開発・実用化が進められている。

無人潜水機に関しては、ドローンと同様に、研究用機体からホビー用機体まで幅広く開発され、市販されている機体も増加している。遠隔操作型の無人潜水機は、水中ドローン、水中ロボット、遠隔操作型無人探査機等様々な名称で呼ばれているが、本稿では最も一般的な呼称であるROV（Remotely Operated Vehicle）を用いる。なお、スタンドアロンで自律的に活動できる無人潜水機はAUV（Autonomous Underwater Vehicle）として区別されている。

ROVはラジコン感覚で操縦できることが多く、船底検査に活用できる可能性が十分考えられる。通常、入架又は上架による船底検査（鋼船規則B編6章<sup>9)</sup>）の代替方法として潜水士を起用した水中検査が実施されているが、新たな可能性の一つとして期待できる。その有効性を検証すべく、2019年3月にROVを用いた水中検査トライアルを実施した。本稿ではその結果について紹介する。

## 2. トライアル概要

### 2.1 目的

今回のトライアルでは、自動車運搬船の水線下部を対象に、ROVが潜水士の代替として活用できるか検証した。

### 2.2 使用機材

以下の2機種を使用した。

- ・BlueROV2 [Blue Robotics社]<sup>10)</sup>
- ・CCROV [Vxfly社]<sup>11)</sup>

使用機材外観を写真1及び写真2に、それぞれの機材のサイズを写真3に示す。



写真1 BlueROV2外観



写真2 CCROV外観

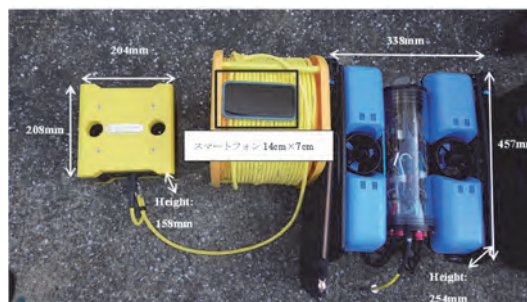


写真3 機体比較

以下のような位置づけで上記機体を使用した。

- ・BlueROV2：船底撮影機体
- ・CCROV：BlueROV2が移動／撮影している様子を水中から撮影

操作に必要なコントローラ、モニターを写真4及び写真5に示す。

写真4のBlueROV2では、PC上専用ソフトウェアがコントローラ（ゲーム用として市販されているものを使用）からの信号を受信、LANケーブルを通

\* 技術研究所



じてROVに信号を送信している。なお、ROV側では、受信した信号を元にプロペラに適切な推力を与えるために、ドローンでも頻繁に使用されているフライトコントローラ\*1を用いている。内部の配線等については、ドローンと同様のシステムである。



写真4 BlueROV2のコントローラ・モニター

一方、写真5のCCROVでは、専用のコントローラを用意しており、スマートフォンを接続してモニターとしている。



写真5 CCROVのコントローラ・モニター

ここで、船底撮影用機体として用いたBlueROV2機体内部の構造について説明する<sup>10)</sup>。図1に構造及び浮力材位置、図2にモータ位置・向き、図3に電子機器類（一部）を示す。

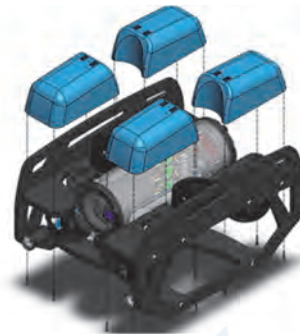


図1 (中性) 浮力材

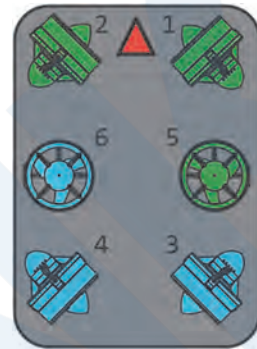


図2 モータ位置・向き

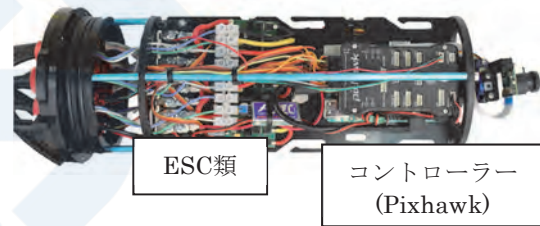


図3 電子機器

本機体の特徴は以下の通り。

- ライブ1080p HDビデオで転送可能
- カメラはチルト可能（ズームとパンは不可）
- 重量：約10kg
- 調査・点検・研究での使用を考慮した設計（ペイロードに余りがあるため、各種機材を搭載できる）
- 針路・深度は自動で補正保持（コンパス・圧力センサを使用）
- 最大深度100m, 300mのケーブルが利用可能
- 最大速度3.7km/h
- 1500ルーメン×4個のライトで高い視認性を確保（照度はコントローラで調整可能）
- 現場で交換可能な大容量バッテリー搭載（リチウムポリマーバッテリー；4S[14.8V], 18000mAh）
- ドローンでもよく使用されるフライトコントロ

\*1 手元のコントローラの事ではなく機体に搭載されたコンピュータであり、姿勢制御／各種計算／信号入出力等使用目的は多岐に渡る。

ーラを使用（ファームウェアはArduSUB<sup>12)</sup>を適用している）

- 上下左右移動に加え、ロール&ヨー方向への姿勢変更が可能。ピッチ方向に関しては、本機体では難しいが、追加で2基モータを搭載すれば姿勢変更可能。

### 2.3 撮影箇所

BlueROV2を用いた自動車運搬船没水部の撮影箇所は以下の通りである。

#### Fore

- (1) バウスラスター (S→P)
  - (2) 1W/2WS/2WPマーク\*2
  - (3) 1Wマーク\*2+THR\*3 (P) ボトムプラグ
  - (4) 1W/2WS/2WPマーク\*2 (+ボトムプラグ)
- ここから船尾方向に向かってキールラインに沿って移動させ、2WS/2WP/3WS/3WPまで撮影
- (5) 2WSのボトムプラグ
  - (6) 3SW/3Wマーク⇒3SWマーク⇒2Wマーク\*2

#### Middle

- (7) ドラフトマーク (S)
- (8) 5SW/FBS/5W/3Wマーク\*2
- (9) ビルジキール始端部 (P)

#### Aft

- (10) Inspection hole & Cover Plate
- (11) RudderとRudder Stockの間隙 (Inspection hole 近く)
- (12) Rudder Fin (S)
- (13) ボトムプラグ
- (14) プロペラキャップ
- (15) ブレード (先端+付け根)
- (16) シーチェスト (P/S)

### 2.4 BlueROV2を用いた水中検査

BlueROV2を用いた水中検査の様子を写真6から写真10に示す。

機体はケーブルを持ちながら徐々に水面へと下ろし着水させた。安全には最大限配慮し、万が一の落水に備え、ライフジャケット着用等の措置をとった。

ROVオペレーター1名とケーブルが巻き付かない様に手当てをする補助者1名の合計2名の体制で実施した（写真6）。岸壁から船体へのアプローチは、ROVオペレーターの直接の目視と補助者（ケーブル担当）からの音声情報に基づいて実施した（写真7）。

通常は、PCモニターに映し出された映像を見ながら操縦することが可能であるが、今回は使用した

PCモニター画面は鏡面仕上げとなっており視認性が優れなかったため、視認性をより向上させる目的で写真8の様なヘッドマウントディスプレイ（HMD）を用いた。HMD内に映し出される映像（写真9）は、PCからHDMIで出力されているため、PCモニターの画面と同じである。同画面内には、機体の姿勢角が表示されており、オペレーターはその図を見ながら自己位置を把握していた。



写真6 機体を降ろしている様子



写真7 ROV移動の様子



写真8 HMD利用

\*2 IWSマーク

\*3 Thruster Room

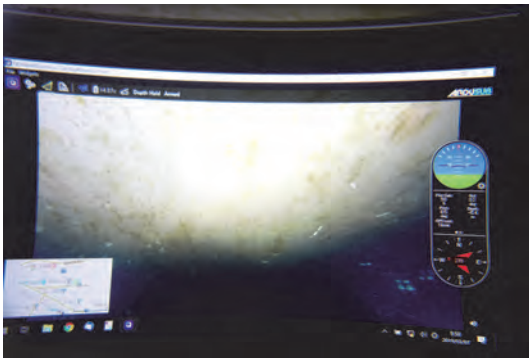


写真9 HMD内画面



写真11(b) バウスラスター (ドック撮影)

BlueROV2が対象箇所を撮影している様子を写真10に示す (CCROVで撮影)。



写真10 BlueROV2撮影中の様子

## 2.5 撮影結果

写真11～写真16に撮影画像を示す。紙面の都合上、2.3に記載した撮影箇所の中から抜粋して紹介する。

(1) バウスラスター (2.3 (1) 参照)

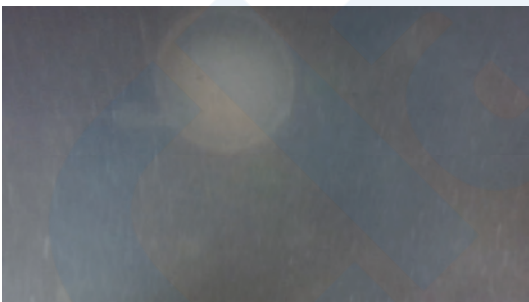


写真11(a) バウスラスター (水中撮影)

(a)はROVによる水中での撮影画像、(b)はドライドックでの船底撮影画像 ([Apple] iPhone 7を使用)を示している。

今回はトライアルであることを考慮し、接近し過ぎることによってROVが絡まるリスクを回避するため入口付近からの撮影とした。バウスラスターまではROVから距離があったため、写真11(a)に示す様に視認性に欠けている。濁度影響も原因の一つではあるが、ROVを使用する場合は、少なくともある程度対象との距離を縮めて撮影する必要があることが理解できる。

(2) 1W/2WS/2WPマーク (2.3 (2) 参照)



写真12 1W/2WS/2WPマーク (水中撮影)

写真12は水中撮影でも鮮明に映っていることが見てとれる。

(3) ドラフトマーク (S) (2.3 (7) 参照)



写真13 ドラフトマーク (S) (水中撮影)

写真13ではROVの利点を活かして対象に近づくことができおり、数字を正確に視認できる。

(4) 5SW/FBS/5W/3Wマーク (2.3(8)参照)

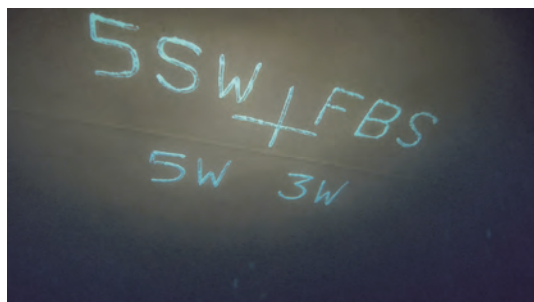


写真14(a) 5SW/FBS/5W/3Wマーク (水中撮影)

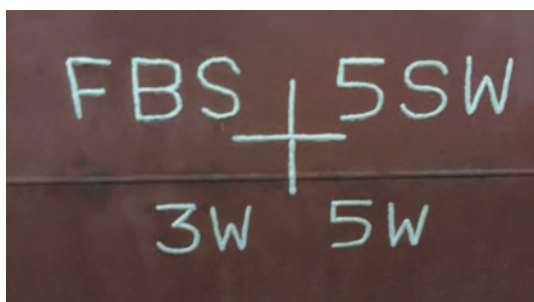


写真14(b) 5SW/FBS/5W/3Wマーク (ドック撮影)

写真14(a)は写真14(b)と比較しても遜色ない程に鮮明に撮像できている。

(5) ビルジキール始端部 (P) (2.3 (9) 参照)

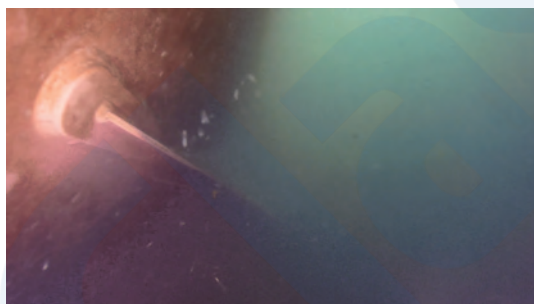


写真15(a) ビルジキール始端部 (P) (水中撮影)

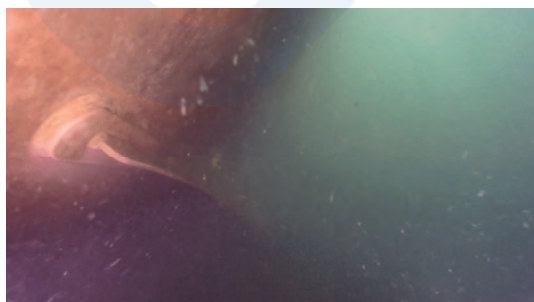


写真15(b) ビルジキール始端部 (P) (水中撮影)

写真15(a), 写真15(b)では双方ともにビルジキール始端部を示している。写真15(a)ではビルジキール

が直線に見えるが、写真15(b)では湾曲しているようにも見える。これは広角(魚眼寄り)のカメラを用いているために、撮影の向きによって発生する現象である。本カメラではなく、中心射影方式で撮影できるカメラを使用すれば対策可能である。

(6) シーチェスト (P) (2.3 (16) 参照)



写真16(a) シーチェスト (P) (水中撮影)



写真16(b) シーチェスト (P) [近接]  
(水中撮影)

写真16(a)はシーチェストの外観、写真16(b)はシーチェストに接近して撮影した画像である。写真16(b)では内部にある部品も撮影できていることが理解できる。

## 2.6 考察

ROV《BlueROV2》を使用し撮影した結果、以下の事が確認できた。

- 基本的に接近することで濁度影響はある程度無視でき、鮮明に対象物を撮影できる。
- 照明は必須である。距離があると照明が届かず対象物を視認できないという問題も発生する。
- 広角(魚眼)カメラを用いると、画像が歪曲する場合がある。
- オペレーション技術も重要ではあるが、ドローンと比較すると根本的に安全(静安定)であり、万が一動作しない等のトラブルが発生した場合も、ケーブルを引き上げることで回収可能である。
- ROVオペレーターによると、潮流影響は今回の実験では感じられなかったが、うねりによる上下動は無視できなかったとの事。今回用いた

機体は圧力センサによって深度保持制御が有効であったにも拘らず多少の影響があった由。

- 水中で近接撮影した画像においては、陸上と大差のない品質で撮影できている。
- バウスラスターやシーチェスト等は、ドライドック時にはズーム機能を用いて撮影したが、下から見上げる角度でしか確認はできない。チェリーピッカーや確認用の足場を用意してもらえばその限りではないが、容易に近づいて撮影できる点はROVの利点である。
- また、今回、ドライドック時に盤木で隠れていた部分は、当然ながら目視確認はできなかった。そのような制約無しに船底全体を確認できる点も同様にROVの利点である。

### 3. まとめ

本トライアルにおいては、基本的にどの対象物も近接撮影することで鮮明に撮影できており、水中検査におけるROV活用の有効性を確認することができた。

オペレーターへの負担も、ドローンと比較すると軽度で済むとの実感が得られたことから、オペレーターへの要件はドローンよりは軽減してもよいと考えられる。

一方で、現時点のROVでは、水中検査時に要求される舵の各軸受け部の間隙の計測やグレーチングの開閉は出来ないことに加え、アオサやフジツボ等の船体への付着物を除去する機能もない。そういった点からは、直ちに潜水士の代替として水中検査に使用できるものではない。実際にROVを使用する際には、そういった実状を踏まえた上で、潜水士による水中検査のやり方とうまくマッチングさせることが重要であると考えられる。

### 謝辞

トライアルを実施するにあたりご協力頂いた株式会社商船三井、株式会社セキド、株式会社南日本造船、ジャパンマリンユナイテッド株式会社の関係各位に厚く感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 国立研究開発法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター：(研究開発の俯瞰報告書) システム・情報科学技術分野 (2019年), ([https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2018/FR/CRDS-FY2018-FR-02/CRDS-FY2018-FR-02\\_07.pdf](https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2018/FR/CRDS-FY2018-FR-02/CRDS-FY2018-FR-02_07.pdf))

- 2) 一般社団法人 日本機械工業連合会, 平成29年度 ロボット産業・技術振興に関する調査研究報告書, (<http://www.jmf.or.jp/content/files/houkokusho/29nendo/20180327-045211.pdf>)
- 3) IFR, Executive Summary World Robotics 2018 Industrial Robots, ([https://ifr.org/downloads/press2018/Executive\\_Summary\\_WR\\_2018\\_Industrial\\_Robots.pdf](https://ifr.org/downloads/press2018/Executive_Summary_WR_2018_Industrial_Robots.pdf))
- 4) 総務省：平成28年度版 情報通信白書, (<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h28/html/nc131520.html>)
- 5) FAA, “Aerospace Forecast Report Fiscal Years 2016 to 2036”, 2016.3, ([https://www.faa.gov/data\\_research/aviation/aerospace\\_forecasts/media/fy2016-36\\_faa\\_aerospace\\_forecast.pdf](https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/media/fy2016-36_faa_aerospace_forecast.pdf))
- 6) 春原久徳, インプレス総合研究所, “ドローンビジネス調査報告書2017”, 株式会社インプレス
- 7) Goldman Sachs, “Drones Reporting for Work”, (<https://www.goldmansachs.com/insights/technology-driving-innovation/drones/>)
- 8) COMPASS November 2017, p20-27, “商業利用の期待が高まる海中ロボット”
- 9) 日本海事協会：鋼船規則B編6章 船底検査
- 10) Blue Robotics “BlueROV2”, (<https://bluerobotics.com/store/rov/bluerov2/bluerov2/>)
- 11) Vxfly “CCROV”, (<https://www.ccrov.com/ccrov/en/ccrov.html>)
- 12) ArduSub, (<https://www.ardusub.com>)

# 2018年度 損傷まとめ

## — 海難事故の傾向と損傷事例の紹介 —

技術研究所

### 1. まえがき

本稿では、最初に本会船級登録船（以下、「本会船級船」という）を対象に、2018年度（1月1日から12月31日まで）に報告された海難事故について報告する。次に、バラスト水管理とSOx排出に関する規制強化への対応が進められている中で、バラスト水処理装置の不具合と燃料油が関係すると推定される機関損傷が報告されていることから、これらの損傷について代表的な事例を紹介する。

されている。全損海難事故が発生した船舶の種類及び海難の概要を表1に示す。なお海難の概要は主として後でも述べる海難情報配信サービス“Lloyd's List Intelligence Casualty Alert”（以下、“LLI CA”という）の情報に基づくものである。

合わせて、2009年から2018年までの10年間に本会船級船で発生した全損海難事故の隻数及び喪失総トン数の推移を図1に示す。2018年度の全損海難事故件数及び喪失総トン数共に2015年から減少傾向を継続している。本会は引き続き、全損海難事故の発生が皆無となるよう取り組んでいく所存である。

### 2. 2018年度の海難事故

#### 2.1 全損海難事故

2018年度の本会船級船の全損海難事故は1件報告

表1 2018年度の本会船級船の全損海難概要

船種	総トン数	概要
A船 アスファルトタンカー	999	本船は大きく傾斜した後、転覆した。その後、沈没した。付近の船舶から遭難信号を受け取った海軍がヘリコプターを派遣し、転覆した本船付近にいた乗組員全員を救出した。

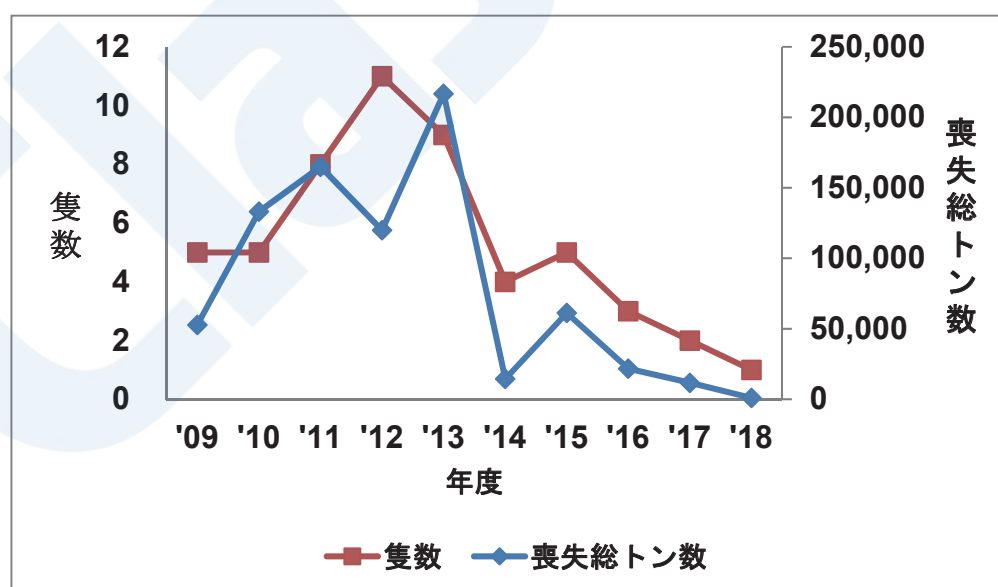


図1 全損海難事故の隻数及び喪失総トン数の推移

#### 2.2 海難事故概要

本会は海難情報配信サービス“LLI CA”等を活用して、本会船級船の海難情報の収集を継続的に行っ

ている。ここでは2018年度に報告された本会船級船の海難事故について、その概要を述べる。

2018年度に本会船級船に発生・報告された海難

事故隻数及び件数は156隻、152件であり、これは、本会船級船の全隻数の約1.7%にあたる。また、前年度比では海難事故隻数及び件数ともに約24%減となり、2015年以降は減少傾向にある。なおここで述べる海難事故には、Port State Control (PSC) による拘留、海賊による被害、労働環境に関連した港湾当局の拘束等は含んでいない。これら156隻、152件の海難事故の要因を表2に示す8種類に分類し、その内訳について調査を行った。結果を表2及び図2に示す。

表2 2018年度本会船級船海難事故隻数及び件数  
(LLI CAの情報に基づく)

	延べ隻数	海難件数
衝突・接触・座礁	72	68
機関トラブル	43	43
火災・爆発	9	9
操舵系トラブル	1	1
推進系トラブル	4	4
破口・浸水	2	2
荷崩れ	4	4
その他	21	21
合計	156	152

注：「衝突・接触・座礁」には、本会船級船同士の衝突が含まれるため、隻数と件数は一致しない。「機関トラブル」には主機関、補機関以外の各種機器のトラブルも含む。

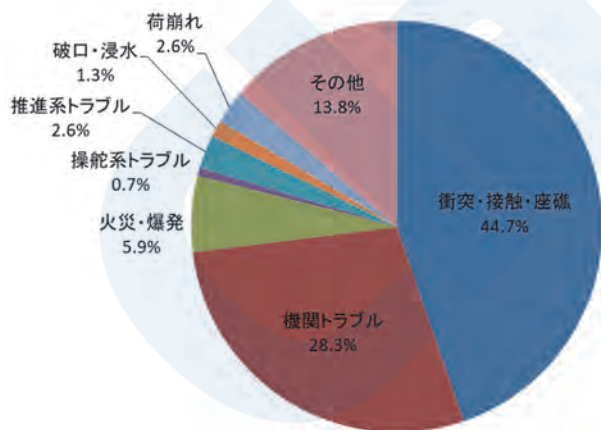


図2 2018年度本会船級船海難事故要因の内訳

表2及び図2によると海難事故発生の要因としては、「衝突・接触・座礁」が44.7%と最多となっている。また「機関トラブル」も28.3%となっており、この両方で海難発生要因の7割を占めることになり、この傾向は前年から変わっていない。「機関トラブル」で報告された43件の少なくとも27件は主機関のト

ラブルであり、うち7件は運転不自由 (Not Under Command) となっている。

一方、報告された152件の海難事故のうち、死亡や行方不明といった人身事故を伴う海難事故や転覆・沈没に至った海難事故（重大海難事故）の割合を表3に示す。重大海難事故のうち「全損」の概要については2.1節ですでに述べている。ここでは海難事故のうち人身事故を伴う事例について、その概要を表4に纏めた。

表3 2018年度本会船級船  
重大海難事故件数及び割合

	件数	全海難事故件数に対する割合 (%)
人身事故	5	3.3
全損	1	0.7
合計	6	4.0

表4 人身事故を伴う海難事故の概要

	概要
B船	本船と漁船が衝突した。漁船は沈没し、6名の乗組員が行方不明となった。
C船	本船が石炭を積載して航行中、貨物倉から爆発と火災が発生した。その後、本船は錨泊した。火災は乗組員によって消火されたが、1名が死亡し、もう1名も負傷した。
D船	本船は河川航行中に他船と衝突した。その結果、本船の船体に破損が発生し、沈没した。沿岸警備隊が沈没船から9名を救助したが、3名が行方不明となった。
E船	本船が係留中、係留ロープの1本が切れ、ドックと本船で跳ね返った。この事故により2名の作業員が死亡した。
F船	本船は漁船と衝突し、漁船は転覆した。漁船の乗組員の2名の内、1名は救助、1名は死亡した。

表4より2018度に発生した海難事故のうち人身事故を伴ったケースの原因としては、衝突、火災が大半であるが、係船索の破断による死亡事故も報告されている。

以上述べてきたように、本会船級船の海難事故は2015年度以降減少傾向にある。また、海難事故発生の要因として「衝突・接触・座礁」と「機関トラ

ブル」が最も多いということが分かる。このような調査結果も踏まえ、海難事故の発生の防止のために、本会は適切なフィードバックや対応を引き続き講じていく。

### 3. バラスト水処理装置及び燃料油が関係すると推定される機関損傷の事例紹介

#### 3.1 バラスト水処理装置の損傷及び不具合

バラスト水管理条約は2017年9月に発効しており、バラスト水処理装置（以下「BWMS」という）の本船搭載が進められている。本稿では、2017年1月から2019年8月までの間に本会の検査時に報告された検査報告書を基にBWMSの損傷割合及び損傷事例について紹介する。

##### 3.1.1 処理方法別損傷割合

本稿で取り上げるBWMSの処理方法を表5に分類する。表5で取り上げる処理方法別の損傷割合は、図3に示すように、電気分解式とFilterとの組み合わせが34%、薬剤とFilterの組み合わせ及び電気分解式のみの場合が各々22%、オゾン式及びUVとフィルタの組み合わせが各々11%となっている。

表5 処理方法の分類

電気分解式+Filter
薬剤+Filter
UV+Filter
電気分解式
オゾン

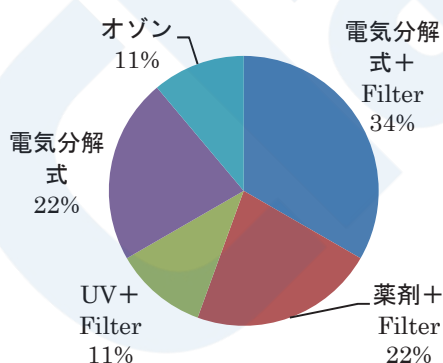


図3 処理方法別損傷割合

##### 3.1.2 構成機器別の損傷割合

次にBWMS構成機器別の損傷割合を図4に示す。

機器別損傷割合では、電気・制御系が37%、各処理ユニットが21%、センサが20%を占めており、電気、制御系に損傷が多いことがわかる。

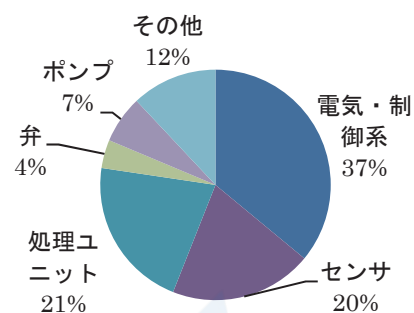


図4 BWMS構成機器別損傷割合

ここで、処理ユニットとは、下記に説明するように、バラスト水の処理を担う機器及び関連機器を意味する。

##### ①処理ユニット別の損傷割合

図5には、処理ユニット別の損傷割合を示す。表5に示したように、BWMSによってはその処理方法により複数の処理ユニットを組み合わせる装置がある。そのため、複数の処理方法を組み合わせたBWMSの場合には、複数の処理ユニットにより構成されているとして分類することにした。例えば、薬剤とFilterとを組み合わせるBWMSの場合には、処理ユニットはFilterユニットと薬剤ユニットの2種類で構成される。各処理ユニットの損傷は、図5に示すように、オゾンユニットを除き、いずれの処理ユニットにおいても発生していることがわかる。

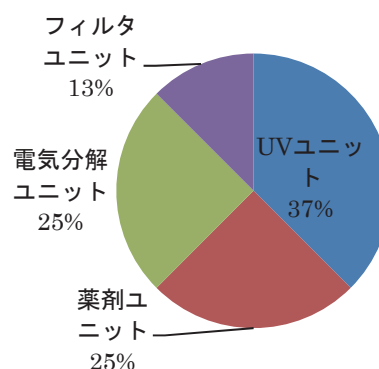


図5 処理ユニット別損傷割合

##### ②電気・制御系の損傷割合

図6には、電気・制御系の損傷機器の割合を示す。特にコントローラが74%と大半を占めており、図4と併せてみることにより、BWMS全体として制御部分に損傷が多いことがわかる。



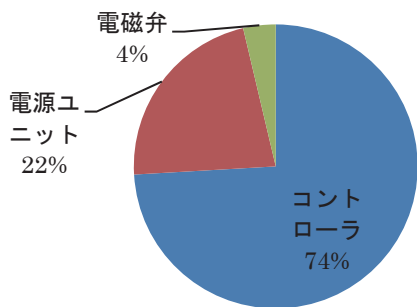


図6 電気・制御系の機器別損傷割合



写真1 薬剤貯蔵タンクの焼損

### 3.1.3 BWMSの損傷例

ここでは、BWMSの損傷や不具合事例について紹介する。

#### ①供給水の逆流による薬剤貯蔵タンクの爆発

薬剤とフィルタとを組み合わせるバラスト水処理するBWMSの薬剤ユニットの爆発が複数の船舶から報告された。

この薬剤ユニットは、図7に示すように、薬剤を貯蔵する薬剤貯蔵タンクと、薬剤貯蔵タンクから供給される薬剤と清水供給弁経由で供給される清水が混合する混合タンクを備えている。混合タンクにはフロート式の清水レベルスイッチが設置されており、この清水レベルスイッチによって清水は制御されて混合タンクに供給される構造となっている。



写真2 焼損した薬剤貯蔵タンク上部

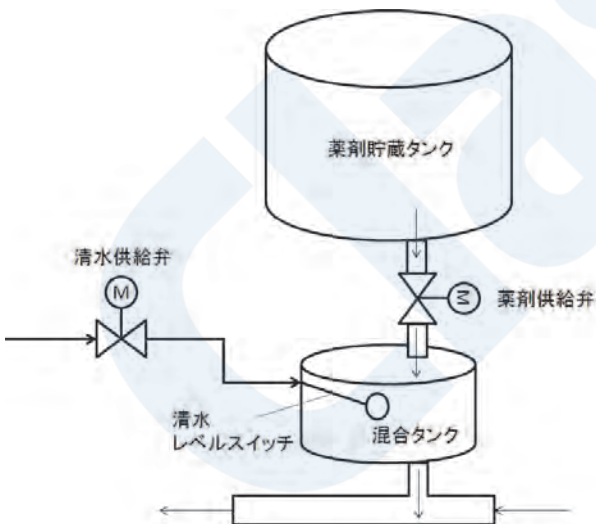


図7 構成概略

損傷として、薬剤貯蔵タンクの焼損（写真1及び写真2）及び清水レベルスイッチの内部の変形（写真3）が報告された。この損傷の経緯は次のように考えられる。清水レベルスイッチが内部変形により固着し、混合タンクに清水が供給され続け、混合タンク内の水位が上昇した。そのため、混合タンク内の清水が薬剤貯蔵タンクに逆流し薬剤貯蔵タンク内の薬剤と反応した。本システムで使用される薬剤は、溶解時に発熱することが知られており、更に高温時にはガスを発生させる。その結果、薬剤貯蔵タンクが爆発した。

予防装置として混合タンクにオーバーフロー管を追設することになった。



写真3 内部が変形した清水レベルスイッチ

## ②BWMS使用方法の理解不足による不具合

BWMS自体に損傷は発生していないが、使用者がその使用方法を十分に理解しないまま使用したことによりBWMSにエラーが表示され、BWMSの停止やBWMSが起動できなかった例が複数船舶から報告されている。例えば、センサのキャリブレーションが不十分であったり、警報のリセットの未実施やリセット方法の理解不足であったりなどが挙げられる。

### 3.1.4 まとめ

2017年から2019年前半までの2年半の間に本会に報告された検査報告書を基に、BWMSの損傷及びその損傷事例を紹介した。

BWMSは、条約要求に基づき新たに搭載される機器である。使用者は、使用前に十分にその使用方法を熟知することが望まれる。また、機器側においても損傷を防止、軽減するような改善が進むことが期待される。

## 3.2 燃料油が関係すると推定される機器の損傷及び不具合

本会の検査時において燃料油に起因する損傷や不具合に関する報告が増加している。本稿では、2018年から2019年8月までの間に、本会検査時に報告された検査報告書を基に、燃料油に起因する機器の損傷割合及び損傷事例について紹介する。

### 3.2.1 機器の損傷部位別の損傷割合

燃料油に起因する機器の損傷は、図8に示すように、74%が主機用ディーゼル機関であり、発電機用ディーゼル機関（22%）がそれに次いで報告件数が多かった。また、ボイラやその他補機類（清浄機、フィルタなど）についても損傷や不具合が報告されている。

特に、主機用ディーゼル機関の件数が多い理由は、主機用ディーゼル機関に損傷や不具合が生じた際には、船舶が減速や曳航される可能性が大きいことや

Port State Control (PSC) の指摘によるためと考えられる。

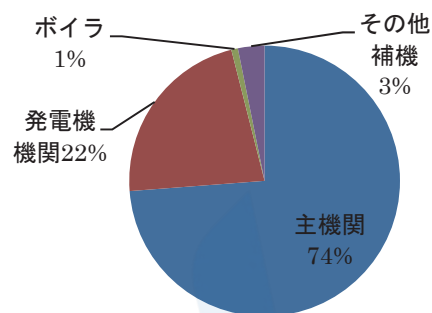


図8 機器別損傷割合

損傷機器の大半を占めるディーゼル機関（以下、主機用ディーゼル機関及び発電機用ディーゼル機関を意味する）を損傷部位別にみると、図9に示すように燃料噴射系統が37%であり、ピストン（30%）やシリンダライナ（13%）がそれに続く割合となっている。損傷は、燃料噴射系統、ピストン、シリンダライナの3つを合わせると全体の80%を占める。

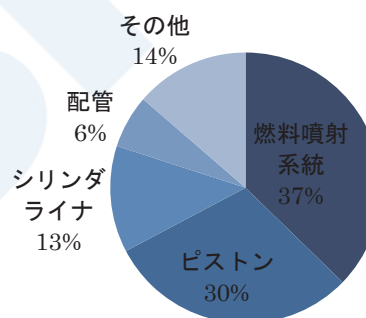


図9 ディーゼル機関の損傷部位別割合

### 3.2.2 燃料噴射系統の損傷部品

図9中のディーゼル機関の損傷部位の37%を占める燃料噴射系統について、更にその損傷部品を分類し図10に示す。

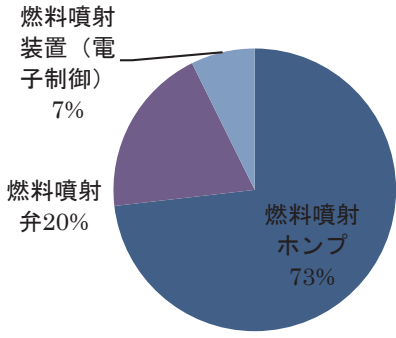


図10 燃料噴射系の損傷部品別割合

燃料噴射系統の損傷部品の73%は燃料噴射ポンプとなっている。また、近年その搭載台数が増加している電子制御ディーゼル主機関においては、電子制御ディーゼル主機関特有の部品である燃料噴射装置の損傷（7%）も報告されている。なお、電子制御ディーゼル主機関であっても従来のディーゼル機関と共通の部品（燃料噴射弁など）は、図10の燃料噴射装置（電子制御）には含んでいない。

図10に示した燃料噴射系統の各損傷部品の損傷形態を図11から図13に示す。

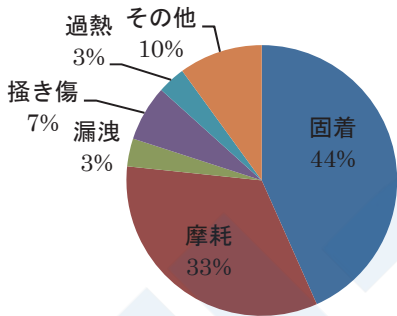


図11 燃料噴射ポンプの損傷形態別割合

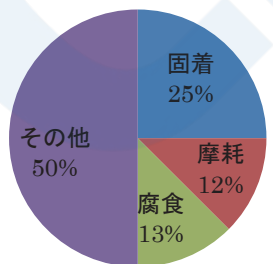


図12 燃料噴射弁の損傷形態別割合

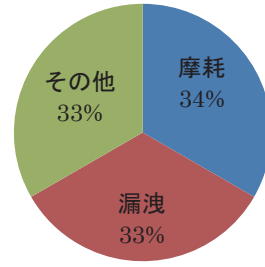


図13 電子制御ディーゼル主機関の燃料噴射装置の損傷形態別割合

摩耗による損傷が燃料噴射ポンプ（33%）、燃料噴射弁（12%）、電子制御ディーゼル主機関の燃料噴射装置（34%）に共通して報告されている。また、燃料噴射ポンプでは摩耗と固着を合わせると77%を占めており、燃料噴射弁では摩耗や固着に加えて腐食（13%）も報告されている。電子制御ディーゼル主機関の燃料噴射装置では、摩耗に加えて油の漏洩（33%）も多く報告されていることが分かる。

### 3.2.3 ディーゼル機関のピストン、シリンダライナの損傷部品

図14にディーゼル機関のピストンの損傷部品毎の分類を示す。

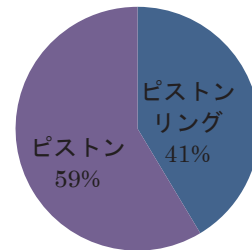


図14 ピストンの損傷部品別割合

損傷は、ピストンリングとピストン本体について報告されている。ここでピストン本体には、ピストンクラウン、ピストンスカート、ピストンリング溝が含まれる。図15、図16にはピストン本体、ピストンリングの各損傷形態を示す。

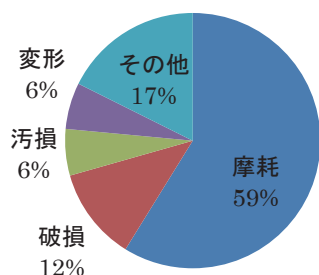


図15 ピストン本体の損傷形態別割合

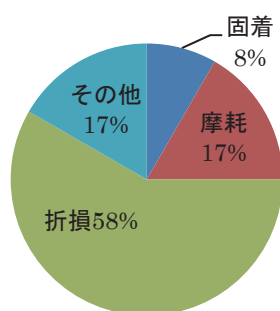


図16 ピストンリングの損傷形態別割合

ピストン本体の損傷形態は、図15に示すように、摩耗が約半数（59%）を占めている。摩耗の大半はピストンリング溝に発生しているが、ピストンスカートの摩耗も含まれている。また、リングランドの破損や変形、ピストンクラウン触火面やピストン摺動面の汚損に関する報告もあった。

図16に示すピストンリングの損傷形態は、58%がピストンリングの折損であり、ピストンリングの摩耗（17%）やピストンリングの固着（8%）も報告されている。

図17にはシリンダライナの損傷形態割合を示す。ピストンと同様にシリンダライナも半数（50%）が摩耗であり、シリンダライナの亀裂（22%）に関する報告もある。

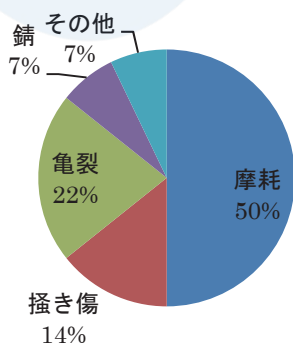


図17 シリンダライナの損傷形態別割合

### 3.2.4 配管関係の損傷部品

図18には、配管関係の損傷部品別の分類を示す。71%はFOフィルタもしくは清浄機の汚損や閉塞であり、その他としてディーゼル機関の機付き配管や機関室内配管の汚損などが29%を占める。

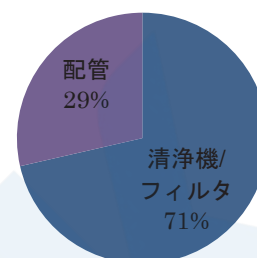


図18 配管関係の損傷部品別割合

### 3.2.5 その他の損傷、不具合及びその形態

3.2.2から3.2.4までは、ディーゼル機関及び配管関係の損傷割合を紹介した。ここでは、燃料油の取り扱い不具合や燃料油による二次的損傷品の損傷割合を紹介する。

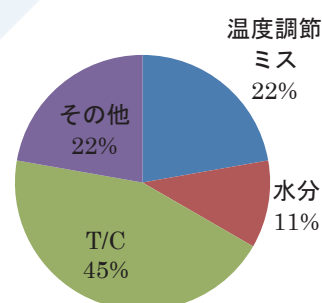


図19 燃料油による二次的損傷及び不具合

図19は、燃料油の取り扱い不具合と、二次的損傷として報告された過給機の損傷の割合を示す。

損傷は報告されていないが燃料油の取り扱いが適切でなかったために生じた不具合が33%を占めている。燃料油の取り扱いによる不具合には、温度調整ミスが22%、燃料油中の水分除去が不適切だった事例（11%）が含まれている。これらは燃料油の取り扱いを適切に行なうことにより防げた可能性があったと考えられる。

燃料油によりディーゼル機関の部品が損傷したことにより発生した過給機の二次的損傷は45%を占めた。過給機の二次的損傷としては、ディーゼル機関のピストンリングの折損により、折損したピストンリング片がタービンブレードやノズルに接触した

例が多数報告されている。

また、図19で22%を占めるその他には、Cat-finesの影響によるトランクピストン型ディーゼル機関の潤滑部の損傷も含まれている。

### 3.2.6 燃料油による損傷及び不具合例

ここでは、燃料油に起因する個別の損傷や不具合事例について紹介する。

#### ①ULSFOによる燃料噴射ポンプの固着

既にECAに指定されている海域を航行する船舶では、規制値以下の硫黄分濃度の燃料（ULSFO）が使用されている。ECAを航行する船舶のうち、特に北米・カナダ沿岸及びカリブ海海域を航行する船舶において、ULSFO使用により燃料噴射ポンプが損傷した事例が多数報告されている。以下にその1例を紹介する。

使用する燃料油をULSFOに切換えた後、主機用ディーゼル機関を増速しようとしたところ、排ガス温度が低下しノッキング音が発生した。その結果、主機用ディーゼル機関を増速することができなかった。

主機用ディーゼル機関を開放して確認したところ、No.3燃料噴射ポンプのプランジャとバレルの固着が見つかった（写真4）。



写真4 固着したプランジャとバレル

一般的にULSFOは動粘度が低く、動粘度の低下に伴い潤滑性も低下することが知られている。写真4に示した燃料噴射ポンプの損傷は、ULSFOの動粘度低下に伴い潤滑性が低下したため、摺動するプランジャとバレルが固着したものと考えられる。

#### ②電子制御ディーゼル主機関の燃料噴射制御装置の損傷

近年搭載が増加している電子制御ディーゼル主機関において、燃料油に起因する電子制御ディーゼル主機関では、燃料油の噴射タイミングや噴射量を制御する燃料噴射制御装置（写真5）の不具合が報告されている。

電子制御ディーゼル主機関に供給する燃料をULSFOに切換中に燃料噴射制御装置に関する警報及び事前自動減速警報が作動した。燃料噴射制御装置のオーバーホールと、全ての燃料噴射弁の清掃を行なった後、電子制御ディーゼル主機関を始動しようとしたが、燃料レール圧低下警報が作動し始動できなかった。これは、燃料噴射制御装置を構成する制御弁からULSFOが漏洩し、所定の燃料噴射圧を維持できなかったためであった。

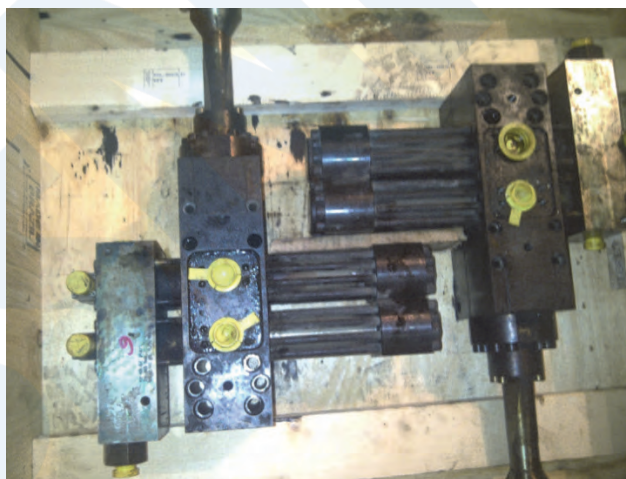


写真5 燃料油が漏洩した燃料噴射制御装置

燃料噴射制御装置は、製造者が推奨するメンテナンス時期に近くなった際若しくはそれを越えて使用した際には、通常摩耗による漏油量が増加する傾向にある。本不具合は、ULSFOが燃料噴射制御装置に供給された結果、燃料噴射制御装置の性能劣化が顕著となり漏油量が増加したと考えられる。

なお、ULSFO使用時の燃料噴射制御装置関連の対策については、電子制御ディーゼル機関製造者からサービスレポートが発行されているので、それに準拠して対処すべきであろう。

#### ③不適切なULSFOの取り扱いに起因する不具合

ULSFOはその動粘度が低いことから、船上で使用する際にはULSFOの温度を適切に制御して主機用ディーゼル機関や発電機用ディーゼル機関に適した動粘度に調整する必要がある。そのため、最近ではULSFO用の冷却装置（以下、「ULSFOクーラー」

という)を備える船舶が増加している。

以下に、ULSFOの不適切な取り扱いにより発生した不具合の事例を紹介する。

ULSFOクーラーにより温度制御したULSFOを用いて主機用ディーゼル機関を始動しようとしたところ始動できなかった。これは、ULSFOクーラー及びこれに接続する配管内に、切換え前の燃料油が残留し、ULSFOが適温まで十分に冷却されずに主機用ディーゼル機関に供給されたことが原因と考えられる。その後、本船はULSFOクーラー及びこれに接続する配管を使用するULSFOでフラッシングし、主機用ディーゼル機関を始動した。

また、ULSFOを用いて主機用ディーゼル機関を運転中に警報が作動することなく回転数が急激に低下した事例も報告されている。調査により、燃料タンク内のULSFOに水分が0.45%含まれており、燃料用清浄機が停止していたことが分かった。これにより、原因は、燃料用清浄機が停止していた為、ULSFO内の水分が除去されずに主機用ディーゼル機関に供給されたためと考えられる。

#### ④燃料油中のCat-finesによる発電機用ディーゼル機関の潤滑部の損傷

複数の発電機用ディーゼル機関において潤滑油低圧警報が相次いで作動した。調査したところ、複数の発電機用ディーゼル機関のシリンダライナ、主軸受、クランクジャーナル、カム軸受の異常摩耗が見つかった。また、発電機用ディーゼル機関で使用していた潤滑油を分析したところ、使用していた燃料油中のCat-fines(Al+Si)よりも高濃度のCat-finesの混入が明らかになった。

本損傷が報告された発電機用ディーゼル機関はトランクピストン型であるため、クロスヘッド型機関とは異なり燃焼室とクランクケースとの間がスタッフィングボックスで区切られていない構造となっている。そのため、クランクケース下部に設けられているサンプタンク内に、燃焼室に噴霧された未燃の燃料油や燃焼残渣物が混入しやすくなっている。また、潤滑油は、発電機用ディーゼル機関のクランクケース内の底部に設けられているサンプタンク内に貯留し、機付き潤滑油ポンプにより、主軸受、クランクピン軸受、カム軸受、燃料噴射ポンプ、各種ギア、過給機に供給している。そのため、サンプタンク内に貯留している潤滑油に混入したCat-finesは、潤滑油と共に各軸受部に供給され、その結果、燃料油が噴霧される燃焼室の構成品(シリンダライナ、ピストン、ピストンリング)のみならず、潤滑油が給油される潤滑部もCat-finesにより損傷に至った

と考えられる。

### 3.2.7 まとめ

2018年から2019年前半の約1年半の間に報告があった検査報告書を基に、燃料油が関係すると推定される機器の損傷について紹介した。

2020年1月から燃料油の硫黄分濃度の規制(いわゆるSO<sub>x</sub>排出規制)が強化される。新適合燃料油の性状は現在よりも幅が広がることが予想されている。このため、今後も燃料油に起因する機器の損傷が発生する可能性が考えられる。但し、燃料油の取り扱いや前処理装置の適切な使用等の対策を行なうことにより、損傷の発生を防止、軽減することは可能と考える。

本会は、使用時に考慮すべき燃料油の性状や安全に使用するための適応策をまとめた「2020年からのSO<sub>x</sub>排出規制適合燃料油の使用に関するガイドライン」を2019年春に発行しているもので、こちらについても参考とされたい。

## 4 結び

本稿では2018年に報告された海難事故並びにバラスト水処理装置の不具合と燃料油が原因と推定される機関損傷について紹介した。これらの損傷情報が船舶の設計・建造、運航や保守・管理において、いささかでも参考となれば幸甚である。

なお、本会は、紹介したような本会船級船の損傷情報を有効に活用、フィードバックすることで、海難事故や損傷の軽減にいつそう努めていく所存である。



# AISデータを用いた疲労強度評価用荷重の設定

山本 規雄\*, 杉本 友宏\*, 石橋 公也\*

## 1. 緒言

船体構造の疲労強度評価を行うためには、船体に作用する繰り返し荷重を把握する必要がある。繰り返し荷重は船舶が航行する海域の波浪環境に深く関連するため、船舶が一生の間に航行すると考えられる航路を想定することにより、実態に即した合理的な疲労強度評価を行うことが可能となる。一方、国際船級協会連合（以下、IACS）の共通構造規則<sup>1)</sup>（Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers）（以下、CSR-BC&OT）においては、疲労強度評価を行う際の荷重として北大西洋波浪環境に基づく荷重を設定している。この設定は、航路の不確実性を含め、疲労評価に関わる諸々の不確定要因に対する安全余裕を含むとされている。従って、疲労評価技術の向上により不確定要因が低減された場合は過度の安全余裕を与えることになる。

船舶が実際に航行している海域を特定するためには、従来、貿易統計や船主に対するアンケート調査等の間接的な情報を用いてきたが、より客観的な情報として船舶自動認識装置（以下、AIS）のデータを解析することで船舶の実際の航路を直接的に把握できるようになった<sup>2)6)</sup>。

そこで本研究においては、2年10ヵ月間にわたる24,349隻分のAISデータを収集、解析することで、船舶が実際に航行する標準的な航路を特定した。また、その標準的な航路に対する長期波浪発現頻度表をBritish Maritime Technology (BMT)社のGlobal Wave Statistics(GWS)<sup>7)</sup>を用いて作成した。標準的な航路に対する波浪発現頻度表を用いることで、就航実績に対応した疲労評価を行うための応力変動の長期分布を予測することができる。船舶の設計分野では、通常、設計荷重として北大西洋波浪環境に基づく荷重が用いられることから、標準的な航路における疲労評価のための荷重を求めめるための簡便な荷重修正係数について検討を行った。

また、CSR-BC&OTでは船舶の稼働率は85%とすると規定されている。この稼働率は疲労強度評価を行う場合の繰り返し数の算定に用いられる。本研究ではAISデータを解析することで船舶の稼働率も

把握した。

## 2. AISデータ

AISは、船舶の識別、船種、船位、針路、速力、航海状況及びその他安全に関する情報を自動的に海岸局、他の船舶及び航空機に発信するものであり、SOLAS条約<sup>8)</sup>のV章の改正により2002年7月1日以降に建造契約船（なお、現存船にあっては船舶の種類やサイズに応じて2002年7月1日から2008年7月1日までの間に搭載が義務化）であって次の船舶に搭載が義務付けられている。

- ・ 国際航海に従事する総トン数300トン以上のすべての船舶
- ・ 国際航海に従事しない総トン数500トン以上の貨物船
- ・ 旅客船（大きさのいかんは問わない）

## 3. 標準的な航路の特定

船舶の航路は、船舶の用途やサイズに応じて特徴付けられるため、本研究においては、24,349隻の船舶をTable 1の通り、船種別、さらには、船のサイズ別に分類した。船のサイズにより分類したのは、船幅等により航行可能な運河が決まること、また、大きい船ほど荷主との長期契約により特定の航路を航行し、小さい船ほどスポット契約により様々な航路を航行する傾向にあることを考慮したためである。分類後の各カテゴリーの船舶に対して、次の解析を行うことにより、標準的な航路を特定した。

- (1) 各船の時系列データにおいて速度が1m/sec以下の場合は速度ゼロとみなし、その時刻において停船（停泊）中とする。
- (2) 速度ゼロの時点から次の速度ゼロとなる期間を1航海単位とし、航跡、距離及び所要時間を求め、GWSで定義される海域（Fig. 1参照）における航行時間を積算する。
- (3) 各カテゴリーの船舶の総航行時間で標準化して各海域における航行時間の相対頻度を求め、標準的な航路を求めた。

\* 船体開発部



- (4) また、標準航路を特徴付けるために、別途航行時間の相対頻度が高い海域から順に、相対頻度を積算し、ある閾値（本研究では80%）以上になるまでの海域をコンター表示したものを作成した。

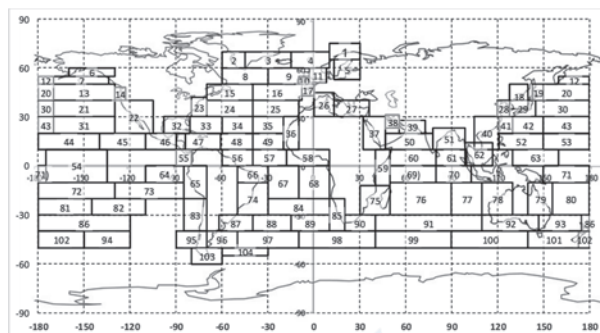


Fig.1 Sea areas defined in the GWS

Table 1 Ship classification and number  
(Bulk carriers, container ships and oil tankers are classified by size)

Ships	Classification	number	Size
Bulk Carrier (BC)	Baby, Handy	2974	DWT<50,000
	Handymax	2171	DWT<65,000
	Panamax, Overpanamax	1442	DWT<130,000
	Capesize	1452	130,000≤DWT
Chemical tanker		2538	
Container ship (CT)	Feeder	2793	TEU<4000
	Panamax	935	TEU<6000
	Over panamax	829	TEU<12,000
	Mega	358	12,000≤TEU
General cargo ship		598	
LNG carrier		399	
LPG carrier		778	
Multipurpose ship		2229	
Oil Tanker (OT)	Small, Middle Range	1863	DWT<60,000
	Large Range, Aframax	644	DWT<120,000
	Suezmax	516	DWT<170,000
	VLCC, ULCC	715	170,000≤DWT
Ore carrier		237	
Reefer		26	
Vehicle carrier		733	
Wood chip carrier		119	

#### 4. 標準的な航路の特定

本研究では、例として、大型タンカーVLCCに対する標準的な航路の検討結果を示す。AISデータから得られたVLCCの航跡を世界地図上にプロットしたものをFig. 2に示す。また、Table 2にGWSの海域ごとの航行時間の相対頻度を示す。ここで、Sea Area 105はGWSで定義されていない海域を便宜的に示したもので、標準的な航路を特定する際には除外している。航行ルートと比較するために、サイズの異なる油タンカー（ラージレンジ型タンカー（LR）・アフラマックスタンカー）の航跡をプロットしたものをFig. 3に示す。AISデータの解析の結果、北大西洋を航行する船舶の割合は、LR・アフラマックスタンカーの方がVLCCよりも高いということがわかった。さらに、Fig. 2とFig. 3を比べると、LR・アフラマックスタンカーはVLCCに比べ

て航路の多様性があることが分かる。これは、VLCCは荷主との長期契約に基づき特定の航路を航行することが多いのに対し、LR・アフラマックスタンカーはスポット契約に基づき様々な航路を航行することが多いという海運における一般的な事実に対応しているといえる。

VLCCの標準的な航路をコンター表示したものをFig. 4に示す。コンター表示の色は、航行時間の相対頻度の大きさに基づいている。VLCCの検討において、最も相対頻度が大きい海域はSea Area 61（インドネシアとインドの間のインド洋）であり、2年10ヵ月間における総航行時間に対する相対頻度は12.19%であった。なお、北大西洋海域（Sea Area 8, 9, 15, 16）の航行頻度はわずか0.36%であった。標準的な航路の波浪環境はGWSで与えられる各海象の波浪発現頻度をTable 2に示す相対頻度で期待値をとることにより求めることができる。

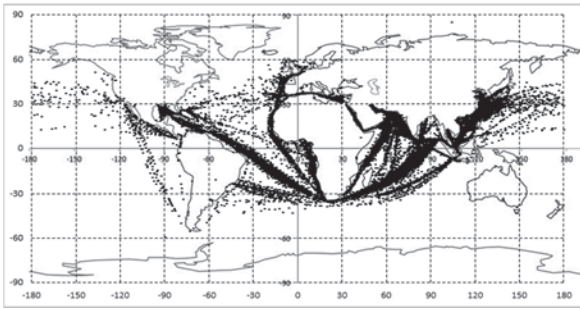


Fig. 2 World map of plotted AIS data of VLCCs

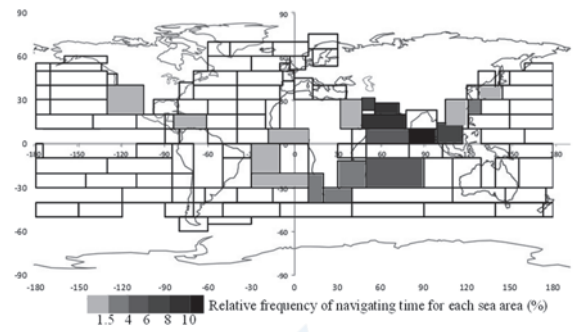


Fig. 4 Standard operating route of VLCCs classified in GWS sea areas

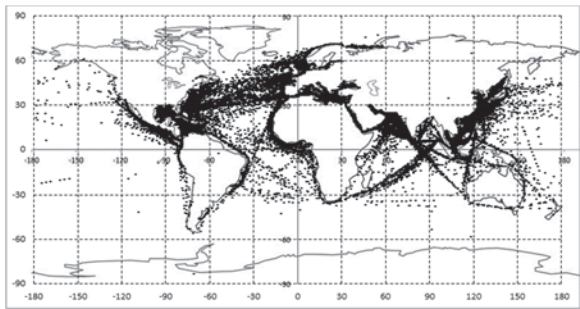


Fig. 3 World map of plotted AIS data of LR and Aframax oil tankers

Table 2 Relative frequency of navigation time corresponding to each sea area specified in the GWS (%) for VLCCs

Area	Frequency	Area	Frequency	Area	Frequency	Area	Frequency
1	0.00	28	1.43	55	0.11	82	0.00
2	0.00	29	1.78	56	1.18	83	0.05
3	0.00	30	0.29	57	0.27	84	1.66
4	0.00	31	0.09	58	1.63	85	3.13
5	0.01	32	0.87	59	0.48	86	0.00
6	0.12	33	0.35	60	4.77	87	0.36
7	0.15	34	0.12	61	12.19	88	0.16
8	0.00	35	0.05	62	6.86	89	0.50
9	0.01	36	0.49	63	0.02	90	3.54
10	0.02	37	1.62	64	0.05	91	0.46
11	0.24	38	6.01	65	0.01	92	0.00
12	0.00	39	9.39	66	0.75	93	0.00
13	0.13	40	1.85	67	1.59	94	0.00
14	0.25	41	2.90	68	1.43	95	0.06
15	0.04	42	0.31	69	1.06	96	0.06
16	0.31	43	0.13	70	1.28	97	0.03
17	0.24	44	0.10	71	0.00	98	0.02
18	0.01	45	0.07	72	0.00	99	0.00
19	0.03	46	0.19	73	0.05	100	0.00
20	0.08	47	1.67	74	1.15	101	0.00
21	0.33	48	0.49	75	2.52	102	0.00
22	1.66	49	0.08	76	4.63	103	0.09
23	0.01	50	8.87	77	0.21	104	0.01
24	0.19	51	0.23	78	0.27	105	2.30
25	0.82	52	0.08	79	0.00		
26	0.29	53	0.05	80	0.00		
27	0.60	54	0.00	81	0.00		

### 5. VLCCの標準的な航路に対する波浪発現頻度表

Fig. 4のように求められる標準的な航路からGWSの通年波浪発現頻度と各海域の相対頻度を考慮して、標準的な航路に対する期待波浪発現頻度表をTable 3の通り作成した。この波浪発現頻度表は、各有義波高 (Hs) 及びゼロアップクロス周期 (Tz) に対する波の発生頻度を表している。

**Table 3 Wave scatter table for the standard operating route of VLCCs**

		Hs															
		1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5
Tz	0.5	0	3	1219	9710	9789	3856	1071	232	40	6	1	0	0	0	0	0
	1.5	0	2	491	5651	11348	8547	5114	1855	556	124	23	4	0	0	0	0
	2.5	0	1	128	1662	4589	5783	4695	2709	1126	351	87	18	3	1	0	0
	3.5	0	0	38	481	1540	2349	2458	1898	1053	427	134	34	7	1	0	0
	4.5	0	0	10	141	499	833	996	947	659	329	123	37	9	2	0	0
	5.5	0	0	3	42	165	289	363	393	325	192	83	28	8	2	0	0
	6.5	0	0	1	13	56	103	129	149	139	94	46	17	5	1	0	0
	7.5	0	0	0	4	20	38	47	54	59	41	22	9	3	1	0	0
	8.5	0	0	0	1	7	14	17	19	21	17	10	4	1	0	0	0
	9.5	0	0	0	1	3	6	7	7	8	7	4	2	1	0	0	0
	10.5	0	0	0	0	1	2	3	3	3	3	2	1	0	0	0	0
	11.5	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	12.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### 6. 船舶の疲労強度評価に対する設計荷重の考え方

応力の応答関数 (RAO) と波浪発現頻度表が与えられれば、応力応答スペクトルに基づく応力変動の長期分布を求めることができる。しかしながら、IACSのCSR-BC&OTをはじめとする船級協会の規則においては、あらかじめ設定した設計荷重を用いて簡易的に応力変動の長期分布を求めている。

具体的には、CSR-BC&OTでは疲労強度評価に用いる荷重として、北大西洋波浪環境における超過確率10<sup>-2</sup>に対応する荷重の期待値を参照値として、ワイブル形状係数1の指数分布で、応力変動の長期分布を近似している。なお、超過確率の参照値として10<sup>-2</sup>を選択している理由は、10<sup>-2</sup>に対応する応力変動までの疲労被害度の累積で疲労強度がほとんど決定されるため、また、ワイブル形状係数の違いが累積疲労被害度に与える影響が小さいためである<sup>9)</sup>。従って、標準的な航路に対する荷重を設定するためには、北大西洋波浪環境における超過確率10<sup>-2</sup>に対応する荷重を標準的な航路の波浪環境における超過確率10<sup>-2</sup>に対応する荷重に修正するための係数 (荷重修正係数) を導入すればよい。

### 7. 荷重修正係数の導出方法

Table 3のように得られた標準的な航路に対する長期波浪発現頻度表とIACS Rec. No.34<sup>10)</sup>の北大西洋航路に対する長期波浪発現頻度表を用いて、疲労

強度評価に導入すべき荷重修正係数を検討した。なお、IACS Rec. No.34では北大西洋波浪環境に基づく波浪発現頻度表をFig. 1のSea Area 8, 9, 15, 16に対応するGWSの各波浪発現頻度表を拡張することにより求めている (Table 4参照)。

荷重修正係数は応力のRAOに基づく方法 (検討1)、荷重成分のRAOに基づく方法 (検討2)、有義波高分布に基づく方法 (検討3) の3種類の方法で導出し、結果を比較した。検討1及び2による荷重修正係数の算出方法を付録に示す。検討1及び2の対象船は260000DWTのVLCCとした。短期予測ではISSC1964にて推奨されているPierson-Moskowitz型スペクトルを用い、長期予測を行う際は、全波向きを考慮した。

**Table 4 Wave scatter table of North Atlantic wave environment specified in IACS Rec. No.34**

		Hs															
		3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5
Tz	0.5	0	1	134	886	1186	634	186	37	6	1	0	0	0	0	0	0
	1.5	0	29	986	4976	7738	5570	2376	704	161	31	5	1	0	0	0	0
	2.5	0	2	198	2159	6230	7450	4860	2068	645	160	34	6	1	0	0	0
	3.5	0	0	35	696	3227	5675	5099	2838	1114	338	84	18	4	1	0	0
	4.5	0	0	6	196	1354	3289	3858	2886	1275	455	131	32	7	1	0	0
	5.5	0	0	1	51	498	1603	2373	2008	1126	464	151	41	10	2	0	0
	6.5	0	0	0	13	167	690	1258	1269	826	387	141	42	11	3	1	0
	7.5	0	0	0	3	52	270	584	703	525	277	112	37	10	3	1	0
	8.5	0	0	0	1	15	98	256	351	297	175	78	28	8	2	1	0
	9.5	0	0	0	0	4	33	102	160	152	99	48	19	6	2	0	0
	10.5	0	0	0	0	1	11	38	68	72	52	27	11	4	1	0	0
	11.5	0	0	0	0	0	3	13	27	31	23	14	6	2	1	0	0
	12.5	0	0	0	0	0	1	4	10	13	11	7	3	1	0	0	0
	13.5	0	0	0	0	0	0	1	4	5	3	2	1	0	0	0	0
14.5	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	0	0	0	0	0	
15.5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	
16.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

### 7.1 応力のRAOを用いた修正係数 (検討1)

VLCCの中央ホールドの中央位置における内底板とホッパー斜板、フロアの取合い部に生じる応力のRAOを船速5ノットの条件で荷重構造一貫解析<sup>11)</sup>により算出した。本検討においては、同構造で疲労強度に最も支配的である横方向の応力のRAOを用いた。

応力範囲の短期分布並びに標準的な航路及び北大西洋の波浪発現頻度表からそれぞれの疲労被害度を算出し、比をとることで疲労被害度の修正係数η<sub>D</sub>を導出した。荷重修正係数ηはη<sub>D</sub>の3乗根を取ることで導出した。得られた結果をTable 5に示す。

**Table 5 Result of examination 1**

Location	η <sub>D</sub>	η
Inner Bottom Plate at midship (Connection of Hopper plate and Floor)	0.193	0.578

where, η<sub>D</sub>: modification factor of fatigue damage  
η: modification factor of design load

### 7.2 各荷重成分のRAOを用いた修正係数 (検討2)

VLCCの中央ホールドの中央位置における各荷重成分 (ハルガーダ垂直曲げモーメント, 水平曲げモ

ーメント、波浪変動圧、x方向、y方向、z方向のタンク重心加速度)のRAO及び位相差を、ストリップ法<sup>12)</sup>を用いた直接荷重解析により船速5ノットの条件で算出した。内圧の動的成分は、貨物油及びバラスト水の慣性力として計算し、内外圧差はそれぞれの位相差を考慮して求めた。

各荷重成分の短期分布並びに標準的な航路及び北大西洋の波浪発現頻度表からそれぞれの疲労被害度を算出し、比をとることで疲労被害度の修正係数 $\eta_D$ を導出した。また、荷重修正係数 $\eta$ は $\eta_D$ の3乗根を取ることで導出した。得られた結果をTable 6に示す。

Table 6 Result of examination 2

Load component (at the midpoint of the midship hold)	$\eta_D$	$\eta$
Hull girder vertical bending moment	0.182	0.567
Hull girder horizontal bending moment	0.241	0.622
Hydrodynamic pressure at draught position	0.228	0.611
Hydrodynamic pressure at centre of ship bottom	0.193	0.578
Hydrodynamic pressure at ship bilge	0.225	0.608

where,  $\eta_D$ : modification factor of fatigue damage  
 $\eta$ : modification factor of design load

### 7.3 波浪発現頻度表の有義波高の3乗期待値に基づく修正係数(検討3)

有義波高は(1)式のワイブル分布に従うと仮定した。

$$F_H(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right\} \quad (1)$$

ここで、  
 $\alpha$ : ワイブル形状係数、 $\beta$ : ワイブル尺度係数

溶接継手の疲労被害度Dは、S-N線図の傾きの逆数が3であること、また、荷重は一般的に波高に比例することから、有義波高Hの3乗期待値に比例すると考えることができる。有義波高の3乗期待値は(2)式のように表すことができる。

$$D \propto E\left[H^3\right] = \beta^3 \cdot \Gamma\left[1 + \frac{3}{\alpha}\right] \quad (2)$$

疲労被害度の修正係数は(3)式に示すように(2)式で求められる各波浪環境の波高の3乗期待値の比を取ることで導かれる。

$$\eta_D = \frac{\beta_{SR}^3 \cdot \Gamma\left[1 + \frac{3}{\alpha_{SR}}\right]}{\beta_{NA}^3 \cdot \Gamma\left[1 + \frac{3}{\alpha_{NA}}\right]} \quad (3)$$

一定波高で同じ疲労被害度を与える等価波高 $H_{eq}$ は(4)式に示すように疲労被害度の3乗根に比例するものとして計算される。

$$H_{eq} \propto \sqrt[3]{D} \quad (4)$$

従って、標準的な航路の波浪環境(SR)及び北大西洋波浪環境(NA)に基づく波浪発現頻度表の有義波高の周辺分布をワイブル分布で近似した場合、荷重修正係数は、(5)式に表されるように、標準的な航路と北大西洋波浪環境の有義波高の3乗期待値の3乗根の比から導かれる。

$$\eta = \frac{\beta_{SR} \cdot \sqrt[3]{\Gamma\left[1 + \frac{3}{\alpha_{SR}}\right]}}{\beta_{NA} \cdot \sqrt[3]{\Gamma\left[1 + \frac{3}{\alpha_{NA}}\right]}} \quad (5)$$

得られた結果をTable 7に示す。

Table 7 Result of examination 3

	$\eta_D$	$\eta$
Regardless of load component and location	0.249	0.629

where,  $\eta_D$ : modification factor of fatigue damage  
 $\eta$ : modification factor of design load

### 7.4 各検討結果の比較

検討1から3で求めた荷重修正係数を比較した結果をFig. 5に示す。

結果として、今回検討を行ったVLCCにおいては、標準的な航路に基づく荷重が北大西洋荷重の約0.6倍であることが分かった。これは継手の疲労被害度に換算すると約0.2倍になる。ただし、この値には航路のばらつきに対する安全率は考慮されていない。

なお、各荷重成分のRAO(ハルガーダモーメント、各位置における動的圧力、各貨物タンクの重心における加速度)を用いて算出した荷重修正係数は、おおよそ同じであった。さらに、上記の各荷重成分のRAO、応力のRAO、有義波高の3乗期待値から求めた荷重修正係数は、今回の検討においては、おおよそ

よそ同じ値であった。

上記より、北大西洋波浪環境の設計荷重を標準的な航路に基づく設計荷重に修正するための係数は、簡便さの観点からも有義波高の3乗期待値から求めるのが良いと考えられる。

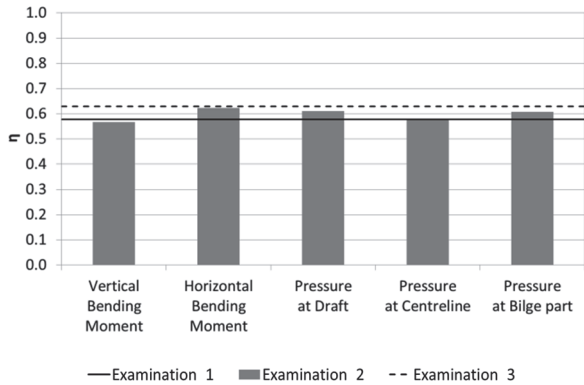


Fig. 5 Comparison result of each examination

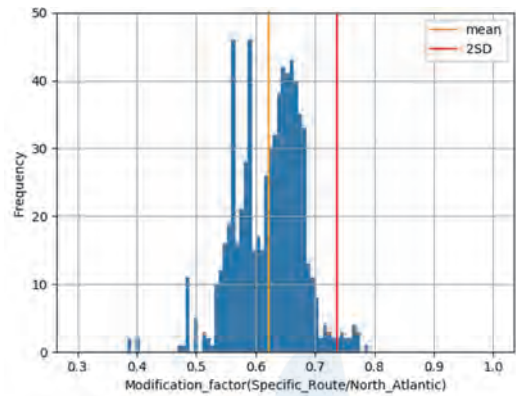


Fig. 6 Histogram of load modification factors for VLCCs

### 8. VLCCの荷重修正係数の分布と航路の関係

ここでは、VLCCの航路のばらつきに対する安全率について考察する。

まずは、715隻のVLCCに対して、個船ごとの航行海域を考慮した波浪発現頻度表を作成し、7.3に示す方法で荷重修正係数を求めた。個船ごとの荷重修正係数の頻度分布をFig. 6に示す。横軸が荷重修正係数の大きさ、縦軸はその頻度を表す。VLCCでは、荷重修正係数の最大値、つまり、最も厳しい海象を航行している船の荷重修正係数は0.786であった。また、Fig. 6中のオレンジ線が分布の平均値を表す。この平均値は、7.3で求めた標準的な航路の荷重修正係数に対応している。

次に、安全率を考慮するにあたり、VLCCの荷重修正係数のばらつきを考慮して、平均値から2標準偏差分大きい側の値求めた。この値をFig. 6中に赤線で示す。VLCCでは、平均値から2標準偏差分大きい側の値は0.736で、継手の疲労被害度修正係数に換算するとおおよそ0.4になる。

それぞれの荷重修正係数に対応する航路がどのようなものか把握すべく、AISデータから荷重修正係数の大きさが上位10隻の船の航路及び荷重修正係数の大きさが平均値から2標準偏差分大きい側の値以下となる船の上位14隻の航路を調査した。それぞれの航路をFig. 7及びFig. 8に示す。荷重修正係数の大きさが上位10隻の船はほとんどの船が喜望峰周りの航路や北太平洋航路等の海象が厳しい航路を航行していることが分かる。

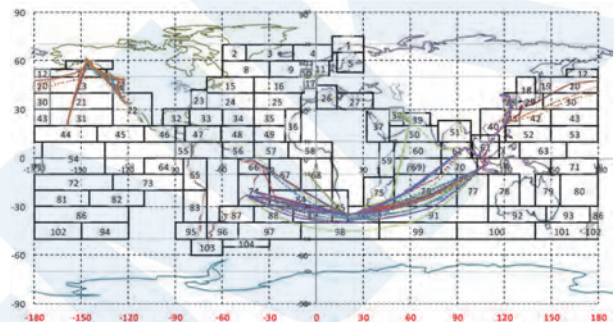


Fig. 7 Operating routes of the top 10 VLCCs with the largest load modification factors

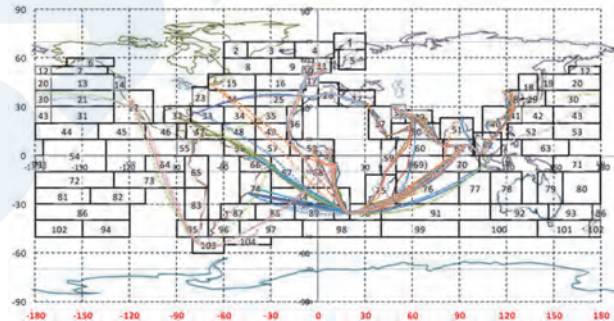


Fig. 8 Operating routes of the top 14 VLCCs whose load modification factors are less than or equal to the mean value plus twice the standard deviation

### 9. Feederコンテナ船の荷重修正係数の分布と航路の関係

VLCCに比べて多様な航路を航行すると考えられるフィーダーコンテナ船を対象として8.で行った検討と同じ検討を行った。

フィーダーコンテナ船2793隻の荷重修正係数の分布をFig. 9に示す。フィーダーコンテナ船の荷重修正係数の最大値は0.895であり、平均値（標準的な航路に対応する荷重修正係数）は0.625であった。また、荷重修正係数のばらつきを考慮した場合の平

均値から2標準偏差分大きい側の値は0.781であった。

荷重修正係数の大きさが上位10隻の船の航路をFig. 10に示す。10隻中8隻が専ら北大西洋を航行していることが分かる。1隻は北大西洋同様厳しい海象として知られる北太平洋を航行しており、残りの1隻はアジア～オーストラリア間を航行している。アジア～オーストラリア間を航行している船はBMT GWSで厳しい海象として定義されているArea 101を航行しているが航路を見るとオーストラリアの沿岸しか航行しておらず海象としてはそこまで厳しいものではないと考えられる。しかしながら、今回の検討においてはBMT GWSで定義される波浪発現頻度表と航行時間の相対頻度のみを考慮したものであるため、得られた荷重修正係数が大きくなったと考えられる。BMT GWSの波浪発現頻度表ではなく、例えばHindcastデータやForecastデータ等から得られる実遭遇海象を用いることで、より実現象に即した検討を行うことができると考えられる。

Fig. 11は荷重修正係数が平均値から2標準偏差分大きい側の値以下となる船の上位10隻の船の航路である。これらの船の航路を確認すると、10隻中7隻が北大西洋を航行していることが分かる。このことから標準的な航路に基づく荷重に対して、2標準偏差分の安全余裕を考慮した荷重を用いることによって、北大西洋航行にも対応した荷重になると言える。ただし、専ら北大西洋を航行する船舶に対しては、CSR-BC&OTで規定されるような北大西洋波浪環境に基づく荷重を用いた評価を行う必要があるであろう。

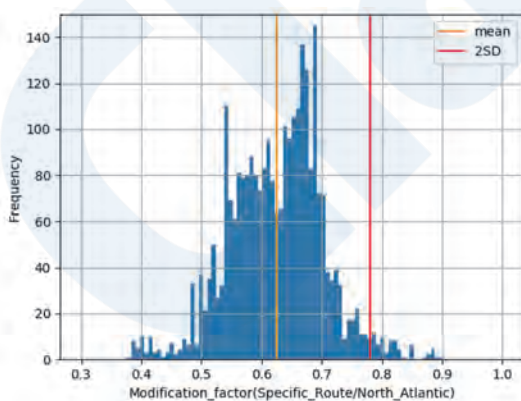


Fig. 9 Histogram of modification factors of loads for feeder container carriers

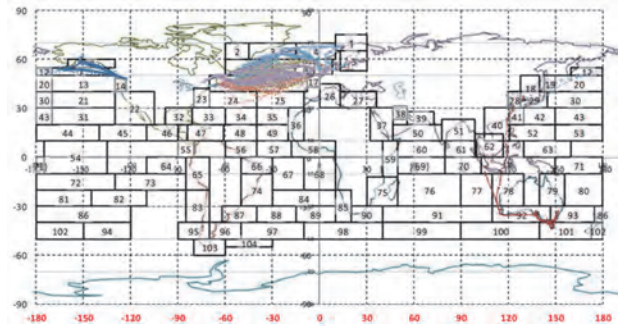


Fig. 10 Operating routes of the top 10 feeder container carriers with the largest load modification factors

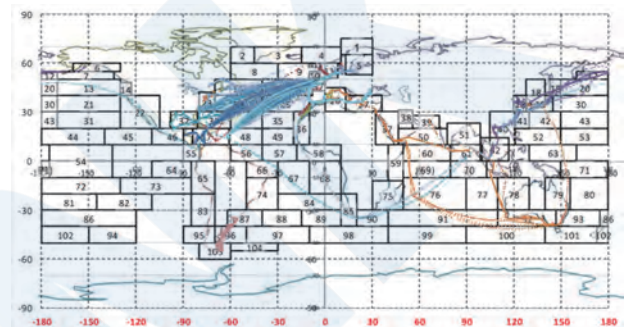


Fig. 11 Operating routes of the top 10 feeder container carriers whose load modification factors are less than or equal to the mean value plus twice the standard deviation

## 10. AISデータに基づく運航比率

CSR-BC&OTは、設計寿命25年間に会える波の繰り返し数に対応した疲労被害度を算出するよう規定しているが、設計寿命25年の85%を船舶の運航期間とし、残りの15%は貨物の積み下ろし、検査又はメンテナンス等の非運航期間としている。

本研究では、AISデータを用いて以下の手順で運航比率を求めた。

- (1) 各船の時系列データにおいて速度が1m/sec以下の場合には速度ゼロとみなし、その時刻において停船（停泊）中とする。
- (2) 運航比率はそれぞれの船舶に対して運航期間と非運航期間から計算する。運航比率は船によってばらつきがあるため、ばらつきが正規分布に従うと仮定し、運航比率の平均値と90%累積確率を算出した。

上記によって求めた運航比率をTable 8に示す。結果として、定期航路に従事すると思われるカテゴリーの船種ほど運航比率が高い傾向にあることが分かる。

Table 8 Operating ratios of each ship

Ships	Operating Ratio	
	Average	90 %
Baby BC, Handy BC	0.50	0.67
Handymax BC	0.54	0.68
Panamax BC, Overpanamax BC	0.58	0.75
Capesize BC	0.69	0.81
Feeder CT	0.56	0.74
Panamax CT	0.72	0.85
Overpanamax CT	0.72	0.84
Mega CT	0.67	0.79
General cargo ship	0.39	0.57
LNG carrier	0.70	0.93
LPG carrier	0.51	0.73
Multipurpose ship	0.48	0.64
Small OT, Middle range OT	0.48	0.73
Large range OT, Aframax OT	0.58	0.76
Suezmax OT	0.65	0.84
VLCC, ULCC	0.66	0.90
Chemical tanker	0.50	0.68
Ore carrier	0.70	0.88
Reefer	0.60	0.85
Vehicle carrier	0.70	0.83
Wood chip carrier	0.64	0.85

## 11. AISデータの解析から得られたその他の知見

本研究では、VLCCを例にとりて検討結果を示したが、他の船種に対しても標準的な航路の把握や個船ごとの荷重修正係数のばらつきの検討を行っている。これらのAISデータの解析から得られた知見について以下に述べる。

- (1) 船舶は、北米～ヨーロッパ間やアジア～北米間を航行する場合、厳しい波浪環境として知られる大圏航路を避けて航行する傾向にある。
- (2) 北大西洋を航行する船舶は、一般的にGWSのArea 8, Area 9, Area 15, Area 16ではなく、Area 15, Area 16, Area 24, Area 25を航行する傾向が強い。
- (3) 船舶は、近隣の港で貨物の積み下ろしを行うため、大陸に沿って航行する割合が多く、大洋（北大西洋、北大西洋、中央大西洋、インド洋）の真ん中を航行する割合は相対的に低い。

## 12. 結論

本研究では、2年10ヵ月に亘る24,349隻分のAISデータを解析することで船種や船のサイズごとの標準的な航路を特定した。

標準的な航路に対応した設計荷重の設定に必要で

ある波浪発現頻度表を各海域の航行時間の相対頻度とGWSの各海域の波浪発現頻度表を用いて求めた。

北大西洋波浪環境に対する設計荷重を標準的な航路の波浪環境に対する設計荷重に修正するための係数を応力のRAO、荷重成分（ハルガードモーメントや動的圧力）のRAO、有義波高の3乗期待値から求め、それらを比較した。VLCCを対象として上記の検討を行った結果として得られた知見を以下に示す。

- AISデータの解析から得られた各海域の航行時間の相対頻度を用いて、VLCCの標準的な航路を特定した。この航路はVLCCが一般的に原油をペルシャ湾から日本、アメリカ、ヨーロッパに運搬しているという事実に対応している。
- 疲労強度評価用として、北大西洋波浪環境の設計荷重を標準的な航路の波浪環境の設計荷重に修正するための係数を各種方法で比較したが、その手法の簡単さを考慮し、有義波高の3乗期待値から求めるのが良いと考えられる。

本研究においては、VLCC1隻を用いて検討を行ったが今後は他の船種についても荷重修正係数の導出方法についての検討を行い、上記の知見について確認を行う予定である。

また、VLCC及びフィーダーコンテナ船それぞれに対して、個船ごとの荷重修正係数の頻度分布を示した。安全余裕として平均値から2標準偏差分大きい側の値を求め、荷重修正係数の大きさが上位10隻の船の航路及び荷重修正係数が平均値から2標準偏差分大きい側の値以下となる船の上位十数隻の船の航路を示した。

なお、本研究では実態に即した疲労強度評価を行うために実際の航路に基づく疲労評価用荷重の設定方法について検討を行ったが、設計規則に規定する疲労評価用荷重については引き続き検討を進めるつもりである。

さらに、疲労強度評価用の荷重修正係数だけでなく、運航比率についてもAISデータの解析による検討を行い、以下の知見を得た。

- パナマックスサイズのコンテナ船、LNG船、VLCC・ULCC、鉱石運搬船、冷凍運搬船、チップ船は、運航比率が相対的に高いことが分かった。

## 参考文献

- 1) IACS : Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, 2018
- 2) E. Eisinger, J. B. Helmers, G. Storhaug : A

method for describing ocean environments for ship assessment, 6<sup>th</sup> International conference on Design for Safety, 2016.

- 3) M. Fujii, H. Hashimoto, Y. Taniguchi : Analysis of Satellite AIS Data to Derive Weather Judging Criteria for Voyage Route Selection, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Volume 11, pp271-277, 2017.
- 4) I. Fujino, C. Claramunt, A. O. Boudraa : Extracting Route Patterns of Vessels from AIS data by Using Topic Model, 2017 IEEE International Conference on Big Data, pp4744-4746, 2017.
- 5) K. Honda, R. Shoji, M. Inaishi : A Study of Standard Ship Track with AIS Data, the Journal of Japan Institute of Navigation, Volume 137, pp97-102, 2017.
- 6) A. P. Teixeira, C. G. Soares : Risk of Maritime Traffic in Coastal Waters, 37<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering (OMAE), pp17-22, 2018.
- 7) British Maritime Technology Limited : Global Wave Statistics, 2000.
- 8) IMO : the International Convention for the Safety of Life at Sea, 2017.
- 9) IACS : Technical Background for Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, 2018.
- 10) IACS : Recommendation No.34 Standard Wave Data, 2001.
- 11) 日本海事協会 : 直接荷重解析に基づく強度評価ガイドライン, 2018.
- 12) N. Salvesen, E. O. Tuck, O. M. Faltinsen : Ship Motions and Sea Load, Trans SNAME, Vol.78, pp.250-287, 1970.

## 付録

### 疲労被害度の比の算出方法

各積付状態の疲労被害度は、応力範囲がワイブル分布に従うという仮定の下では、式(A1)に記す値に比例する。

$$D \propto \beta^m \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m}{\alpha}\right) \quad (A1)$$

ここで、 $m$ は溶接継手に対するS-N線図の傾きの逆数で3、 $\alpha$ はワイブル形状係数、 $\beta$ はワイブル尺度係数、 $\Gamma$ はガンマ関数

従って、北大西洋の波浪環境と標準的な航路の波浪環境に対する疲労被害度の比は式(A2)のように計算される。

$$\frac{D_{SR}}{D_{NA}} = \left(\frac{\beta_{SR}}{\beta_{NA}}\right)^m \cdot \frac{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\alpha_{SR}}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\alpha_{NA}}\right)} \quad (A2)$$

式(A2)中の「SR」や「NA」は、それぞれ標準的な航路や北大西洋航路に対応する値であることを表している。

疲労被害度の修正係数 $\eta_D$ は、満載状態及びバラスト状態の総疲労被害度を標準的な航路と北大西洋航路のそれぞれに対して求め、比を取ることで求められる。(式(A3))

$$\eta_D = \frac{D_{SR, Full} + D_{SR, Ballast}}{D_{NA, Full} + D_{NA, Ballast}} \quad (A3)$$

ここで、式(A3)中の「Full」、「Ballast」は、それぞれ満載状態、バラスト状態に対する値であることを意味している。

等価疲労被害度を与える等価波高 $H_{eq}$ は(A4)式に示すように疲労被害度の3乗根に比例するものとして計算される。

$$H_{eq} \propto \sqrt[3]{D} \quad (A4)$$

従って、設計荷重（設計波高）の修正係数 $\eta$ は、式(A3)により求めた $\eta_D$ を用いて、式(A5)により算出される。

$$\eta = \sqrt[3]{\eta_D} \quad (A5)$$





## 帆走式洋上風力発電システムの特性解析

青木 繁光\*

## 1. はじめに

帆走技術は風車と同様に数千年前にその起源を遡る技術であるが、大航海時代に続く産業革命期の隆盛を経て19世紀末には実用的価値を喪失した。

帆走にかわる代替技術は急速に発達した外燃機関と内燃機関であったが、近年化石燃料の高騰への対応策と地球温暖化対策としてのCO<sub>2</sub>削減の観点から近代的帆走技術開発の取り組み<sup>1)</sup>が再開され、わが国においても総合工学的な取り組み<sup>2)</sup>が続けられている。

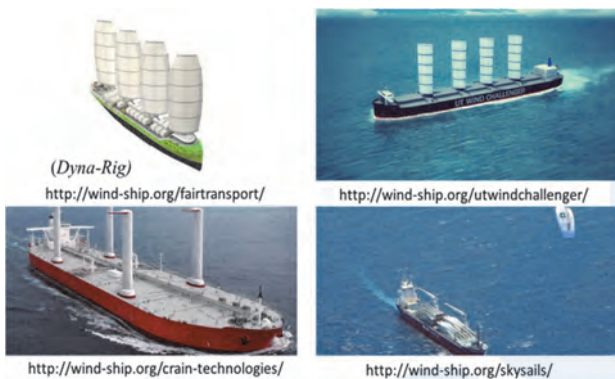


図1 各種帆走装置

図1にオイルショック後の1970年代以降に開発された近代的帆走技術の概念を示す。燃費削減対策としての帆走技術を発展させ、帆走技術を利用する独立電源型発電システム即ち帆走式洋上風力発電システム(OEHV: Ocean Energy Harvesting Vessel)の概念は1991年に第一回地球環境論文(日本経済新聞社)にて“地球環境文化研究所賞”を受賞した。

提案するシステムは高効率の空中翼と水中フィンの組み合わせによって付加的な推進力を獲得し、水中ロータによる発電を行う。船内で水電解による水素製造を行いメタノールへの変換やMCH(メチルシクロヘキサン)などへの貯蔵が可能となる。図2に示すように我が国では風力エネルギーの利用拡大をはかるために着床式のみならず浮体式や浮遊式も含めた洋上風力利用の研究開発が進められている。

Mode	Stand-still	↔	Motion
Type	Monopole/Jacket/Tripod	Floating	Sailing
Depth (m)	5~60	30~200	N/A
WT type	HAWT/VAWT		Sail & Hydro-rotor
Conversion	Inter-connection		Water Electrolysis & Store etc.
Customer	Utility		Thermal Power-Plant/Fuel-cell

図2 洋上風力発電の概念

本論文ではそのような背景のなかで、提案するシステムの位置づけを明らかにするために、より詳細なパラメトリックリサーチを試みた。

## 2. 基本概念

## 2.1 出力性能

構想しているシステムは空中翼と水中翼よりなる帆走システムによって風力エネルギーを推進力に変換するもので、船体抵抗の一部に水中ロータ(水車)で発生するスラスト(抵抗)を含み、結果的に風力エネルギーによる発電を行う。

図3に真風速 $u$ 、船速 $v$ 、相対風速 $\chi$ の関係と関連して発生する推進力 $T_a$ および横力 $N_a$ などの関係を示す。

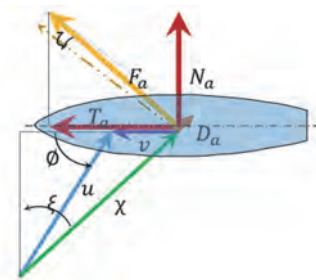


図3 推進力の生成

船体速度を支配する基礎方程式を式(1)として示す。

$$m \frac{dv}{dt} = T_a - (D_{na} + N_w) - D_w - D_r \quad (1)$$

$m$ は船体質量、 $D_{na}$ は船体に働く空気抵抗、 $N_w$ は

\* 再生可能エネルギー部

$N_a$ に起因して誘起される付加的な船体抵抗,  $D_w$ は船体抵抗,  $D_r$ は水中ロータに働く抵抗である。

関連する諸量のパラメトリックな変化による走行速度は式(1)の解として求めることが出来る。

発電出力  $P$  は式(2)によって求める。

$$P = \frac{1}{2} \rho_w v^3 \pi r^2 C_p \quad (2)$$

$\rho_w$ は海水の密度,  $r$ は水中ロータの半径,  $C_p$ は水中ロータの出力係数である。

## 2.2 空中翼

燃費削減のための帆走技術についての理論研究<sup>3)</sup>, および詳細なFeasibility Study<sup>4)</sup>によれば, 空中翼については性能向上と省力化のために高揚力装置を備えた固定翼が有利である。しかしながら帆走には絶対風向に対して真向いを除く左右二百数十度の針路をとることが要求されるため, 高揚力断面として優れている非対象翼断面の採用にはたとえば図4に示されるような懸架方式(Delta-rig)が求められる。



図4 Delta-rigによる実験

## 2.3 水中翼

進行方向真後ろから風を受けるモード(追風, 又はランニング)以外は空中翼による空気力に横方向成分  $N_a$  を伴うため中小型の帆船ではセンターボードまたはキールと呼ばれる水中翼を備え, 大型船では船体の横滑りによって発生する横力で対抗する。

## 2.4 代表的な形式

表1に代表的な空中翼と水中翼の組み合わせを掲げ, 図5にその概念図を示す。

表1 各種帆走装置

Side-force \ Rig	Dyna	AIST	Delta
Yawing	A Conservative		
Flapped-fin		B Normal	
V-fin		C Semi-challenge	D Challenge

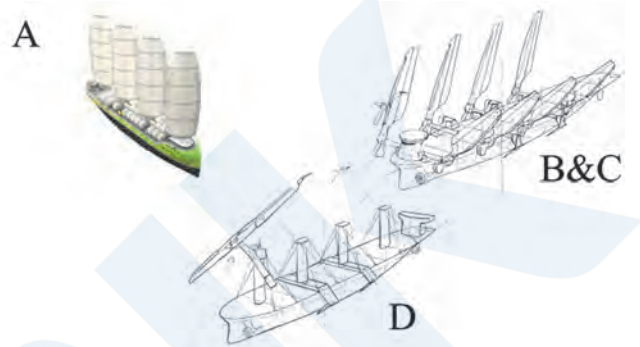


図5 各種帆走装置

各形式の評価指標として以下の項目が考えられる。

1. 発電性能
2. 傾斜(ヒール)角度
3. 横滑り角度
4. 強風回避
5. 凌波性

AはDyna-Rigと呼ばれすでにスーパーヨットなどで実用化されている形式で円弧断面の軟翼をアルミ材の横桁で支えモータ駆動で縮帆を行う。タック(風上に向かって走行する際に, 風を受ける向きを左右交替させる操作)の際には支柱ごとに回頭を行い, その際に前縁と後縁が入れ替わる。

BおよびCはAIST-Rigと呼ばれる高揚力装置付きの非対称断面を持つ片持ち翼で左右の翼を交互に持ち上げながらタック操作を行う。Bはフラップの付いた水中翼で非対称性を獲得し, Cは強めの上反角を有するV-finと呼ばれる水中翼を有する。

DはDelta-Rigと呼ばれ図4で示した高揚力装置付きの非対称翼を空中翼として用い, 特殊な懸架装置による揺動運動でタック操作を行う。

## 3. 基本特性評価

### 3.1 基準船

表2に基準船の主要目を示す。

基準船に対して2.4節で述べたA, B, C, D各種のリグを施し真風速  $u$  とコース角  $\phi$  を同一条件で変化させたときの発電出力  $P$ , 走行速度  $v$ , 傾斜角  $\theta$  の比較を行う。シミュレーションでは図3および式

(1) によって、定風速下のコース角一定条件で加速を行い最終的な静定値を求める。

表2 基準船の主要目

Terms	figure	ref.
L. W. L (m)	350	Water line length
$A_{whull}$ (m <sup>2</sup> )	17795	Wet area of the hull
$A_{nhull}$ (m <sup>2</sup> )	480	Section area above water
$C_{fwater}$	0.001	×1.1 by wave making
$R_{wrotor}$ (m)	~5.0	Radius of the rotor
$C_{Prototor}$	0.45	Power coef. $\lambda$ ; 1.75 ( $\eta_G$ ; 0.7)
$C_{Trotor}$	0.3	Thrust coef. $\lambda$ ; 1.75
$N_{rotor}$	2	Number of the rotor
M (ton)	162250	Displacement of the hull
$u_{hub}$ (m/s)	10, 12, 14	
$\phi$ (rad.)	1.2, 1.4, 1.6	

### 3.2 性能評価

代表的な形式についての各パラメータについての関係はA, B, Cの各rigについて

$$\chi^2 = u^2(\sin \phi)^2 + (v + u \cos \phi)^2 \quad (3)$$

$$\xi = \cos^{-1} \left( \frac{u \sin \phi}{\chi} \right) \quad (4)$$

$$\zeta = \tan^{-1} \left[ \left( C_{d0} + \frac{c_l^2}{\pi A} \right) / c_l \right] \quad (5)$$

となるが、DのDelta-rigについては空中翼を45度傾けた状態で用いるため式(5)の代わりに

$$\zeta = \tan^{-1} \left[ \left( C_{d0} + \frac{c_l^2}{\pi A} \right) / \frac{1}{\sqrt{2}} c_l \right] \quad (6)$$

を用いる。

同様に空中翼に発生する力 $F_a$ はA, B, Cについては

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_a S_{wing} \chi^2 \sqrt{c_l^2 + \left( C_{d0} + \frac{c_l^2}{\pi A} \right)^2} \quad (7)$$

Dについては

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_a S_{wing} \chi^2 \sqrt{\frac{1}{2} c_l^2 + \left( C_{d0} + \frac{c_l^2}{\pi A} \right)^2} \quad (8)$$

となり、派生する推進力と横力については

$$T_a = F_a \cos(\xi + \zeta) \quad (9)$$

$$N_a = F_a \sin(\xi + \zeta) \quad (10)$$

さらに式(1)の右辺に現れる各抵抗成分については

$$D_{\pi a} = \frac{1}{2} \rho_a (v + u \cos \phi)^2 A_{\pi hull} C_{d\pi} \quad (11)$$

$$D_w = \frac{1}{2} \rho_w v^2 A_{whull} C_{fwater} \quad (12)$$

$$D_r = \frac{1}{2} \rho_w v^2 \pi r^2 C_T \quad (13)$$

となる。

### 3.3 傾斜(ヒール)角

図6に帆走時の船体傾斜を支配するモーメントを示す。船体を傾斜させる $N_a$ に起因するモーメント(空中翼による横力と船体部分に対抗的に発生する横力による偶力)に対して船体が本来持っている浮力 $M_A$ による復原力が対抗し傾斜角 $\theta$ でバランスする。

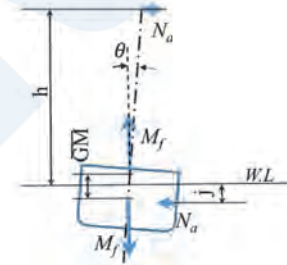


図6 横バランス

バランスを表す式は

$$M_f \overline{GM} \sin \theta = (h + j) N_a \quad (14)$$

となり傾斜角 $\theta$ は

$$\theta \cong \frac{(h+j)}{M_f \overline{GM}} N_a \quad (15)$$

となる。 $\overline{GM}$ は重心からメタセンター(傾斜角が微小の条件下では、移動する浮力ベクトルが船体のほぼ同じ位置で交差する。この点をメタセンターと呼ぶ)までの距離、 $h$ は空中翼の空力中心から喫水線までの高さ、 $j$ は船体横力の作用点から喫水線までの高さである。なお、V-finを装着した場合には図7に示すように $j$ が負、すなわちV-finが復原力をもたらす可能性がある。

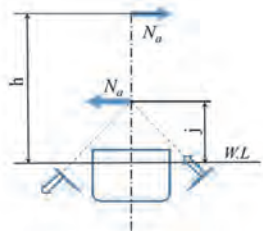


図7 V-finによる復原力

すなわちV-finでは約45°傾斜した一対のフィンを船体の左右に配置し、それぞれの迎え角を調整して風下側では上向き、風上側では下向きの水中力を発生させその合力が空中翼による横力 $N_a$ に対抗する。

### 3.4 横滑り

フィンを有しない形式Aの場合には横力のバランスのために船体に横滑りが生じる。この場合の付加的な抵抗については先行研究<sup>(4)</sup>などを参照して算出した。

### 3.5 設定パラメータ

それぞれのrigについての設定パラメータを表3に示す。

表3 設定パラメータ

Parameter \ Type	A	B	C	D
$S(m^2)$	10000	5000	5000	9600
$h(m)$	130	80	80	105
$j(m)$	10	5	-35	-35
$C_l$	1.0	3.0	3.0	3.0
$AR$	8	6.25	6.25	6
$r_w(m)$	3.0	4.0	4.0	5.0
ref.	Dyna-rig	AIST-rig + flapped fin	AIST-rig + v-fin	Delta-rig + v-fin

BおよびCの差異はフィンの形状のみであり結果として $j$ の値が異なっている。

### 3.6 発電出力と傾斜角

表2に示した走行条件によるそれぞれの型式における発電出力および船体傾斜角を表4として示し、そのうち風速14m/s時の結果を図8として示す。

表4 発電出力と傾斜角

Type \ u(m/s)	10	12	14
A	19.6 / 2.19	33.8 / 3.16	53.7 / 4.3
B	36.5 / 2.8	63 / 4.05	100 / 5.5
C	36.5 / 1.47	63 / 2.12	100 / 2.9
D	53.0 / 2.7	91.6 / 3.88	148.2 / 5.3

Power (MW) / Heel angle (degree)

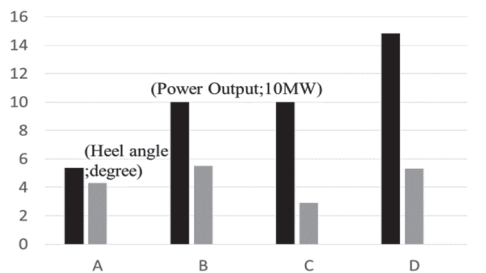


図8 風速14m/s時の発電出力と傾斜角

### 3.7 総合評価

2.4に示した評価指標に従ってそれぞれの型式についての評価を行う。

#### (1) 形式A

<長所>

- ・ Dyna-rigはすでに実用化された技術であり開発に伴うリスクが小さい。
- ・ 接岸や荷揚げ時の作業性、強風回避など通常の船舶としての運用に適する形態で、現在も開発が継続されており共通技術としての発展が可能。

<短所>

- ・ 空中翼の揚力係数は実効的に1.0くらいが限度であり翼面積が大きいかかわらず出力が小さい。
- ・ 横滑りによる横力の獲得や復原力を船体形状のみに頼ることになり性能面での最適化が困難になる。

#### (2) 形式B

<長所>

- ・ Aに比べて1/2の水中翼面積で約2倍の出力性能を発揮することが出来る。
- ・ 空中翼はすべてデッキ上に折り畳み可能で走行時や停泊時の強風回避が可能。

<短所>

- ・ 接岸や荷揚げ作業など通常の船舶に要求される利便性がなくOEHV特有の形態となる。
- ・ ヒール角が大きく水中ロータの運転条件や船内プラントの設計条件が厳しくなる。

#### (3) 形式C

<長所>

- ・ 形式Bの長所に加えヒール角が低減されるので水中ロータの運転条件やバラストタンクの要求仕様など船内プラントの設計条件が緩和される。

<短所>

- ・ OEHV特有の形態となる。

#### (4) 形式D

<長所>

- ・ 発電出力大

<短所>

- ・ V-finの適用にかかわらずヒール角が比較的大きい。

- ・強風回避が困難で用船上のリスクが大きい。
- ・空中翼の懸架システムとして新規技術の開発が要求される。

上記の検討結果により、将来技術として型式Dは否定できないものの、現時点での判断として形式Cを最も妥当な形式とした。

## 4. 仕様検討

### 4.1 基本構造

図9に形式Cの基本構造を示す。

軽量かつ高剛性の空中翼はアクチュエータによって片持ちで支えられ、折り畳み時の荷重を軽減するためのカウンターウェイトを装着している。翼断面は前縁スラットと後縁フラップを有する高揚力翼断面となっていて断面揚力係数3.0を実現する。

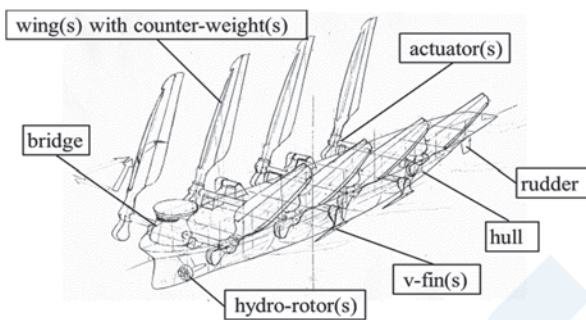


図9 形式Cの基本構成

空中翼は左右対になっていてランニング以外は左右の翼を交互に用いることによって非対称高揚力翼の利用を可能とする。アクチュエータにはslew-driveなどの旋回ベアリング装置を用いピッチ変換と翼の上下架を行う。V-finも空中翼同様にデッキ上に設けられた支軸によって懸架され左右独立に前後のセット角を調整することによって水流に対する迎え角が変化する。水中ロータは流速低下の少ない船首左右に装着しブリッジも視界を確保するために船首位置とする。

### 4.2 パラメトリックリサーチ

表4と同様に空力特性部分と水力特性部分の代表的なパラメータが基本特性に与える影響についてパラメトリックリサーチを行った。表5は風速14m/sでの出力 $P$ 、走行速度 $v$ 、傾斜角 $\theta$ について空中翼の揚力係数 $Cl_{air}$ 、アスペクト比 $AR_{air}$ 、コース角 $\phi$ をそれぞれベース値に対して0.8~1.2の範囲で変化させたときの感度分析である。図10に出力および傾斜角についての結果を示す。

表5 空力特性による感度分析

Coef. Var.	Measure.	variation				
		0.8	0.9	Base	1.1	1.2
$Cl_{air}$ (3.0)	P (MW)	73	86.7	100	112.6	124.1
	v (m/s)	16.3	17.75	18.6	19.36	20.0
	$\theta$ (degree.)	1.95	2.41	2.9	3.4	3.91
$AR_{air}$ (6.67)	P (MW)	88.6	94.7	100	104.6	108.6
	v (m/s)	17.9	18.2	18.6	18.9	19.1
	$\theta$ (degree.)	2.78	2.84	2.9	2.93	2.97
$\phi$ (1.4)	P (MW)	84.5	95.3	100	98.2	90.3
	v (m/s)	17.6	18.3	18.6	18.5	18.0
	$\theta$ (degree.)	3.44	3.22	2.9	2.47	2.0

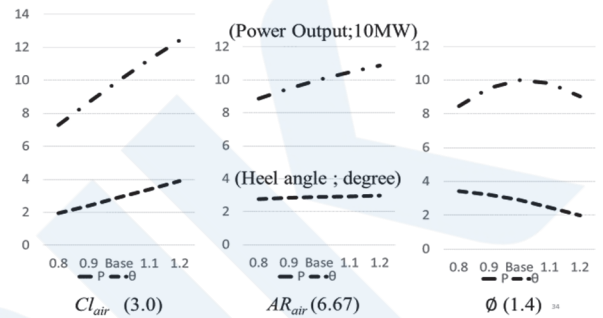


図10 空力特性による感度分析

(1)  $Cl_{air}$  揚力係数の変化による空気力の変化は殆ど比例的な出力変化をもたらし、最も重要なパラメータで有ることがわかる。参考文献<sup>5)</sup>によると1960年代に二次元レベルではあるがすでに最大揚力係数3.2が実現されている。文献<sup>6)</sup>によれば、航空機業界ではすでに1970年代初頭に実用機においても最大揚力係数3.0を実現したが、その後は経済性および安全性最適の考え方によって最大揚力係数は2.6程度に留まっている。

ここで、航空機の高揚力特性とOEHVにおける高揚力特性の本質的な違いについて考察すると、OEHVにおいては航空機翼と違って揚坑比の高い原翼型への復帰は不要であり、構造上の合理性を保ちながら空力的な最適形状を容易に実現できると考えられる。そのような観点から最大揚力係数3.0は決して無理な設定ではないと思われるが、技術的に高い目標であることには変わりない。

(2)  $AR_{air}$  翼端誘導抵抗の影響を軽減するためにアスペクト比が重要な指標となる。しかしながらOEHVにおいては一般的に言われる構造重量の増大を招くリスクに加え、空力中心点の移動とそれに伴う船体傾斜モーメントの増大という大きなジレンマがあり慎重な対応が求められる。むしろ文献<sup>6)</sup>でも指摘されているデッキあるいは水面の翼端効果を最大限に活かす工夫が求められるところである。

(3)  $\phi$  OEHVは通常の船舶と違って自由に走行コースを選ぶことができるので常に最適角度を保つことが容易である。 $\phi$ が1.4(rad.)から1.5(rad.)付近にあることは最適の $\phi$ を保ちながらタックを繰り返す

ても風下方向への流失を発生することがなくナビゲーション上有利である。ここでは最適走行状態における空中翼と水中翼のトリムの問題、すなわち舵(rudder)に要求される当て舵が最少となるような配慮が重要である。

(4)  $C_{fwater}$  OEHVの常用速度ではレイノルズ数が $6.14 \times 10^9$ でありHoughesの式などに従って摩擦抵抗係数は0.001とした。フルード数は0.3であるが容積的には十分にゆとりがあり(方形係数 $\approx 0.5$ )、船長/船幅比も7.0とスレンダーにすることが出来ることから摩擦抵抗係数は0.001とし造波抵抗成分による増分は10%とした。摩擦抵抗の変化が発電性能に与える影響はかなり大きく船底塗料の選定やメンテナンスが重要な技術課題となる。

表6 水力特性による感度分析

Coef. Var.	Measure.	variation				
		0.8	0.9	Base	1.1	1.2
$C_{fwater}$ (0.001) $\times 1.1$ by wave	P (MW)	115.6	107.4	100	93.4	87.5
	v (m/s)	19.5	19.0	18.6	18.2	17.8
	$\theta$ (degree.)	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7
$C_{Trotor}$ (0.3)	P (MW)	125.7	111.7	100	90.1	81.7
	v (m/s)	20.1	19.3	18.6	18.0	17.4
	$\theta$ (degree.)	3.23	3.05	2.9	2.75	2.63
$(d/l)_{foil}$ (0.033)	P (MW)	102.7	101.3	100	98.7	97.4
	v (m/s)	18.8	18.7	18.6	18.5	18.4
	$\theta$ (degree.)	2.93	2.91	2.9	2.87	2.85

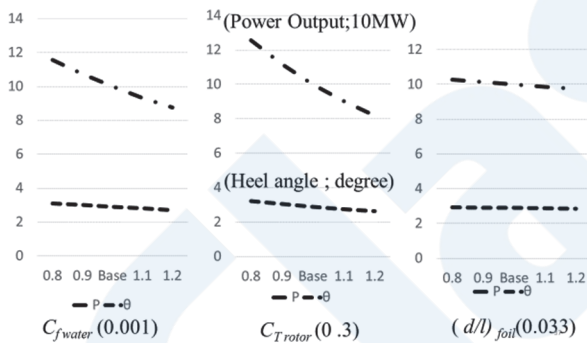


図11 水力特性による感度分析

(5)  $C_{Trotor}$  水中ロータは翼端速度を下げるために運転周速比1.75を採用し、出力係数を0.45、スラスト係数を0.3に設定した。スラスト係数の変化が全体性能に与える影響は今回検討したパラメータの中で最も大きく、船体抵抗よりも水中ロータによる抵抗が大きいことを示唆している。自由流に置かれた発電用水車の研究は潮流発電などで緒に就いたところであり船体との干渉効果も含めてOEHV概念の中核となる。

(6)  $[d/l]_{foil}$  従来の帆船では横滑りによる横力の生成が船体形状そのものや効率の悪いキールなどに委ねられた。帆走理論の確立とともに水中翼の重要

性が認識され近年の競技用帆船ではアスペクト比の大きい水中翼が使用されるようになってきている。図11の感度分析の結果では水中翼の揚坑比による影響は限定的ではあるが大型のフィンについてはこれまでに実績がとばしいことから重要な研究課題となる。

## 5. 発電量推算

### 5.1 走行エリアと走行モード

図12に示すように三陸沖からアリューシャン列島沿いの北東海域には年間を通して北西風が卓越する海域が広がっている。

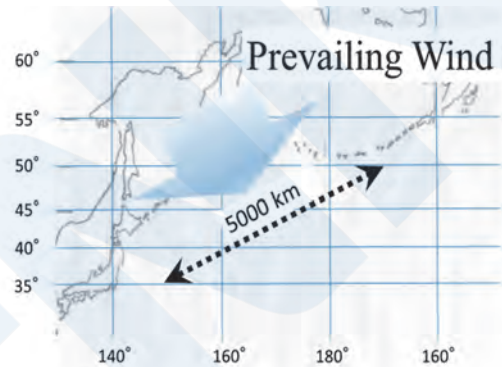


図12 想定走行海域

文献(7)による予測値では、表3で $h$ として示した空力中心高さ(80m~130m)において12m/sないし14m/sとなる風を往路では左舷から、復路では右舷から受けることになり1.4(rad.)から1.6(rad.)のコース角を保ちながら片道3日ほどの行程で強風域を探索しつつ走行することが可能である。

### 5.2 発電量推算

上記に示したコース設定で風速12m/sについては年間4ヶ月、風速14m/sについては年間6ヶ月の利用可能期間を設定した場合の発電量は表4に示した発電出力63MW@12m/sおよび100MW@14m/sによって610GWhとなる。航行に伴う船内での電力消費を15%と設定した場合の有効発電量(水素製造および貯蔵に用いることできる電力量)は約520GWhとなり設備利用率は60%となる。

### 5.3 CO2削減効果

図13に系統電力のCO2排出係数を0.46kg/kWhとしたときの年間CO2削減効果を示す。

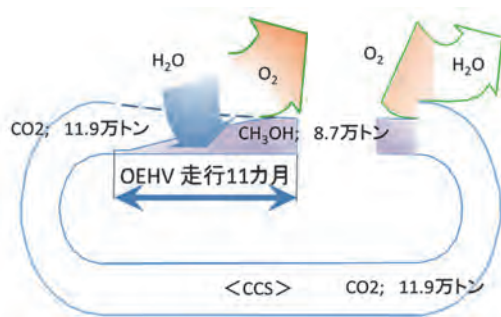


図13 OEHVによる年間CO2排出削減効果

年間有効発電電量520GWhを海水淡水化と水電解に利用し、出港時積載したCCS由来のCO<sub>2</sub>によるメタネーションをおこなうことによって、陸上のパワープラントにCO<sub>2</sub>フリーの燃料を供給する循環システムが形成される。生成されるメタノールは8.7万トン、現時点での発電設備のCO<sub>2</sub>排出係数0.46kg/kWhを基準にした時の年間CO<sub>2</sub>削減量は11.9万トンとなる。

これによってOEHV 1ユニットで我が国の全CO<sub>2</sub>排出量の約1/10000相当を削減することが判る。

#### 5.4 今後の課題

OEHVの概念は航空工学や海洋工学さらに工業化学など既存の成熟した要素技術の組み合わせからなっている。その結果ブレークスルーのための大きな技術課題を抱えているわけではない。しかしながら効率や安全性の追求など今後の着実な発展のために“これまでにはない技術の組み合わせ”に伴うリスク分析などの検証が必要である。また効率的な運営のためのIT技術の応用など巨大システム特有の課題を抱えていることは言うまでもない。

## 6. まとめ

帆走型洋上風力発電システムについてのパラメトリックリサーチを行いその特性を明らかにした。先ず帆走原理を反映した演算ソフトを作成し、全体性能を支配する主要なパラメータについての整理を行った。次に想定した標準船に現時点で最も可能性が高いと思われる帆走システムを装着した3種のケースについての比較検討を行いAIST-Rigと呼ばれるシステムを対象として選定した。AIST-Rigを構成する空中翼、水中翼、船体、水中ロータの特性を段階的に変化させ発電性能やヒール角についての感度分析を行った。その結果空中翼の揚力係数と水中ロータのスラスト係数が全体性能に最も大きな影響を与えることが明らかとなり今後の研究開発戦略に重要な指針を得ることが出来た。

これらの結果を踏まえ、北海道東方からアリュー

シャンにかけての強風海域を走行した場合の発電量推算を行い、年間発電量520GWh、設備利用率60%の見通しを得た。

## 謝辞

近代的な帆走システムについての考察にあたって、株式会社大内海洋コンサルタント大内一之代表、独立行政法人産業技術総合研究所小垣哲也風力エネルギーチームリーダー及び当協会高野裕文常務執行役員／事業開発本部長に多くのご示唆をいただきました。紙面をお借りして感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) CE Delft., Study on the analysis of market potentials and market barriers for wind propulsion technologies for ships/1891 Development of Wind Energy, <http://wind-ship.org/en/research> <http://www.cedelft.eu/publicatie> アクセス2017年7月20日.
- 2) 大内一之, 船舶風力利用「ウィンドチャレンジャー計画」, *Journal of the JIME* Vol. 47, No. 4(2012)
- 3) Dr. J. F. Wellicome., Some comments on the relative Merits of Various Wind Propulsion Devices, [http://windship.org/en/research//cf.d.mace.manchester.ac.uk/twiki/pub/Main/FlettnerRotors/Wellicome\\_JWindEng\\_1985.pdf](http://windship.org/en/research//cf.d.mace.manchester.ac.uk/twiki/pub/Main/FlettnerRotors/Wellicome_JWindEng_1985.pdf) アクセス2017年8月02日.
- 4) Grant E Hearn., Concept Design of a Fast Sail Assisted Feeder Container Ship, <http://wind-ship.org/en/research> [http://eprints.soton.ac.uk/173137/1/Concept\\_Design\\_of\\_a\\_Fast\\_Sail\\_Assisted\\_Feeder\\_Containership.pdf](http://eprints.soton.ac.uk/173137/1/Concept_Design_of_a_Fast_Sail_Assisted_Feeder_Containership.pdf) アクセス2017年8月2日.
- 5) 山名正夫・中口博, 飛行機設計論, 養賢堂, 1版, 1968, p.476.
- 6) 日本航空宇宙工業会 革新航空機技術開発センター, 最適化技術を応用した高揚力装置の設計技術開発, 環境調和型航空機技術に関する調査研究成果報告書 No.2215, 2011, pp.8
- 7) NASDA 日本近海および太平洋の月平均海上風(平均風速) <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA0389>





# IMOの動向

## — IMOでの主な審議内容・結果の紹介 —

国際部

### 1. はじめに

本稿においては、IMO（国際海事機関）における国際条約等の審議動向を紹介する。

今号では、2019年5月13日から17日に開催された第74回海洋環境保護委員会（MEPC 74）及び2019年6月5日から14日に開催された第101回海上安全委員会（MSC 101）の主な審議結果を紹介する。

### 2. MEPC 74の審議結果—海洋環境保護関連—

#### 2.1 温室効果ガス（GHG）関連

国際海運からの温室効果ガス（GHG）排出の抑制対策はIMOにて検討が進められており、現在までにエネルギー効率設計指標（EEDI）、及びエネルギー効率管理計画（SEEMP）による規制が導入されている。

2016年10月に開催されたMEPC 70では、船舶のエネルギー効率改善のための更なる技術的・運航的対策として、燃料油消費実績報告制度（DCS）を導入するためのMARPOL条約 附属書VIの改正が採択された。

また、2018年4月に開催されたMEPC 72では、GHG削減目標とGHG排出削減策の候補を盛り込んだIMO GHG削減戦略が採択され、脱炭素化に向けたGHG削減手法についての検討が行われている。

##### 2.1.1 EEDI規制に関する技術開発状況レビュー

MARPOL条約 附属書VI第21.6規則では、EEDIの改善に寄与する技術の開発動向を定期的にレビューし、要すればフェーズの開始時期、及び削減率を見直すことが規定されており、MEPC 71にてフェーズ3の早期実施やフェーズ4導入の必要性を検討するための通信部会が設置された。

今回の会合では、前回MEPC 73の合意事項と、通信部会からの報告書を基に審議を行った。

##### (1) EEDIフェーズ3規制の見直し

フェーズ3の早期実施や削減率について、下記の合意事項を反映したMARPOL条約 附属書VIの改正案が承認された。この改正案は2020年春に開催されるMEPC 75で採択される予定である。

- コンテナ船の規制適用開始は2025年から2022年に前倒し、削減率は次の通り船のサイズにより定める。

DWT	削減率
10,000以上 15,000未満	15～30% (DWTに応じて線形補間)
15,000以上 40,000未満	30%
40,000以上 80,000未満	35%
80,000以上 120,000未満	40%
120,000以上 200,000未満	45%
200,000以上	50%

- 一般貨物船、LNG運搬船、クルーズ旅客船は適用開始を2025年から2022年に前倒し、削減率は30%を維持する。
- 15,000DWT未満のガス運搬船（LPG運搬船）は2025年の適用開始を維持するが、15,000DWT以上の大型ガス運搬船は適用開始を2025年から2022年に前倒しする。削減率はサイズによらず30%を維持する。
- その他の船種は、現行の規定通り2025年の適用開始を維持し、削減率も30%を維持する。

- (2) 超大型ばら積み貨物船のリファレンスライン  
超大型ばら積み貨物船に対する規制値が極端に厳しくなることが認識されたことから、279,000DWTを超える超大型ばら積み貨物船に対するリファレンスラインを修正するMARPOL条約 附属書VIの改正案が承認された。同改正案は、次回のMEPC 75で採択される予定である。
- (3) 耐氷構造船に対する規制  
IA Super及びIA適用の耐氷構造船に対し、その構造等を考慮した補正係数をEEDI計算式に追加するEEDI計算ガイドラインの改正が採択された。
- (4) EEDIフェーズ4規制の検討

EEDIフェーズ4規制導入の検討を継続するために、通信部会を継続することが合意された。この通信部会では、燃費改善技術の開発・採用実績や船舶の安全性の観点から規制導入の可能性を検討し、2020年春のMEPC 75に中間報告、2020年秋のMEPC 76に最終報告を行う予定である。

## 2.1.2 EEDI規制と最低推進出力規制

荒天下における操船性を維持するため、MEPC 65において暫定の最低推進出力ガイドラインが策定された。さらにMEPC 71では、暫定ガイドラインの適用期間をフェーズ2まで延長することが合意されている。一方、この最低推進出力規制により一定の出力を確保する必要がある反面、フェーズ3規制が強化されることから、フェーズ3への対応がさらに困難になることが懸念されている。

MEPC 73では、EEDI規制と最低推進出力規制の両方を満足するために、通常航海時には機関出力を制限し、非常時（荒天時）は出力制限を解除することを認めるEEDI計算ガイドラインの改正案が提案され、MEPC 74にて継続審議を行うことになった。

MEPC 74では、この出力制限をEEDI認証に導入するために、関連するガイドラインの整備、及びIEE証書書式の改正が提案された。審議の結果、出力制限のコンセプトに対する理解は得られたものの、更なる検討が必要なことから、継続して審議を行うことが合意された。さらに、並行して最低推進出力ガイドラインを最終化するための検討作業を進めることも合意された。

## 2.1.3 IMO GHG削減戦略

2015年に採択されたパリ協定では、世界の平均気温上昇を産業革命以前から2℃以内に抑えるというGHGの排出削減目標が掲げられた。これを受け、MEPC 72では、2030年までの短期削減目標（2008年比でIMO全体での平均炭素密度を最低40%改善）、と2050年までの中期削減目標（2008年比でIMO全体でのGHG排出量を最低50%削減）、及び長期削減目標（IMOでのGHG排出量を今世紀中に中立化）、さらに各目標達成のための削減策の候補を盛り込んだIMO GHG削減戦略が採択された。

今回の会合では、5月7日から10日に開催された中間会合に引き続き、短期的削減策の検討を行い、2023年までの合意を目標として今後も検討を継続することになった。短期的削減策として提案されている主な対策は以下の通り。

- 既存船の燃費性能による規制（Energy Efficiency Existing Ship Index, EEXI）
- 運航時の平均燃費実績による規制

- 運航時の平均速度による規制
- SEEMPを定期検査化し、自主的な燃費改善目標設定を義務化

また、GHG排出量の削減を促進するための港湾開発を奨励するMEPC決議を採択した他、GHG排出削減策の検討を加速させるために、2019年11月及び2020年3月に中間会合を開催することも合意された。

## 2.2 大気汚染防止関連

### 2.2.1 燃料油の硫黄分濃度規制

MARPOL条約 附属書VIの第14規則では、硫黄酸化物（SO<sub>x</sub>）及び粒子状物質（PM）の排出を抑制するために、船舶で使用する燃料油中の硫黄分濃度を段階的に規制しており、一般海域で使用する燃料油中の硫黄分濃度の規制値が2020年から3.5%から0.50%へ強化される。

今回の会合では、硫黄分濃度の0.50%規制に対する統一の実施のためのガイドラインが採択された。このガイドラインでは、適合燃料油の入手、及び使用に関して次の項目を示している。

- 留意すべき燃料油の性状
- 旗国検査及び寄港国検査（PSC）での確認項目
- 適合燃料油を調達できない場合に、旗国及び寄港国主管庁に提出するFONAR（Fuel Oil Non-Availability Report）の作成要領

また、適合燃料油が調達できないなどのやむを得ない事情により非適合燃料油を搭載してしまった場合について、船舶、旗国、及び沿岸国がとるべき対応を示すガイダンスが承認されている。このガイダンスでは、非適合油を補油して航行した船舶の次港の寄港国主管庁に対し、環境、安全、運航上の影響を考慮した上で、残留非適合燃料油を陸揚げする、又はそのまま船上に保持することを検討することが求められている。また、旗国、寄港国主管庁及び船舶に対し、協力して最も適切な対応策を取ることが要請されている。

### 2.2.2 船上で使用する燃料油のサンプリング分析

SO<sub>x</sub>排出規制海域（ECA）における2015年からの硫黄分規制強化を受け、寄港国検査（PSC）等にて船上で燃料油のサンプリングを実施する場合があるため、MEPC 70では燃料油の船上サンプリングに関するガイドラインを作成した。

今回の会合では、既存船を含む全船を対象に、使用中の燃料油のサンプル採取位置の指定を義務付けるMARPOL条約 附属書VI 第14規則の改正案を承認した。さらに、燃料油サンプル検証手順を規定す

る同条約 付録VIについて、使用している燃料油中の硫黄分を確認する手順を加えるための改正案も承認した。これらは、次回のMEPC 75で採択される予定であるが、改正案の早期適用を推奨するサーキュラーが発行されている。また、燃料油の船上サンプリングに関するガイドラインについても、サンプリング位置の指定に関する改正が承認された。

### 2.2.3 排ガス浄化装置 (EGCS) からの排水

MARPOL条約 附属書VIの第14規則に規定する燃料油中の硫黄分濃度規制については、第4規則により同等の実効性を持つ排ガス浄化装置 (EGCS) 等の使用に替えることが出来ると規定されている。EGCSの搭載により硫黄分濃度の規制値を満足しない燃料油を使用する場合には、EGCSガイドライン (決議MEPC.259(68)) の要件に基づき主管庁の承認を受ける必要がある。

EGCS洗浄水の排水についてはEGCSガイドラインに規定される排出基準を満たすことで船外排出が可能となるが、EGCSからの排水による海洋環境への悪影響を懸念する港湾では、EGCSガイドラインへの適合に係わらずEGCSの使用を制限する動きがある。

今回の会合では、EGCSからの排水による海洋環境への影響調査を行うべきとの新規作業が提案され、統一的規制の制定を見据えた影響調査の作業計画が承認された。この作業は2020年2月に開催される汚染防止・対応小委員会 (PPR小委員会) から審議を開始する。

### 2.2.4 排ガス浄化装置 (EGCS) 故障時の取扱い

2020年のSO<sub>x</sub>規制強化に向けて排ガス浄化装置 (EGCS) の採用が進んでいるなか、装置が故障した場合のガイダンス作成が急務となっていた。

今回の会合では、単一の監視装置の故障時及びEGCSの故障時に取るべき行動等を纏めたガイダンスが採択された。このガイダンスではシステムの応答性に起因する排出規制値の一時的な超過は違反とは見做さないとしたうえで、システムの誤作動が1時間以内に復旧できない場合は故障と判断し、旗国及び寄港国主管庁に報告するよう規定している。また、単一の監視装置の故障時には、その他の関連データの記録が正常な値であることを以って適合を示す際の取扱いが示されている。

### 2.3 バラスト水管理条約関連

前回MEPC 73までの審議では、バラスト水処理装置の搭載について、搭載試験時に処理済のバラスト水の分析を行うことで装置の動作確認を行うべきとの方針が合意されている。その一方で、搭載試験

時にバラスト水の分析を実施する根拠となる条約要件が存在しておらず、分析実施の要否についての取扱いが不明確な状況となっていた。

今回の会合では、バラスト水処理装置の搭載試験時にバラスト水の分析を行うことを義務付けるためのバラスト水管理条約の改正案が承認された。本改正案は次回のMEPC 75で採択される予定である。

### 2.4 その他の議題

#### 2.4.1 電子記録簿の利用

MARPOL条約では、同条約 附属書Iに規定される油記録簿等、船舶にて使用/発生する汚染物質を記録簿を備えて管理することを要求している。昨今、管理維持の利便性の観点から記録簿の電子化が進んでおり、電子記録簿の利用基準の検討が進められていた。

今回の会合では、電子記録簿の利用に関するガイドライン、並びに電子記録簿を利用できる旨のMARPOL条約及びNO<sub>x</sub>テクニカルコードの改正が採択された。条約改正が発効する2020年10月1日以降、紙媒体による記録簿の代わりに電子記録簿を使用する場合、同ガイドラインに従って承認を受けた電子記録簿とする必要がある。

#### 2.4.2 海洋プラスチック廃棄物

近年問題となっているプラスチックごみの海洋投棄については、2013年に発効したMARPOL条約 附属書Vの改正により、全ての船舶からのプラスチックごみの排出が禁止されている。しかしながら、国連の調査によれば、未だ船舶に由来するプラスチックごみの排出が継続していることが報告されている。この問題に対し、船舶から排出される海洋プラスチックごみの発生原因や発生状況を把握するために、海洋プラスチックゴミに関する調査を実施することが合意されている。

今回の会合では、調査対象・調査方法等を作成すると共に、漁具の偶発流出時の報告要件やコンテナ流出時の報告義務化等について、関連の小委員会で審議を行うことが合意された。

#### 2.4.3 AFS条約の改正

2008年に発効した船舶の有害な防汚方法の規制に関する国際条約 (AFS条約) では、船底塗料として有機スズ化合物を使用することが禁止されている。近年、新たに有害性が確認されたシブトリンを禁止物質に加えるよう欧州諸国からの提案があり禁止物質として扱うかが議論されていた。

今回の会合では、シブトリンを禁止物質に加える同条約の改正案を検討し、既存船に塗布されているシブトリンを含む船底塗料の除去の必要性について、2020年2月に開催される汚染防止・対応小委員会

(PPR小委員会)で継続して審議を行うことが合意された。

#### 2.4.4 汚水処理装置に関するガイドライン

汚水による汚染防止を規定するMARPOL条約 附属書IVでは、船舶に汚水処理装置を搭載することが規定されており、汚水処理装置は排水基準及び性能試験等に関するガイドライン(決議MEPC.227(64))に従って承認を受けたものを使用し汚水を排出する事になる。しかしながら、適切な処理がされずに船舶から汚水が排出されているとの調査報告を鑑み、汚水排出に関する要件を強化すべきとの提案がなされていた。

今回の会合では、汚水処理装置に対する技術要件、及び検査要件を見直すための新規作業計画が合意された。2020年2月に開催される汚染防止・対応小委員会(PPR小委員会)から審議が開始される。

#### 2.5 採択された強制要件

MEPC 74で採択された強制要件は以下の通り。

##### (1) 耐氷構造船に対するEEDI規制適用

Polar CodeのA類に該当する(いわゆるIA Superを超える)耐氷構造船をEEDI規制からの適用を除外するMARPOL条約 附属書VIの改正が採択された。

発効日：2020年10月1日

##### (2) MARPOL条約 附属書II及びIBC/BCH Codeの改正

残留性浮遊物質の排出/予備洗浄に関する規定が、MARPOL条約 附属書IIに追加された。また硫化水素検知器の設置要求や、最低要件一覧の改正を含む、IBC Code、及びBCH Codeの改正が採択されている。

発効日：2021年1月1日

##### (3) 電子記録簿

電子記録簿の利用に関するガイドラインを適用するためのMARPOL条約、及びNO<sub>x</sub>テクニカルコードの改正が採択された。

発効日：2020年10月1日

##### (4) SCRを備えるディーゼル機関のNO<sub>x</sub>認証

SCRを備えるディーゼル機関に対するNO<sub>x</sub>認証は、SCRとディーゼル機関を組み合わせた状態でNO<sub>x</sub>計測試験を実施するスキームA、またはディーゼル機関単独でのNO<sub>x</sub>計測試験とSCRの脱硝率計測試験を別個に実施するスキームBのいずれかの手順に基づき実施される。現行のNO<sub>x</sub>テクニカルコードでは、組み合わせた状態での試験(スキームA)が適切でないと主管庁が認める場合にスキームBが適用可能と規定されている。

今回の会合では、スキームB適用に対する主管庁承認を不要とし、スキームAとスキームBに同等に適用可能とするためのNO<sub>x</sub>テクニカルコードの改正が採択された。この改正により、申請者が認証スキームを任意に選択できるようになる。

これに加え、同改正を反映するためのSCR認証ガイドライン(決議MEPC.291(71))の改正も採択されている。

発効日：2020年10月1日

### 3. MSC 101の審議結果—海上安全関連—

#### 3.1 採択された条約及び関連コードの主要な改正

MSC 101で採択された主要な義務要件は以下の通り。

##### (1) SOLAS証書のForms C, E及びPの改正

貨物船及び旅客船に対する安全証書の設備の記録(Form C, P)及び貨物船に対する安全設備証書の設備の記録(Form E)の様式の中の「航海設備の詳細 8.1項 舵角, プロペラ回転数, 推力, ピッチ及び操作モード表示器」に関し、搭載されていない設備の表記を統一するための改正。

発効日：2024年1月1日

##### (2) FSSコードの改正

イナートガス装置の設計に対する要件に関し、“forward of”の表記が誤解を招く恐れがあるため、“downstream of”の表記に修正するFSSコード15章の改正。

発効日：2024年1月1日

##### (3) IGFコードの改正

燃料タンクの配置(IGFコード5.3.4.2)、液化ガス燃料タンクの充填制限値(同コード6.8.3)、燃料管(同コード9.5.3~9.5.6)、ピストン形内燃機関(同コード10.3.1.1.1)及び燃料が貯蔵されているホールドスペースの防火(同コード11.3.3, 11.3.3.1)に関する改正。

発効日：2024年1月1日

##### (4) LSAコードの改正

下記2件のLSAコードの改正を採択した。

- 2つの独立した推進装置を持つ救命艇においてオール等の艀装品が省略できる旨の同コード4.4.8.1の改正
- 貨物船に搭載される生存艇として使用しない救助艇において、艀装品等を満載した状態で重量が700kgを超えない場合には、所

定の条件下で蓄積機械力に代えて一人の人力による積み付け位置からの吊り上げ及び乗艇場所への振出しによる進水を認める同コード6.1.1.3の改正

発効日：2024年1月1日

#### (5) IBCコードの改正

有害液体物質の運送要件見直し等のためのIBCコード15章（特定の貨物に対する特別要件）、16章（作業に関する規定）、17章（最低要件）、18章（本コードの適用を受けない化学品）、19章（運送貨物インデックス）及び21章（本コードに従って貨物を運送する際の要件）等の改正。

発効日：2021年1月1日

#### (6) 2011 ESPコードの改正

IACSの統一規則（UR）Z10シリーズとの整合や強制適用される要件の表記変更等のための2011 ESPコードの改正。

発効日：2021年1月1日

#### (7) IMSBCコードの改正

新規貨物の追加を含む、IMSBCコードの第5回改正。

発効日：2021年1月1日（ただし、主管庁判断により2020年1月1日からの早期適用が可能）

### 3.2 承認された条約及び関連コードの主要な改正

MSC 101で承認された以下の改正案は、2020年5月に開催されるMSC 102にて採択される見込みである。

#### (1) 係船設備に関するSOLAS条約II-1/3-8の改正

下記3.3.2.(1)の安全な係船設備の設計及び装置の選定に関する新ガイドライン、係船索を含む係船設備の点検及び保守に関する新ガイドラインが原則承認されたため、これらを適用する旨を規定するSOLAS条約II-1/3-8の改正案。

#### (2) 水密性に関する要件整合のためのSOLAS条約II-1/B-1～B-4部の改正

SOLAS条約II-1/B-1～B-4部において、水密性に関する要件を整合するための改正案。

#### (3) IGFコードの改正

下記3件のIGFコードの改正案。

- 6.7.1.1において、タンクコファダムを圧力逃し装置の要求対象区画から削除
- 燃料調整室に対し固定式消火装置を要求するための、11.8の新規追加
- アルミニウム合金材以外の溶接母材の引張試験に関する16.3.3.5.1の修正

#### (4) IGCコードの改正

上記3.2.(3)3に記載のIGFコードの改正に合わせた、アルミニウム合金材以外の溶接母材の引張試験に関するIGCコード6.5.3.5.1の改正案。

### 3.3 各種ガイドラインの承認等

MSC 101において承認された主な統一解釈及びガイドラインのうち、主要なものは以下のとおり。

#### 3.3.1 統一解釈

##### (1) ro-ro及び車両区域の通風筒の開口を考慮する要件に関する統一解釈の改正

LL条約、2008 ISコード及びSOLAS条約で要求される各種計算において、閉塞されたro-ro及び車両区域の通風筒の開口を考慮する要件を追加するための解釈（MSC.1/Circ.1535, MSC.1/Circ.1537, MSC.1/Circ.1539）の改正。

##### (2) 2008 ISコードの統一解釈

2008 ISコードB部3.4.2.3において、熱帯満載喫水線を有するタンカーの非損傷時復原性計算のための積み付け条件を明確にするための解釈。

##### (3) 旅客船の液位監視装置に関する統一解釈

旅客船の浸水警報装置の代替としてタンクに液位監視装置を備える場合も、浸水警報装置と同様にSOLAS条約II-2章21.4.13にある安全な帰港（Safe Return to Port, SRtP）の要件に適合しなければならない旨の解釈。

##### (4) SOLAS条約II-2章の統一解釈

以下3点のSOLAS条約II-2章関連の統一解釈。

- EGCS等に供される尿素又は水酸化ナトリウム溶液タンクが独立した区画に設置される場合の防熱保全性を明確にするための9.2の解釈
- 9.7.5において、調理室の排気ダクトに固定式ガス消火装置を用いる場合の要件を明確にする解釈
- 消防員用の持ち運び式双方向無線電話装置の耐圧防爆型や本質安全防爆型の詳細を定めた10.10.4の解釈

##### (5) SOLAS条約III章の統一解釈

以下2点のSOLAS条約III章関連の統一解釈。

- 少なくとも5年に1回実施する救命艇、救助艇やその進水装置及び離脱装置の開放検査や効力試験に検査員の立ち合いが必要であることを明確にするための20.11の解釈（関連IACS UI SC144）
- II-1章/3-9で要求される灯火及び救命索を備える救命浮環を、III章/22.1.1及びIII章/32.1.1で要求される救命浮環の最小数に含むことができない旨を明確にする解釈

## (6) IGCコードの統一解釈

SSE小委員会で作成された、以下2点のIGCコード関連の統一解釈。

- 11.3.6で要求される、貨物エリアにおける水噴霧消火装置の管、弁、ノズルその他の取り付け物に対する耐熱要件の適用について、対象となる貨物エリアを明確化するための解釈
- 11.4.8で要求されるドライケミカル粉末消火装置設置後の放出試験の手順を明確にするための解釈

CCC小委員会で作成された、以下4点のIGCコード関連の統一解釈。

- 船体構造を保護するヒーティング設備の冗長性の要件について、原則、加熱装置等の二重化が必要であることを明確化した4.19.1.6の解釈（関連IACS UI GC23）
- 耐圧部の健全性等に寄与しない緊急遮断弁の材料は、耐熱要件の対象に含まないことを明確化した5.13.1.1.4の解釈（関連IACS UI GC24）
- 船首部、船尾部に設置される追加の救命いかだであっても、貨物エリアに面している場合は水噴霧装置により保護することを明確化した11.3.1の解釈（関連IACS UI GC22）
- 水噴霧ポンプの容量決定において保護が要求されるタンク群について、「船の横方向の2つの組み合わせ」を明確化する11.3.3の解釈（関連IACS UI GC22）

## (7) SOLAS条約 II-1/28, II-1/29及びII-1/30の統一解釈

アジマススラスト等の最新の複合的な推進・操舵システムを考慮した、推進・操舵関連のII-1/28, 29及び30の解釈（関連IACS UI SC242）。

## (8) IGFコードの統一解釈

以下4点のIGFコード関連の統一解釈。

- 燃料タンク等の接続部からの漏洩に対して鋼材を保護するためのドリフトレイ設置の可否を明確にするための6.3.10の解釈（関連IACS UI GF2）
- 二元燃料機関及びガス機関の吸気弁についてリスク評価を実施すれば12.5に例示された危険場所の代替として分類できる旨の12.4及び12.5の解釈
- 燃料貯蔵ホールドスペースに対する危険場所の分類を明確化する12.5.2.1の解釈（関連IACS UI GF14）

- 通風システムの可視可聴警報装置について、必要な要件を明確化する15.10.1の解釈（関連IACS UI GF15）

## 3.3.2 ガイドライン、ガイダンス及びその他サーキュラー

## (1) 係船設備に関する2件の新規ガイドライン及び1件のガイダンスの改正

係船設備に関し以下2件の新規ガイドライン及び改正ガイダンスが原則承認された。これらガイドラインは上記3.2.(1)のSOLAS条約改正案に合わせて正式に承認され、2024年1月1日に発効する見込みである。

- 安全な係船設備の設計及び装置の選定に関する新規ガイドライン
- 係船索を含む係船設備の点検及び保守に関する新規ガイドライン
- 曳航設備及び係留設備のガイダンス（MSC.1/Circ.1175）の改正

## (2) SOLAS条約 II-1章及びIII章の代替設計・配置に関するガイドライン

SOLAS条約III章の目標、機能要件、期待性能を追加するための、SOLAS条約 II-1章及びIII章の代替設計・配置に関するガイドライン（MSC.1/Circ.1212）の改正。

## (3) 救命艇のシステムの操作及び保守マニュアル作成のガイドラインの改正

脱出経路の標識及び防火設備の位置の表示に関する総会決議A.1116(30)を参照するための、救命艇のシステムの操作及び保守マニュアル作成のガイドライン（MSC.1/Circ.1205）の改正。

## (4) 総会決議A.658(16)の改正

LSAコード1.2.2.7で参照されている総会決議A.658(16)において、再帰反射材の促進耐候試験に関して、カーボンアーク式以外の試験機の使用も認めるための決議改正案。本改正案は、2019年11月開催の第31回総会（A31）で採択される見込みである。

## (5) 改正IGCコード19章の貨物運送に関するMSCサーキュラー

1986年7月1日以降で2016年7月1日より前に建造された船舶が、改正IGCコード（決議MSC.370(93)）19章の貨物リスト上の貨物を運送できるようにするためにIGC証書の付録を例示するためのMSCサーキュラー。

## (6) 固定式ガス消火装置の免除対象貨物の更新

上記3.1.(7)のIMSBCコード改正に関連し、固定式ガス消火装置の免除対象貨物を更新するためのMSC.1/Circ.1395/Rev.3の改正。

- (7) 極海域を航行する船舶の航行及び通信機器に関するガイダンス

Module A（極海域の環境条件を考慮した一般事項）及びModule B（特定の通信機器に対する事項）の2部で構成された、極海域を航行する船舶の航行及び通信機器に関するガイダンス。

- (8) 極海域を航行する船舶の救命設備に関する暫定ガイドライン

個人用救命設備，生存艇等に対する追加の基準等が規定された，極海域を航行する船舶の救命設備に関する暫定ガイドライン。

### 3.4 その他

#### 3.4.1 自動運航船に対する規則の検討

船舶の自動化に関する研究が進んでいる中で，MSCでは自動運航船に適用すべき条約要件について検討を行っている。

今回の審議では，前回会合で決定した自動運航船に関わるIMOの諸規制の論点整理（Regulatory Scoping Exercise，以下RSE）の実施方法に従い，各条約や章ごとに実施されているRSEの第一段階（検討すべき要件の洗い出し）の作業の進捗状況が報告された。RSEの作業結果については，最終的に2020年5月に開催されるMSC 102で検討される予定である。また，自動運航船を開発する際のトライアルに関する暫定ガイドラインが承認されている。本ガイドラインでは，自動運航船関連のシステムやインフラの試験的な運用の際に考慮すべき基本方針が示されている。

#### 3.4.2 燃料油の使用における安全性強化の検討

2020年1月1日から適用が開始となる燃料油硫黄分0.50%規制をきっかけとして，MSCでは懸念される燃料油の安全上の問題を検討している。

今回の審議では，暫定的な対策として，引火点60度未満の燃料油が船舶に供給された事例などを，旗国政府がIMOに報告することを要請するMSC決議が採択された。また，2021年に開催されるMSC 104での最終化を目標に，燃料油の使用における船舶の安全性強化の手法を開発していくための実行計画が合意された。今後は本実行計画に従い，関連の強制要件作成（SOLAS条約II-2章の改正等）について検討していくこととなる。





---

## ClassNK 技報

No.1(2019年(Ⅰ)発行)

編集: 松本俊之

発行: 一般財団法人 日本海事協会 技術研究所  
〒102-0094 東京都千代田区紀尾井町3番3号

TEL: 03-5226-2737

E-mail: [ri@classnk.or.jp](mailto:ri@classnk.or.jp)

印刷: 大日本印刷株式会社  
〒162-8001 東京都新宿区市谷加賀町1丁目1番1号  
03-3266-2111

---

本誌に掲載された全ての記事内容は、一般財団法人 日本海事協会の許可なく転載・複写することはできません。  
記事の転載をご希望の方は、上記までご連絡ください。





一般財団法人 日本海事協会  
技術研究所

〒102-0094 東京都千代田区紀尾井町3番3号  
Tel : 03-5226-2737  
Fax : 03-5226-2736  
E-mail : ri@classnk.or.jp

[www.classnk.or.jp](http://www.classnk.or.jp)