

ClassNK 技報

No.8 2023年 (II)

特集記事：
GHG 削減に向けた
最新動向と取組み



—目 次—

巻頭言	執行役員 技術研究所長 藤浪 幸仁.....	1
-----------	------------------------	---

特集記事 「GHG削減に向けた最新動向と取組み」

国際海運からのGHG排出削減に関する最新動向

.....企画本部 ゼロエミトランジションセンター, 技術本部 GHG部.....	3
---	---

国際海事機関（IMO）では、2023年7月に開催された第80回海洋環境保護委員会（MEPC 80）において2050年頃までのGHG排出ネットゼロ目標などを盛り込んだ2023 IMO GHG削減戦略が採択された。他方、欧州連合（EU）では炭素課金制度であるEU排出量取引制度（EU-ETS）や船舶燃料の脱炭素化を促進するためのFuelEU Maritime規制の導入が決定している。本稿では、これらのGHG関連規制の概要や最新の動向等について紹介する。

メタノール燃料船の構造及び設備に関する安全要件について	技術本部 技術部.....	11
-----------------------------------	---------------	----

昨今、環境規制が強化される中、代替燃料としてメタノールを使用する船舶の設計・建造が進んでいる。本会はメタノールを燃料として使用する船舶の安全性を確保するために求められる要件を「代替燃料船ガイドライン」A部に取りまとめた。本稿では、本ガイドラインの概要及びメタノール燃料船の設計時の注意点について解説する。

風力補助推進システムに関するEEDI/EEXI認証	技術研究所.....	17
---------------------------------	------------	----

IMOのGHG削減戦略が見直され、新たに「遅くとも2050年頃までにGHGネットゼロ排出を目指す」という野心的な目標が掲げられたため、これを達成するための要素技術の一つとして、風力を補助推進として利用する技術に改めて注目が集まっている。本稿では、風力補助推進システム（Wind Assisted Propulsion System）のEEDI/EEXIへの反映方法や認証方法について、EEDI/EEXI規制の概要をはじめ、IMO関連ガイダンスの開発経緯、航路影響、インセンティブ付与及び今後の課題を交えながら、詳しく解説する。

GHG検証 サプライチェーン排出量（スコープ1, 2, 3）入門

.....事業開発本部 認証部.....	25
----------------------	----

GHGプロトコルでは、温室効果ガス（GHG）の排出源により、スコープ1, 2, 3に区分し、これらの合計を「サプライチェーン全体のGHG排出量」としている。GHGプロトコルの概要と、GHG排出量の算定方法の概略を説明し、さらには企業、組織におけるサプライチェーンにおけるGHG排出量を算定報告することの意義について述べる。

技術一般

安全関連システムのRAMSによる管理の考え方とその適用

……………独立行政法人自動車技術総合機構 交通安全環境研究所 吉永 純………… 33

IT技術の発展による安全関連システムの高機能化は、安全性検証を困難とし、近年では、機能安全による製品開発手法への転換が進んでいる。機能安全ではリスクの軽重の決定、対策の取捨選択など、従来のトラブルゼロを目指す考え方とは一線を画している。これら特徴的な点について、鉄道分野の機能安全規格「RAMS」を例に、メーカーやユーザーの行う管理手法の考え方、コスト等の安全性以外の要素とのバランスに関する適用例を示す。

次世代の通信インフラ …………… 技術研究所………… 43

世界的なデジタル化の流れとともに、海事業界を取り巻く環境に対しても、改革の波が押し寄せている。ただし、デジタル化を推し進めていくためには海上であっても通信インフラなしの改革は難しい。そこで本稿では、通信インフラというものを基本的な事項から整理した上で、デジタル通信ネットワークに関わる最新の技術的動向について解説する。

船舶の衝突に係る研究開発 …………… 技術研究所………… 51

水素やアンモニア等の新燃料を搭載した新型船の検討・実用化には、タンクや船体構造の耐衝突性能評価が重要となる。適切な耐衝突性能評価ができれば、燃料の漏洩リスクを考慮しつつ、タンクの柔軟な配置やより合理的な船体構造設計が可能となる。一方で、船舶の衝突では、衝突船と被衝突船の船体運動によって船体の損傷規模が変化するため、その運動に伴う流体力影響評価が重要となる。そこで本稿では、被衝突船の流体力影響を適切に評価可能な等価付加質量係数に係る検討について紹介する。

IMOの動向 …………… 開発本部 国際部………… 59

本稿では、国際海事機関（IMO）における国際条約等の審議動向を紹介する。今号では、第80回海洋環境保護委員会（MEPC 80）及び第107回海上安全委員会（MSC 107）の審議概要を紹介する。

巻頭言

特集「GHG削減に向けた最新動向と取組み」発刊によせて

執行役員 技術研究所長 藤浪 幸仁

ClassNK技報No.8の発行に際して、一言ご挨拶申し上げます。

技術広報誌「ClassNK技報」は、本会の技術活動や研究成果などの公表により、海事産業などへの技術的貢献を図ることを目的に発行しています。前号（ClassNK技報No.7）では、大型化が進むコンテナ船に係る構造設計・評価を安全かつ合理的に行うことを可能とした規則改正、並びにコンテナ船のオペレーションに係る支援サービスにフォーカスした技術動向や最新の研究開発成果等を報告いたしました。

本年7月開催のIMO MEPC 80（国際海事機構 海洋環境保護委員会）において、GHG削減戦略が新たに2023年改定戦略として採択されました。2018年初期戦略では船上排出(Tank-to-Wake)を対象としていましたが、改定戦略ではライフサイクル全体での排出(Well-to-Wake)へ変更されています。また、削減目標レベルも2050年までに最低50%削減だったものが、2050年頃までにネットゼロ排出へと変更され、これまで以上の野心的な目標達成に向けて国際的な規制強化が進められています。本会は、GHG削減技術の開発を支援すると共に、皆様方に関連する最新情報を迅速に提供すべく各種セミナーを開催しております。

本技報No.8では、「GHG削減に向けた最新動向と取組み」と題する特集を組み、GHG排出削減に関する国際的な規制の動向および排出削減を実現するための技術並びに認証手法等の取組みをご紹介します。さらに、種々の研究開発成果や本会の技術活動、IMOの動向等に係る多彩な記事・論文を掲載しています。

本会は今後も社会や業界のニーズを踏まえて、海上における人命と財産の安全確保、海洋環境の保全および社会を先導するイノベーションの創出に資する研究開発に鋭意取組み、海事産業の更なる発展への貢献に努めてまいります。

今後とも皆様のご理解とご支援をお願い申し上げます。

国際海運からのGHG排出削減に関する最新動向

企画本部 ゼロエミトランジションセンター、技術本部 GHG部

1. はじめに

世界全体のGHG排出削減については、2015年に採択されたパリ協定によって世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて少なくとも2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をすることが世界共通の目標として掲げられている。

国際海運からのGHG抑制対策については国際海事機関（IMO）にて検討が進められており、2013年以降、IMOではエネルギー効率設計指標（EEDI/EEEXI）による規制、船舶エネルギー効率管理計画書（SEEMP）の所持及びCII燃費実績格付け制度が導入されている。また、2023年にはIMOのGHG削減戦略の見直しが行われ、2018年に合意された初期戦略よりも厳しい目標が設定された。IMOではこの新しい目標を達成するための規制導入に向けて検討が進められる。

一方、欧州連合（EU）では、GHG排出量の2050年ネットゼロの達成を目指して、炭素課金制度である「EU排出量取引制度（EU-ETS）」の海運セクターへの拡大や、船舶で使用する燃料の脱炭素化を促進するための「FuelEU Maritime」というEU独自の制度の導入が決定している。

そのほか、海上輸送ビジネスにおいては民間主導の動きもあり、これらの規制や制度とともにGHG排出削減に向けた取組みが今後加速していくことが見込まれる。

本稿では、IMO及びEUにおけるGHG排出削減のための規制や制度の概要、最新の動向等について紹介する。

2. IMOにおける最新動向

2.1 GHG排出削減戦略の改定

IMOにおける国際海運からのGHG削減戦略については、2018年に開催された第72回海洋環境保護委員会（MEPC 72）において、2018年IMO GHG削減戦略（初期戦略）が採択され、国際海運からのGHG排出削減に関するビジョンや目標レベルが掲げられた。この削減戦略は5年ごとに見直しが行われることが合意されており、その後、2023年7月に開催されたMEPC 80において2023年IMO GHG削

減戦略（改定戦略）が採択され、以下のとおり削減目標が強化された（表1）。

- 船舶燃料に関し、初期戦略ではTank-to-Wake（TtW）ベース、すなわち船上から排出されるGHGだけに焦点が当てられていたが、改定戦略ではWell-to-Wake（WtW）ベース、すなわち燃料の製造、輸送、貯蔵、船上使用におけるライフサイクル全体を通じて排出されるGHGを考慮すべきであることが盛り込まれた。
- 国際海運が目指す最終的な目標（ビジョン）に関しては、初期戦略では「今世紀中できる限り早期にGHG排出ゼロ」とするものであったが、改定戦略では「今世紀中」が削除され、「できる限り早期にGHG排出ゼロ」に変更された。
- GHGの総排出量に関する具体的な数値目標として、初期戦略においては年間のGHG総排出量を「2008年比で2050年までに最低50%削減」とする目標であったが、改定戦略では「2050年頃までにネット排出ゼロ」とする目標に改められた。さらに、改訂戦略ではこの目標を達成するための目安（チェックポイント）として、2030年までに2008年比でGHG総排出量を最低20%削減して30%削減を目指すこと、また、2040年までに最低70%削減して80%削減を目指すことが盛り込まれた。
- 輸送効率、すなわち単位輸送ごとのCO₂排出量に関しては、初期戦略では2008年比で「2030年までに最低40%改善」及び「2050年までに最低70%改善」が目標として掲げられていたが、改定戦略においては2030年の目標、すなわち「2030年までに最低40%改善」のみが維持された。
- 改定戦略では、新たに国際海運で使用する総エネルギー使用量に関する目標として、2030年までにGHG排出ゼロまたは排出ゼロに近い技術、燃料、エネルギー源を最低5%導入して10%の導入を目指すことが掲げられた。

今後、IMOでは改定戦略で掲げるこれらの目標の実現に向けて、各種対策を検討し実施することになる。

表1 2023年IMO GHG削減目標

	2018年初期戦略	2023年改定戦略
対象となる排出	船上排出 (Tank-to-Wake)	ライフサイクル排出 (Well-to-Wake) を考慮
削減目標 (2008年比)	2050年までに最低50%削減 今世紀中のできる限り早期にゼロ排出	2050年頃までにネット排出ゼロ できる限り早期にゼロ排出 【中間目安】 2030年：最低20%削減、30%削減を目指す 2040年：最低70%削減、80%削減を目指す
輸送効率目標 (2008年比)	2030年：最低40%改善 2050年：最低70%改善	2030年：最低40%改善 (*1)
排出ゼロ技術・燃料・エネルギー導入目標	---	2030年：最低5%導入、10%導入を目指す (*2)

(*1) 指標は単位輸送量当たりのCO₂排出量 (Tank-to-Wakeベース)

(*2) 消費エネルギーベース

主要な変更点

- ✓ 2050年頃までにGHGネット排出ゼロを目指す
- ✓ 船上排出のみならず、燃料の生産・輸送・貯蔵を含めたライフサイクルでの排出を考慮する
- ✓ GHG総排出量で進捗を管理、排出ゼロ技術・燃料・エネルギーの導入目標も採用

なお、本会では、2023年 IMO GHG削減戦略に関し、改訂戦略にて求められる行動を数値で視覚化し、関係者間の幅広い議論の喚起や脱炭素化の実現に向けた取組みの加速に貢献するため、ゼロエミ燃料の導入目標やGHG削減目安の達成に必要な総GHG排出量、ゼロエミ燃料の導入規模、ゼロエミ燃料船の導入規模について、IMO-DCSの対象となる国際航海に従事する総トン数5,000トン以上の船舶を対象に試算を行い、White Paperとしてまとめた (図1)。White Paperについては本会のホームページから入手できる。今後も関係者との対話を通じて継続的に内容を更新していく予定である。



図1 本会発行のWhite Paper

2.2 船舶燃料のライフサイクルGHG強度に関するガイドライン

IMOでは、船舶の脱炭素化に向けて今後普及が見込まれる水素、アンモニア、バイオマスなどを原料とした低炭素/ゼロ炭素燃料について、燃料のライフサイクル全体での排出を考慮すべきであること

が認識されている (図2)。また、メタン (CH₄) や亜酸化窒素 (N₂O) といった二酸化炭素 (CO₂) 以外のGHGについても地球温暖化に与える影響が大きいことから、IMOでは船舶で使用される燃料の製造、流通及び船上での使用を通じたライフサイクルにおけるGHG排出強度 (単位エネルギー当たりのGHG排出量) を総合的に評価するためのガイドラインの策定作業が進められ、MEPC 80にて「船舶燃料のライフサイクルGHG強度に関するガイドライン (LCAガイドライン)」(決議MEPC.376 (80)) が採択された。

本ガイドラインは船舶燃料のライフサイクルGHG強度に関する全般的な枠組みを示すものであり、今後、燃料のライフサイクルでのGHG排出を評価する際には当該ガイドラインに定める計算方法や手順等に従うことが必要となる。このガイドラインには以下の内容が含まれている。

- CO₂、メタン (CH₄) 及び亜酸化窒素 (N₂O) を含むGHG排出強度の計算方法
- 燃料ごとの特性に関する情報を示した燃料ライフサイクルラベルの統一様式
- 各燃料の代表的なGHG排出強度の値 (デフォルト値) の指定方法
- 第三者による認証

一方、本ガイドラインでは、例えばバイオマスを原料とした燃料の製造に伴う土地利用変化 (森林から農作地へ変化など) による排出分の計上や認証方法などに関する要件の明確化、GHG排出強度のデフォルト値の指定 (現行ではHFOなど5種類のみが指定)、第三者認証に関するガイダンスの開発など、さらなる検討が必要とされ、今後、専門家ワークショップなどを通じて同ガイドラインの実用化に向けた作業が進められていくこととなっている。

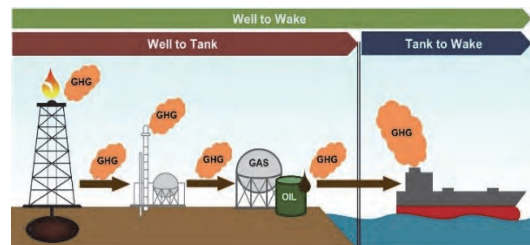


図2 燃料のライフサイクル全体 (WtW) でのGHG排出

2.3 GHG削減に向けた中期対策

MEPC 80では、改定戦略におけるGHG削減目標を達成するための対策に関し、今後どのように検討を行っていくかについて審議が行われた。その結果、GHG排出削減のための中期対策として、燃料のGHG強度を段階的に低減する制度をベースとした

「規制的手法」と、燃料への課金制度をベースとした「経済的手法」の両方の対策から構成される制度の候補について、各国に与える影響の評価（包括的影響評価）を行い、その結果等を考慮して制度案を具体化していくことが合意された（表2）。

また、今後の策定スケジュールとして、具体的な制度を2025年中に採択し、2027年の発行を目指すことが合意され、2023年IMO GHG削減戦略に盛り込まれた（表3）。

表2 MEPC 80で提案されている中期対策案

制度名	提案国	概要	
規制的手法	燃料油規制 (GFS)	EU各国、EC (欧州委員会)	<ul style="list-style-type: none"> • 使用した燃料の年間GHG強度 (gCO₂eq/MJ) を段階的に低減 • 燃料のライフサイクルGHG排出 (Well-to-Wake) が対象 • 柔軟性メカニズム (超過成分の他船への融通や拠出金の支払いによる基準適合)
	燃料油規制 (IMSF&F)	中国	<ul style="list-style-type: none"> • 使用した燃料の年間GHG強度 (gCO₂eq/MJ) を段階的に低減 • 船上から排出されるGHG排出 (Tank-to-Wake) が対象 • 柔軟性メカニズム (超過成分の他船への融通や拠出金の支払いによる基準適合)
経済的手法	Feebate	日本	<ul style="list-style-type: none"> • 船舶からのGHG排出量に応じて課金 (課金額は還付等に必要となる額を設定) • 課金収入は、還付対象燃料を使用する船舶 (ゼロエミ船) への還付 (first movers支援) に活用
	単純課金	マーシャル諸島、ソロモン諸島	<ul style="list-style-type: none"> • 船舶からのGHG排出量に応じて課金 (課金額は当初CO₂排出1トン当たり100ドル、順次増加) • 課金収入は途上国支援に活用
	F&R	ICS (国際海運会議所)	<ul style="list-style-type: none"> • 船舶からのCO₂排出量に応じて課金 (課金額は還付等に必要となる額を設定) • 課金収入は、還付対象燃料を使用する船舶 (ゼロエミ船) への還付 (first movers支援)、途上国支援、研究開発に活用

(国交省から公表されている資料をベースに本会が作成)

GFS: GHG Fuel Standard
 IMSF&F: International Maritime Sustainable Fuels and Fund
 F&R: Fund and Reward

表3 中期対策の策定スケジュール

MEPC 81 (2024年春)	技術的要素と経済的要素から構成される対策案の最終化
MEPC 82 (2024年秋)	包括的影響評価の完了
MEPC 83 (2025年春)	中期対策の承認
臨時MEPC (2025年秋)	中期対策の採択
採択から16か月後 (2027年中)	中期対策の発効

2.4 バイオ燃料の使用における船舶からのGHG排出量

GHG削減の観点から国際海運においては代替燃料への切替えが徐々に進みつつあり、IMOではドロップイン燃料で現存船への使用が比較的容易なバイオ燃料の利用に関する議論が進められている。

バイオ燃料は食物油を主とするバイオマスを原料として製造される再生可能な燃料であり、燃焼時に排出されるCO₂について、その原料となる植物が成長する過程で大気中のCO₂を吸収することから、海運以外のセクターではカーボンニュートラルな燃料として扱われている事例もある。一方、IMOの規

定ではこれまでバイオ燃料のGHG削減効果をどのように反映するのか明確ではなかったため、MEPC 80では、IMO-DCS及びCII格付け制度におけるバイオ燃料の取扱いが検討され、バイオ燃料を使用した場合のCO₂排出量をどのように評価すべきかについて議論が行われた。その結果、2.2節で概説したLCAガイドラインにおいてバイオ燃料の取扱いが明確化されるまでの暫定措置として、「IMO-DCS及びCII規制におけるバイオ燃料の取扱いに関する暫定ガイダンス」(MEPC.1/Circ.905)が承認された。

当該ガイダンスでは、船舶で使用するバイオ燃料が、国際的な認証スキームによってその持続可能性基準を満たすことが認証されており、かつ、ライフサイクルGHG強度が一般的なマリンガソイル(MGO)の値より65%低い場合(33 [gCO₂eq/MJ]以下の場合)には、そのGHG強度に定位発熱量を乗じて得られるCO₂換算係数の値をIMO-DCSやCIIの計算に採用できることとなっている。一方、これらの条件を満たさないバイオ燃料については、それと同等の化石燃料と同じCO₂換算係数を採用する必要があることが定められている。

3. 欧州規制の動向

3.1 EU-ETS指令

3.1.1 背景

欧州連合(EU)においては、GHG排出量の2050年ネットゼロの達成を目指して、GHG排出量を2030年までに1990年比で55%以上削減する目標を掲げている。2021年7月には、2030年目標達成のための包括的な気候変動政策パッケージ「Fit for 55」が発表され、EU-ETSの海運セクターへの拡大案などが発表された。その後、欧州議会はEU-ETSを規定するEU指令(以下、EU-ETS指令)の海運セクターへの適用を含むFit for 55の関連法案を2023年4月18日に採択、同年4月25日に欧州理事会も同法案を採択し、立法手続きが完了した。これにより、2024年1月1日からEU-ETSが海運セクターで開始されることが決定した。また、EU-ETS指令の適用に関連し、EUの港に寄港する船舶を対象に2018年から導入されている、船舶の燃料消費量のモニタリング・報告・検証制度であるEU-MRV規則の改正も併せて採択された。

3.1.2 EU-ETS指令の適用

EU-ETSは2024年1月1日以降、船籍国に関わらず、EEA(欧州経済領域。EU加盟国である27か国に加え、ノルウェー、アイスランド、リヒテンシュ

タイムの合計30か国) 加盟国管轄内の港に寄港する総トン数5,000GT以上の船舶に適用される。なお、2025年1月1日以降は、400GT以上で5,000GT未満の一般貨物船 (general cargo ship) にも適用が拡大される。規則でいう“寄港”とは、貨物の荷役、旅客の乗降、又はオフショア船の乗組員が交代を行うために寄港することをいう。それ以外の目的 (給油、物資の入手等) 及び一部のコンテナ積替港での停泊は寄港とはみなされない。

また、GHG排出量の対象ガスについては、2025年までは二酸化炭素 (CO₂) を対象とし、2026年以降はこれに加えCO₂、メタン (CH₄) 及び亜酸化窒素 (N₂O) も対象とする。

次の航海における合計のGHG排出量が適用対象となる。

- ・ EEA加盟国の管轄下にある寄港地とEEA加盟国の管轄外にある寄港地間の航海を行う船舶からの排出量の50%
- ・ EEA加盟国の管轄下の寄港地を出発し、EEA加盟国の管轄下の寄港地に到着する航海を行う船舶からの排出量の100%
- ・ EEA加盟国の管轄下の寄港地内の船舶からの排出量の100%

経過措置として、EU-ETS指令導入後の最初の2年間について、償却義務を負うCO₂排出量は、次のとおり軽減される。

2024年：償却の対象となるCO₂排出量を40%に軽減
2025年：償却の対象となるCO₂排出量を70%に軽減

3.1.3 海運会社の義務

海運会社は、2024年以降に前述の3.1.2項で示した年間GHG排出量に相当する排出枠を購入の上、翌年9月30日までに償却することが要求される。償却後、所持している排出枠が余剰する場合、余剰分を売却、もしくは翌年への繰り越しが可能である。

なお、これらのGHG排出量はEU-MRV制度に基づいて検証される。海運EU-ETSの導入に併せて改正されるEU-MRV制度により、海運会社は、EU-ETSに対応したモニタリングプランを作成し、検証機関により検証を受けた上で、2024年4月1日までに後述の3.1.4項に示す管轄当局への提出が必要になる。また、2025年以降、毎年3月31日までに対象となる船舶の前年のデータに対するエミッションレポートを検証機関より検証を受けた上で、管轄当局、旗国 (旗国がEEA加盟国の場合) 及び欧州委員会に提出することが要求される。加えて、それらのGHG排出量を会社レベルで合計したもの (集計エミッションデータ) を毎年3月31日までに管轄当局に提出することが要求される。

3.1.4 管轄当局 (Administering Authority)

適用対象となる海運会社は、EEA加盟国の1つ (Administering Authority=管轄当局) に登録され、この管轄当局により規制遵守の確認等が行われる。管轄当局への登録基準は次のとおりである。

- (i) EEA加盟国に登録されている海運会社：当該会社が登録されているEEA加盟国の管轄当局に登録。
- (ii) EEA加盟国に登録されていない海運会社：
 - ・ 当該海運会社の過去4年間のEU関連航海のうち寄港回数が最も多いEEA加盟国の管轄当局に登録。
 - ・ 過去4年間にEUへ寄港していない場合、2024年以降に最初に到着した/最初に航海を開始したEEA加盟国の管轄当局に登録。

各海運会社の登録先の管轄当局については、2024年2月1日までにリストが公表される予定である。

3.1.5 寄港地の適用除外

3.1.2項に記載した除外される“寄港”の一つに、「欧州域内に隣接するコンテナ積替港への停泊」があり、これは「EEA加盟国港湾から300マイル以内のEU域外のコンテナ積替港」かつ「入手可能な直近12か月間データから、総コンテナ輸送量 (20フィート換算) の65%がコンテナ積替と判断される港」とされている。すなわち、コンテナ船に限り、当該コンテナ積替港への寄港はEU-ETSにおける寄港とはみなされず、その前後の航海が連続しているとみなされる。具体的な積替港のリストは、2023年12月31日までに欧州委員会から公表され、その後2年ごとに更新される予定である。

3.1.6 罰則

適用対象となる排出量に相当する排出枠の100%を償却できなかった (排出枠が不足した) 場合、償却できなかった排出量について、CO₂排出量1トン当たり100ユーロの罰金が科される。なお、償却できなかった排出量は翌年に償却が必要となる。さらに、必要な排出枠の償却を2年以上行えなかった場合、当該海運会社の船舶に対して、EEA加盟国への入港拒否などの措置が取られる。

3.2 FuelEU Maritime規則

3.2.1 背景

EUでは、EEA内の港湾を発着する海上輸送によるCO₂排出量がEUの全輸送セクターからのCO₂排出量の約11%、EU全体のCO₂排出量の3%~4%を占めており、さらなる対策を講じない限り、海上輸送によるCO₂排出量は増加すると予想されている。そこで、3.1.1項に記載した「Fit for 55」や、3.1で

記載した EU-ETSの海運セクターへの拡大案などに加えて、や船舶で使用する燃料の脱炭素化を促進するFuelEU Maritime規則案が発表された。2023年7月には欧州議会及び欧州理事会における採択が完了し、FuelEU Maritime規則を2025年1月から導入することが決定した。

3.2.2 FuelEU Maritime規則の概要

FuelEU Maritimeは、EU-ETS同様、船籍国に関わらず、EEA加盟国において共通に適用される規則である。海運会社（company）が対象となる。

FuelEU Maritime規則とは、船舶で使用する燃料の脱炭素化の促進を目的として、EU/EEA加盟国で2025年から導入される規制であり、大きく次の2つの規定から構成されている。

- (1) 船舶で使用する燃料に対するGHG強度の上限を設定する規定
- (2) 港湾へ係留中に陸上電源またはゼロエミッション技術の使用を義務付ける規定（コンテナ船及び客船のみ）

FuelEU Maritimeを構成する上記2つの規定の概要は次のとおりである。

- (1) 船舶で使用する燃料に対するGHG強度の上限を設定する規定の概要

ここで、GHG強度規定とは、EU/EEA加盟国の管轄下にある港湾を発着する航海で使用した燃料を対象として、当該燃料の「GHG強度」と呼ばれる「エネルギー当たりのGHG排出量[gCO₂eq/MJ]」の年間平均値に対して、上限値を設定するものであり、以下のような内容となっている。

- 2025年1月1日から開始される。
- 総トン数5,000トンを超える船舶が、EU/EEA加盟国の管轄下にある港湾を発着する航海で使用した燃料が対象となる。
- GHG強度は、Well-to-Wakeベースで評価される。
- GHG強度の年間平均値は、船単位で計算される。
- GHG強度の年間平均値が、当該年のGHG強度の上限値を超過する場合、その超過分に当該年のエネルギー消費量を掛けたGHG排出量[gCO₂eq]に応じた罰金（3.2.5項参照）を支払うことで、規定に適合したとみなされる。
- 同一の船舶に対して、GHG強度の上限値を達成した場合の当該達成分のGHG排出量について、翌年への繰り越し（バンキング）及び翌年の達成分を見込んだ前倒し利用（ボローイング）や、保有するフリート内の複数隻に対して、「上限値を達成した分」と「上

限値を達成できなかった分」を同一報告期間において相殺（プーリング）することも可能。

- (2) 港湾へ係留中に陸上電源またはゼロエミッション技術の使用を義務付ける規定（コンテナ船及び客船のみ）の概要
 - 2030年1月1日から開始される。（一部の港湾については、2035年1月1日から開始）
 - 総トン数5,000トンを超えるコンテナ船及び客船（passenger ship）がEU/EEA加盟国の港湾に係留される場合、その間の船内電力の供給に陸上電源（OPS：Onshore Power Supply）などの使用を要求。
 - 2時間未満の係留は非適用になるなど、除外規定がある。
 - 本規定に適合できない場合、停泊中の電力量などに応じた罰金を支払うことで、規定に適合したとみなされる。

3.2.3 GHG強度の確認方法

FuelEU Maritimeの対象となる船舶の使用エネルギー量及びGHG強度は、FuelEU Maritimeのモニタリングプラン（3.2.4項参照）に基づいて収集されたデータを基に確認される。

FuelEU Maritimeでは、GHG強度は、Well-to-Wakeベースで計算される。各燃料のGHG強度は、Well-to-Tank部分とTank-to-Wake部分に対して、それぞれ定められた係数などを基に計算され、その合計値が同燃料のWell-to-WakeベースでのGHG強度となる。例えば、船用ディーゼル油（MDO）の場合、Well-to-Tank部分のGHG強度は14.4[gCO₂eq/MJ]、Tank-to-Wake部分のGHG強度は76.4[gCO₂eq/MJ]となり、その合計値である90.8[gCO₂eq/MJ]が同燃料のGHG強度となる。

また、GHG強度の上限値は、2020年レベルの「91.16」を基準として、5年ごとに強化される。

複数の燃料を使用した場合は、使用エネルギー量で加重平均したものが当該船舶のGHG強度となる。

なお、再生可能エネルギー由来の水素を利用して製造したアンモニア燃料などの非生物由来の再生可能燃料（RFNBO, Renewable Fuels of Non-Biological Origin）を使用した場合には、インセンティブを与える目的で、当該燃料のGHG強度は本来の値の半分として計算される。この特別措置は、2025年1月1日から2033年12月31日まで適用される。

また、FuelEU Maritimeのモニタリング及び報告を実施する際には、EU-MRV規則で収集された情報及びデータを必要に応じて使用することとされているが、その詳細については今後EUから公表される見込みである。

3.2.4 FuelEUモニタリングプラン

海運会社は、船舶が航海及び停泊中に使用するエネルギーの量（燃料の種類及び消費量）をモニタリングし、報告するための方法を定めた「FuelEUモニタリングプラン」を2024年8月31日までに、検証者に提出することが要求される。なお、2024年8月31日以降に初めてEU/EEA加盟国の港に寄港する船舶については、当該寄港から2か月以内にモニタリングプランを検証者に提出することが要求される。

モニタリングプランは、モニタリング期間が開始する前までに検証者による審査を受けた上で、検証者により欧州委員会が管理するFuelEUデータベースに記録される。

3.2.5 罰金

GHG強度規定では、実際に使用した燃料のGHG強度が当該年のGHG強度上限値を超過する場合、使用した燃料の種類及び使用量に応じて計算される罰金を支払うことが規定されている。各船舶の罰金計算の算出式の概要は図3のとおりである。

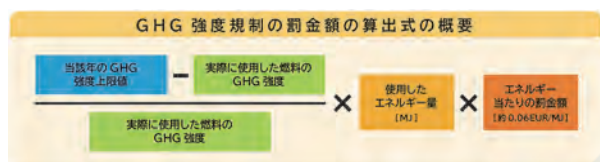


図3 罰金額の算出式の概要

上記算出式で結果がマイナスになる場合に罰金が発生することとなり、その絶対値が罰金額となる。複数の燃料を使用した場合、この算出式中の「実際に使用した燃料のGHG強度」については、使用エネルギー量で加重平均したものが当該船舶のGHG強度となる。

また、連続するモニタリング期間で2回（2年）以上GHG強度の上限値を未達成であった船舶の罰金額は、罰金が適用されるモニタリング期間の数nに応じ $1+(n-1)/10$ を掛けた金額へ増額される。すなわち、同一の船舶が2年連続で罰金支払い対象となった場合、2年目の支払額は上述の算出式で計算される額の1.1倍となる。

3.2.6 ClassNK MRV Portalの対応

本会は、EU-MRV規則及びIMO-DCS規則への規則対応のために、データ収集管理及び認証のためのシステム「ClassNK MRV Portal」を提供している。本システムを通してデータ収集用テンプレート（本船入力）の提供、本船からのデータ報告、陸上でのデータ管理、年間報告の認証申込み、適合証書発行、請求書管理までをユーザーはワンストップで行うこ

とが可能である。

FuelEU Maritimeにおいても、FuelEUモニタリングプラン及びFuelEUレポートの検証がスムーズに実施できるよう、ClassNK MRV Portalの改修を行っていく予定である。

4. まとめ

近年、頻発する異常気象やそれに伴う大規模災害等を背景に地球規模での温暖化対策が急務となっている。国際海運についても例外ではなく、船舶からのGHG排出削減のための規制や制度の導入がIMOやEUなどで検討されている。

グローバルな規制の策定を担うIMOでは、2023年にGHG削減戦略が改訂され、2050年頃のGHGネット排出ゼロに向けた削減目標が掲げられたほか、ゼロエミッション燃料等の使用割合に関する目標が新たに合意された。今後、IMOではこれらの目標の達成に向けた中期対策の策定など、GHG削減に向けた議論が行われる。一方、EUでは、地域規制として、経済的手法の要素を含んだEU-ETSやFuelEU Maritimeの制度の導入を決定しており、EUを発着する船舶については、排出量や使用した燃料の種類などに応じたコストの負担増加が見込まれる。

国際海運からのGHG排出削減を進めるためには、化石燃料を使用する従来型の船舶からゼロ/低エミッション船への移行だけでなく、ゼロ/低エミッション燃料の安定的な供給が必要となっており、国際機関、各国、海事産業界、エネルギー業界、荷主、金融業界などの協調した取組みが急がれる。本会としてもGHG削減に関する規制の動向やその影響等について情報発信していくとともに、本会が展開している「ClassNKゼロエミッション・サポート・サービス」に加え、顧客や社会のニーズに応じた新しいサービスを提供していくことにより、関係者各位のGHG削減に向けた取組みを積極的に支援していく。

参考文献

- 1) Resolution MEPC.376(80), Guidelines on lifecycle GHG intensity of marine fuels (LCA guidelines)
- 2) Resolution MEPC.377(80), 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships (2023 IMO GHG Strategy)
- 3) MEPC.1/Circ.905, Interim guidance on the

use of biofuels under regulations 26, 27, and 28 of MARPOL Annex VI (DCS and CII)

- 4) Directive (EU) 2023/959 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union and Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading system (Text with EEA relevance)
- 5) Regulation (EU) 2023/957 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 amending Regulation (EU) 2015/757 in order to provide for the inclusion of maritime transport activities in the EU Emissions Trading System and for the monitoring, reporting and verification of emissions of additional greenhouse gases and emissions from additional ship types (Text with EEA relevance)
- 6) Regulation (EU) 2023/1805 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC (Text with EEA relevance)

メタノール燃料船の構造及び設備に関する安全要件について

技術本部 技術部

1. はじめに

近年、国際海運の分野では、大気汚染防止、地球温暖化防止に関する規制が強化される中、次世代の船舶燃料として、石油燃料に代わり地球環境に配慮した代替燃料の利用の検討が活発に行われている。特に現在代替燃料として開発が進むLNG、LPG及びメタノール/エタノールには硫黄分が含まれていないため、これらを燃料にした場合、SO_xの大幅な排出削減が可能となる。また、CO₂においても排出量の削減が期待されている。持続可能なバイオマス由来のバイオメタノールや再生可能エネルギー由来のe-メタノール等のグリーンメタノールを使用することでライフサイクルベースでのGHG排出実質ゼロを達成することも検討されている。

一方で、メタノールを船舶燃料として使用するためには、その安全性について考慮が必要である。従来の燃料と比較し、燃焼範囲が広い、最小着火エネルギーが小さい、人体に対する毒性がある、引火した際の火炎が視認し難い等の特徴があり、これらの要素に対する安全性の確認が必要となる。

メタノール燃料船は、SOLAS条約II-1章第56、57規則に従いガス又はその他の低引火点燃料を使用する船舶に対する安全要件を定めたIGFコードを満足する必要がある。一方で、IGFコードにはメタノールを燃料として使用する際の具体的な安全要件は記載されておらず、規則としては現在のところIMOより発行されたMSC.1/Circ.1621 “INTERIM GUIDELINE FOR THE SAFETY OF SHIPS USING METHYL/ETHYL ALCOHOL AS FUEL”の発行に留まっており、国際条約等による強制的な安全要件は定められていない。

本会は、メタノール燃料船の構造及び設備の安全要件の開発に貢献するため、メタノールを燃料として使用する船舶の安全性を確保するために求められる要件を「代替燃料船ガイドライン」A部にとりまとめた。

本稿は、メタノール燃料船の構造及び設備の安全要件に関しガイドラインの概要及び設計時の注意点について解説するものである。

2. 代替燃料船ガイドラインA部

2.1 概要

2021年8月に本会は代替燃料船ガイドラインA部“メタノール/エタノール燃料船の安全に関するガイドライン”を発行した。その後、2021年9月にIMO暫定ガイドラインMSC.1/Circ.1621の内容を織り込み、2022年6月に一部改正した本ガイドラインA部 第2.0版（以下、ガイドライン）を発行した。

2.2 ガイドラインの主な要件

2.2.1 ガイドラインの構成

ガイドラインでは、メタノールを燃料として使用する場合の安全に関する要件を規定し、3章に機能要件、4章にリスク評価を含む一般要件、5章以降にメタノール燃料船の具体的な要件について規定している。

2.2.2 機能要件（3章）

ガイドライン3章では、メタノール燃料を使用する推進機関、補機発電機関、その他の用途の機関の設計、構造及び運用を安全で環境に配慮したものとすることを目的として機能要件が規定されている。

本ガイドラインの規範的な要件は、すべてこの機能要件に基づき決定されており、ガイドラインに規定された規範的な要件から逸脱した設計を行う場合であっても機能要件には合致する必要がある。

2.2.3 一般要件（4章）

メタノール燃料の使用から生じる人員、環境、船体の構造強度及び保全性に対するリスクについて検証するために、リスク評価を行わなければならない。LNG燃料船と異なり、リスク評価の対象範囲は限定されておらず、メタノール燃料に起因するすべての潜在的なハザードについて検討する必要がある。これにより、ガイドラインが規定する規範的な要件では対処できない危険性に対処することが期待される。

船籍国によっては、本リスク評価に加えて、IGFコードからの逸脱として同等性の立証が求められる場合があることに留意する必要がある。

2.2.4 船舶の設計及び配置（5章）

a) タンク配置

メタノール燃料タンク（以下、燃料タンク）は一体型燃料タンクあるいは独立型燃料タンクとするこ

とができる。一体型燃料タンクは、外部火災による熱的影響や、毒性及び可燃性のメタノールが船体のその他の場所に漏洩することを防ぐため、その周囲にコファダムを設置する必要がある。ただし、考えられる最低水線より低い外板、メタノールを貯蔵するその他の燃料タンク又は燃料調整室で境界が形成される面については、保護コファダムの設置は要求されない。独立型燃料タンクは、燃料貯蔵ホールスペース内あるいは開放甲板に設置することが認められている。

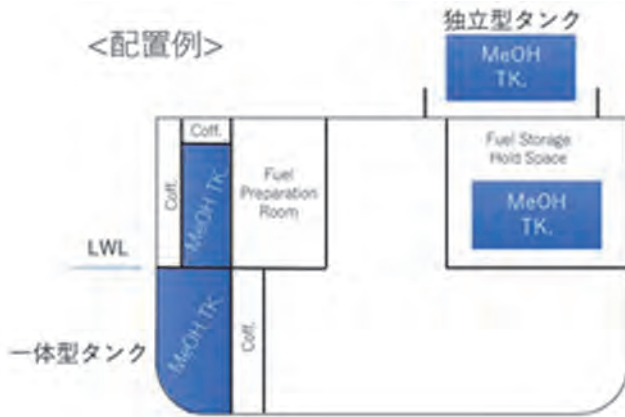


図1 メタノール燃料タンク配置の例

なお、ケミカルタンカーにおいて貨物兼燃料タンクが貨物エリアに設置される場合はIBCコードの思想によって安全性が担保されると考え、上記に関わらず、貨物兼燃料タンク周囲に保護コファダムは要求されないものと取扱っている。

燃料格納設備は衝突による損傷リスクを抑えるため、船首隔壁の後方かつ船尾隔壁の前方に配置することが求められる。本要件は開放甲板上の燃料タンクも適用対象となる。なお、LNG燃料船に適用されるIGFコードと異なり、現状のガイドラインにおいては、確率論的手法による燃料タンク配置の検討は認められていない。

b) 燃料関連設備のある閉囲区画へのアクセス

本章に規定されるメタノール燃料に関する危険場所への交通に対しては、非危険場所から直接立ち入ることができるものとしてはならず、運行上の理由によりそのような開口が必要な場合は、エアロックを設けることで、アクセスが認められる。なお、ガイドライン12章に規定される通り、正常運転中はエアロックにより保護される区画は非危険場所とみなすことができるが、保護された区画と危険場所との差圧が喪失した場合に使用される機器は、1種危険場所での使用が認定又は証明された機器が要求される。このため、危険場所から機関室に直接アクセ

スするような配置とした場合に、同区画の間にエアロックを設けたとしても、差圧喪失時に機関室内で使用される機器は1種危険場所に対応した防爆型の機器が要求されるため、注意が必要である。

c) 漏洩対策

燃料の漏洩に対しては、漏洩が起り得る場所、特に単管の接続部には、ドリフトレイを設ける必要がある。ドリフトレイの容量については、リスク評価に基づく最大の流出量に対応できる十分な容量を有するものでなければならない。また、ドリフトレイに漏洩したメタノールを専用の貯留タンクに安全に移送又はドレンするための手段も設ける必要がある。貯留タンクについては、ドリフトレイからの漏洩の集積の他、閉囲区画に設置される燃料ポンプ、弁又は二重管の内管からのメタノール燃料のドレン及び起り得る漏洩を集積できる必要がある。なお、本会では通常のオペレーションにおいて貯留タンクにメタノール燃料が積載される場合は、基本的に当該貯留タンクには燃料タンクと同等の要件を適用する必要があると考えており、機関室内への設置は認めていない。

2.2.5 燃料格納設備（6章）

燃料格納設備に関するガイドラインの規定には、貨物としてメタノールを貯蔵運搬するケミカルタンカーに適用されるIBCコードの規定が一部取り込まれている。燃料タンクには制御式の通気装置を備え付ける必要があり、それぞれの燃料タンクに圧力及び真空逃し弁を設け、ベント管出口にフレイムアレスタを設ける必要がある。また、燃料タンクは通常の使用状態において常時イナートガスで不活性雰囲気とすることが求められている。そのため、通常のお燃料タンクに備えられる開放式の空気管の設置は認められないことに留意されたい。

船員へのメタノール蒸気の暴露を避けるため、燃料タンクベント排気口は、甲板から3m以上上方の位置、または歩路から4m以内にベント排気口が配置される場合は歩路から3m以上上方の位置に設けなければならない。また、当該ベント出口は、居住区域、業務区域の最も近い空気取入れ口又は開口並びに発火源から少なくとも10m以上離れた場所に配置する必要があり、燃料タンクと居住区が近接しがちなバルクキャリア等では注意を要する。

船上で使用するイナートガスは、想定される最大の燃料消費量と航海期間を考慮した少なくとも1航海分のイナートガス消費量に加え、港湾内での最小の燃料消費量で燃料タンクを2週間のあいだ不活性化状態を保つために必要なイナートガス消費量を考慮し、容量を決定する必要がある。このイナ

トガス容量を達成するために、ガイドライン上はイナーナートガス発生装置または貯蔵設備の使用が認められているが、実際は窒素発生装置を船上に備える計画が多いようである。

2.2.6 材料及び燃料管装置（7章）

材料の選択に際し、燃料の腐食性を考慮することが求められている。一般に、燃料管の材料としてはオーステナイト系ステンレス鋼、燃料タンクにはオーステナイト系ステンレス鋼が通常の船体用圧延鋼材に塗装を施したものを使用する計画が多いようである。一般的に燃料として利用されるメタノールには、添加物や不純物が含まれることから、材料選択の際は本観点も考慮の上、材料メーカーや塗装メーカーにメタノール燃料との適合性を確認されたい。

メタノール燃料管に対する船級材料の適用にあつては、鋼船規則D編表D12.1の燃料油の項目を準用し、圧力、温度に応じた管の分類に倣う取扱いとしている。1類管、2類管に分類された場合は、鋼船規則D編12.1.4-2(1)に従い、鋼船規則K編に適合した材料が要求される。3類管に分類された場合は、規則D編12.1.4-2(2)に従い、本会が適当と認めた規格に定められた材料を用いても差し支えない。また、燃料二重管の外管に関しては、鋼船規則D編表D12.1内の流体の種類として空気の項目を参照し、対応する管のグレードに応じて、該当する規則を参照することになる。

二重管の内管は、完全溶け込み型の突合せ溶接とし、全ての箇所において放射線透過試験を実施する必要がある。フランジ継手はタンクコネクションスペース、燃料調整室又は同等の措置が講じられた区域内の管にのみ認められる。なお、二重管の外管にはフランジ継手の使用が認められる。

2.2.7 バンカリングステーション（8章）

a) 滞留防止

バンカリングステーションは、自然通風が十分に行われる開放甲板上に設置されなければならない。バンカリングステーションを閉鎖場所又は半閉鎖場所となる場所に設ける場合には、機械式通風等に加え、リスク評価によりその安全性について検証する必要がある。

b) ホース破断防止

バンカリングステーションにおける連結部は、過大な荷重によるバンカリングホースの破断などを防止するため、ドライブレイクアウェイカップリング又は自己密封の急速切り離し機能を備えた、切り離しの際に燃料が流出しない型式のものとする必要がある。

c) バンカリング管

バンカリング管は、イナーティンク及びガスフリーを行うことができるものとする必要があり、承認された場合を除き、バンカリング管は、燃料の補給に使用されないときには、ガスフリーされた状態としなければならない。

貨物兼燃料タンクを有するケミカルタンカーにおいて、貨物マニホールドとバンカリングマニホールドを兼用する場合は、本ガイドライン8章の適用は強制ではなく、バンカリングマニホールドが独立している場合に同章の規定が適用される取扱いとしている。また、貨物マニホールドとバンカリングマニホールドを兼用する場合においても、燃料への異物混入を避けるために、貨物兼燃料タンクへの積込み管は、スプールピース等により他の貨物ラインと分離する必要がある。

d) メタノール暴露の影響軽減

メタノールが作業者に暴露した際の影響を軽減するために、緊急用の除染シャワー及び洗眼器を燃料に接触する可能性のある場所に近接して配置しなければならない。これらの設備は、いかなる周囲条件下においても使用することができるものでなければならない。

2.2.8 機器への燃料の供給（9章）

船上の人員、環境及び船舶を危険にさらすような燃料の漏洩が起こらないように考慮することを、メタノール燃料に対する基本的な設計思想としている。加えて、燃料供給における単一故障によって許容されない動力の喪失につながらないように推進力及び電力供給並びに燃料供給装置を配置し、冗長性を確保しなければならない。

船内の閉鎖区画を通過する燃料管は漏洩に対して考慮する必要があり、周囲区画に対してガス密及び液密となる管又はダクト内に設置し、外管又はダクトとの間の空所部は、毎時30回以上の排気式通風装置によって換気されなければならない。

二重管外管の寸法に関しては、その設計圧力が燃料管の最大使用圧力以上としなければならない。ダクトの寸法を決定するに当たっては、内管が破裂した際のダクト内最大圧力計算値を使用することができる。ダクト内最大圧力を規定する計算式等は現状船級規則上では規定されていないため、適切な計算式、解析ソフト等を選定の上、使用することで差し支えない。

機関室内の二重管のドレンは、貯留タンクに導く必要がある。一方、代案として二重管最下部にドレン抜きのコック等を設け、漏洩を検知した際は、持ち運び式ドレンタンクに接続し、船員によるマニユ

アルのドレン排出を行うことも認められる。この場合、漏洩燃料を保管した持ち運び式ドレンタンクについては安全上適切と判断された区画に保管するかその内容物は貯留タンクに移送する。なお、当該持ち運び式ドレンタンクは可搬式燃料タンクとしての要件を適用しなくとも差し支えない。

各燃料使用機器または機器群への主機燃料供給ラインに対する要件としては、自動的に作動する主燃料弁の設置が挙げられる。当該弁は燃料使用機器を収容する機関区域の外部の配管に設ける必要がある。また、燃料供給装置の安全機能に関わる弁については、弁動作の動力が失われても安全側に作動するようなフェイルセーフタイプが要求される。

2.2.9 燃料の使用 (10章)

本ガイドライン10章は、メタノールを使用する機器として二元燃料機関及び専焼機関の使用に関する規定を設けている。その他メタノールを使用する機器を計画する場合は、本章の目的、機能要件に合致したものとすることに留意する必要がある。

2.2.10 火災安全 (11章)

a) 火災の抑制

防火構造の要件は原則、鋼船規則R編9章の規定に従う必要があるが、メタノール燃料船特有の区画に対して本章に追加的の要件として規定している。例えば燃料調整室はA類機関区域とみなし隣接する区画の境界には適切な防火安全性が要求される。なお、燃料調整室をA類機関区域とみなすのはあくまで防火構造を検討する場合のみであって、例えばSOLAS条約II-2章第13規則の脱出設備要件上は、燃料調整室をA類機関区域とみなす必要はなく、その他の機関区域としての脱出要件を適用することで差し支えない。

b) 消火設備

メタノール燃料装置を収容するすべての区画には、FSS Codeに従った固定式の火災探知装置及び火災警報装置を備える必要がある。また、メタノール火災の特徴から、煙探知器に加え、熱探知器などのメタノール火災を探知することができるものが要求される。

燃料タンクが開放甲板上に設置される場合と開放甲板下に設置される場合の火災安全にかかわる代表的な要件について以下に解説する。

1) 開放甲板上

燃料タンクが開放甲板上に設置される場合、偶発的な流出燃料の希釈、燃料タンクの冷却および火災防止のために燃料タンク暴露部を覆う固定式水噴霧装置を設ける。また、アルコール火災を想定し、固定式の耐アルコール泡消火装置を備える。

開放甲板下の燃料タンクに面する船橋窓までの居住区域、業務区域、制御場所、機関区域及び脱出経路の境界にはA-60級の防熱を施工する。

2) 開放甲板下

燃料タンクへの入熱を防ぐため、燃料タンクの境界は、A類機関区域及び火災の危険性が高い区画から、少なくともA-60級の防熱が施されている幅600mm以上のコファダムによって隔離する必要がある。

2.2.11 防爆 (12章)

危険場所に使用される電気機器については、安全形として承認された電気機器を使用する必要がある。メタノールにおいては、IIAT1以上の防爆グレードを持つ防爆型の電気機器を選定する必要がある。危険場所はガイドライン12.5に従い、0種危険場所、1種危険場所、2種危険場所に分類され、同章に規定された危険場所分類の定義を適用することが適当ではなく、特別な考慮が払われている場合には、IEC60079-10-1:2015に則った分類を認めることができる。

2.2.12 通風装置 (13章)

a) 通風装置の配置

危険場所の通風に使用されるあらゆるダクトは、危険場所を拡大させないために、非危険場所の通風に使用されるダクトから独立させなければならない。また、閉囲された危険場所の空気取入口は、当該空気取入口がない場合に非危険場所となる区域に設置しなければならない。

燃料調整室並びに燃料配管を含む二重管及びダクトには、排気式の有効な機械式強制通風装置が設置されなければならない。通常の状態において、少なくとも毎時30回の換気能力を有する通風装置としなければならない。二重管又はダクトの通風装置の吸気口は、発火源から離れた大気中の非危険場所に配置する必要がある。その開口部は水の浸入に対し保護されると共に、適当なワイヤメッシュの保護具を取り付けなければならない。

b) 通風ファンの冗長性

燃料調整室の通風用ファンの個数及び出力は、主配電盤若しくは非常用配電盤から独立に給電されるファン又は主配電盤若しくは非常用配電盤から共通の回路で給電される一群のファンが故障した際に、換気能力の総容量の50%を下回るものであってはならない。なお、内航船で航路制限等により主配電盤の母線分割、非常用配電盤の設置が軽減される船舶においても、想定されるリスクを最小限に抑えるために、冗長性を有した通風ファン構成とする必要がある。

2.2.13 電気設備（14章）

電気設備については、可燃性雰囲気における発火のリスクを最小化することに留意し、電気機器の選定やケーブルの敷設など、鋼船規則H編の関連規定に従う必要がある。

2.2.14 制御、監視及び安全装置（15章）

a) 安全装置

燃料安全装置は、燃料の漏洩等が起きた際に、タンク付弁、主燃料弁、バンカリング弁の内、該当する弁の自動遮断を行い、メタノール燃料の供給を遮断することで被害の拡大を防ぐ役割を担う。

燃料タンクの安全装置として、常時液面が表示されるように配置された密閉型液面計測装置を設ける必要がある。燃料タンク使用時において、液面計の保守作業に伴うタンク開放を避けるため、液面計は二重化する必要がある。これは、保守作業に伴う燃料の外部放出や人への暴露を避けることを目的としたものである。ただし、燃料タンク使用時に燃料の外部放出なしに必要な保守が可能な場合は、液面計の二重化を参酌することができる。なお、必要な保守作業とは、液面計に不具合がある場合に行われるあらゆるメンテナンス作業を指すものと考えている。また、燃料タンクには、作動時に可視可聴警報を発する高位液面計装置を設ける必要があり、液面指示装置と共通のものとしてもよいが、高高位液面警報からは独立させる必要がある。

b) ガス検知器

漏洩したメタノール蒸気を検知する手段としてガス検知器の設置が要求されている。本章にて要求されるガス検知器は、メタノール蒸気による可燃性雰囲気の形成及び毒性雰囲気の形成を検知するために設置要求しているものの、毒性雰囲気の検知に関し、具体的な記述がないため、本会の推奨事項を下記に記載する。

固定式ガス検知器の警報設定は、1日8時間1週40時間作業する場合の作業環境許容濃度であるTLV-TWA：200ppmを推奨している。200ppmを警報の設定点に出来る固定式ガス検知器が市場にない等の合理的な理由があれば、この限りではない。固定式ガス検知器は主に、致命的な被害（火災や爆発、人の回復不能な障害や死亡等）に至る前に漏洩に対処する目的で設置するものと考えており、通常人がアクセスする可能性のある区画については、30分以内に脱出不能な状態や回復不能な健康障害に陥る危険を回避できる限界の濃度である脱出限界濃度IDLH：6000ppmを警報とすることも一案と考えている。

また、ガイドライン17章では可搬式ガス検知器

の使用について言及しており、固定式ガス検知器に加えて可搬式ガス検知器も必要と考えている。可搬式ガス検知器の主な役割は、適切な作業環境の確認であることから、警報設定はTLV-TWA：200ppmを推奨している。

さらに、船員が可搬式ガス検知器を携帯せずに燃料調整室に入ること等のミスオペレーションを防止するための措置として、注意銘板設置やガイドライン17.2で要求されるマニュアルへ注記することが状況に応じて必要となる。

c) 漏洩液検知

燃料タンク周囲の保護コファダム、燃料配管の周囲に設置されるダクト、燃料調整室及び燃料単管又は燃料機器が設置される閉区画に対する安全装置として、漏洩液の検知器が要求されている。当該漏洩液検知器については、液自体の検知が必要と考えるため、蒸気のみを検知するガス検知器のみの設置は認められない。

3. 今後の動向

3.1 IMOの動向

現状、メタノールを燃料として使用する船舶の要件は、冒頭に述べた通り、MSC.1/Circ.1621としてIMO暫定ガイドラインが発行されるに留まっており、今のところ強制力のある規則は発行されていない。

メタノールを燃料として使用する船舶の要件の策定に向けた国際的な審議として、IMOでは、2022年の貨物運送小委員会（CCC8）において以下のようなメタノール燃料船の暫定ガイドラインの強制化に向けた審議スケジュールが示された。（CCC8/18 Annex 2）

CCC9（2023）：時間が許せば、メタノール／エタノールに関する強制要件の開発について議論を開始する。

CCC10（2024）：メタノール／エタノールに関する強制要件の開発を進める。

CCC11（2025）：メタノール／エタノールに関する強制要件を最終化する。

3.2 今後の本会の対応

本会は、メタノール燃料船開発における安全性評価を円滑に行い、関係者の利便に供するため、MSC.1/Circ.1621に基づく要件をまとめたガイドラインを代替燃料船ガイドラインA部 第2.0版として2022年に改正発行した。

今後、IMOにおけるメタノール燃料船の強制要件の審議において、現状のMSC.1/Circ.1621の要件

も改めて見直されるものとする。当該審議において本会がこれまで関係者と共に培ってきた知見を活かし、メタノール燃料船の要件がより合理的なものとなるよう貢献していく所存である。



風力補助推進システムに関するEEDI/EEXI認証

三宅 竜二*

1. はじめに

国際海運は、国際間輸送を担い、船籍国、実質支配者、運航者、荷主等の関係が複雑なため、国際海運から排出されるGHGの削減対策については、UNFCCCにおける国別削減対策の枠組みには馴染まないことから、国際海事機関（IMO）に検討が委ねられている。一方、内航海運から排出されるGHGについては、UNFCCCの枠組みにおける国別の排出量にカウントされ、各国で対策が検討されている。

IMOのGHG排出削減に関する取り組みとしては、IMOはGHG削減と経済発展の両立の観点から、個船のエネルギー効率の改善に着目しており、2013年から、設計上の燃費規制のEEDI（エネルギー効率設計指標）と運航上の燃費規制のSEEMP（船舶エネルギー効率管理計画）を実施している。さらに、2018年にGHG削減戦略が合意されたことから、短期対策として、2023年からEEXI（就航船の燃費性能指標）と燃費実績の格付け制度（CII格付け）が開始されている。2023年7月に開催されたMEPC 80において、GHG削減戦略が見直され、新たに「遅くとも2050年頃までにGHGネットゼロ排出を

目指す」という野心的な目標が掲げられた。これを達成するための要素技術の一つとして、風力を補助推進として利用する技術に改めて注目が集まっている。古くから用いられてきた帆の他、大型の帆を船舶に接続し風を受けた帆が本船をけん引するシステム、甲板上で円柱形の装置を回転させマグヌス効果により揚力を生み出すシステムなども既に実用化されており、風力を利用した船舶の補助推進システムは日々進歩している。本稿では、風力補助推進システム（Wind Assisted Propulsion System）のEEDI/EEXIへの反映方法や認証方法について、EEDI/EEXI規制の概要をはじめ、IMO関連ガイダンスの開発経緯、航路影響、インセンティブ付与及び今後の課題を交えながら、詳しく解説する。

2. 代表的な風力補助推進システム

IMOにおいて、新たに「遅くとも2050年頃までにGHGネットゼロ排出を目指す」という野心的な目標が掲げられたため、これを達成するための要素技術の一つとして、風力を補助推進として利用する技術に改めて注目が集まっている。代表的な風力補助推進システムを図1に示す。Hard SailはFRP等の

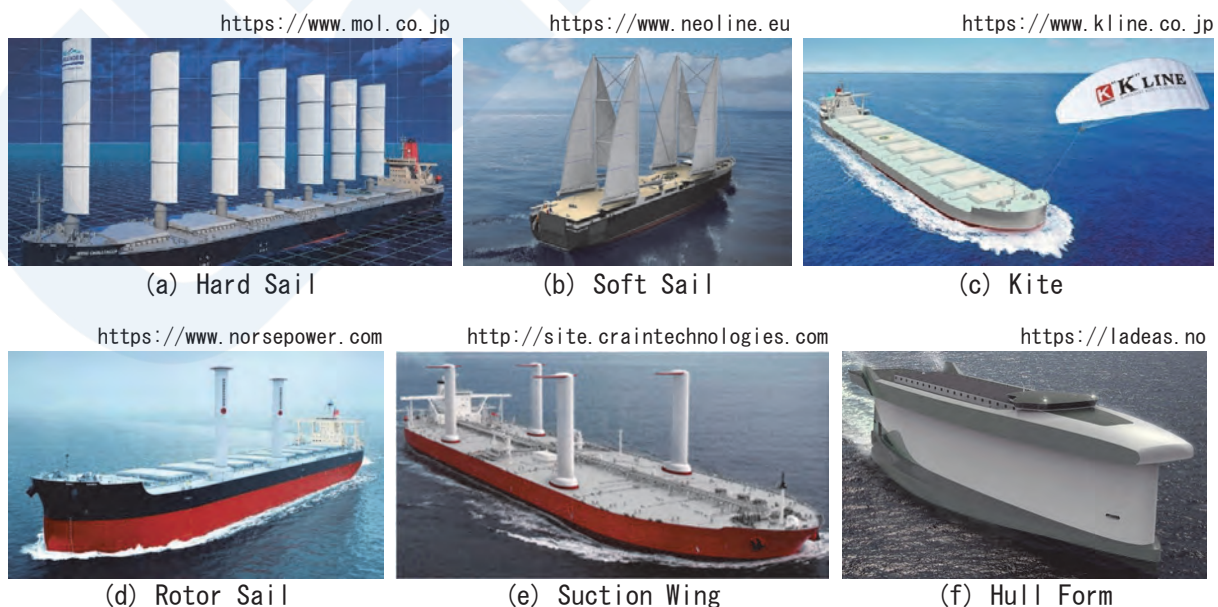


図1 代表的な風力補助推進システム

* 技術研究所

硬翼帆であり、ヨットなどの軟帆と比べて翼形状のため風を推力に変換する効率に優れている。Soft Sailは軟帆が翼形状のフレームに沿って張られているため、硬翼帆と同程度の推進力が得られると言われている。Kiteについては、風は高度が増すにつれて風速が速くなるため、Kiteが高高度の風を受けることで20%以上のGHG削減効果が得られると言われている。Kiteは運航中の展開や回収が課題だが、展開と回収は船首のマストを使い自動で行う設計になっており、Kiteが8の字で旋回し高速で移動することで翼として働き、大きな推進力を得ることができる。Rotor Sailは船舶のデッキ上に円筒型のローターを垂直に搭載し、円筒が風を受けてマグナス効果により推進力を得ることができる。野球のボールが回転によりカーブする原理と同じである。Suction Wingは鋼製楕円形水平断面の帆に吸引スリットを設けて空気吸込み効果により気流の密着度を高めることで高揚力を生み出すことができる。Hull Formは船体自体を翼型にすることで、追加設備がなくても風エネルギーを推進力に変換することができ、水上部分に斜向風が来た時に船体を翼として揚力（主に前縁推力）が発生する原理を利用して推進力を最大化している。

3. 革新的省エネ技術ガイダンスの開発経緯

2013年に開催されたMEPC 65において、風力補助推進システム、空気潤滑システム、廃熱回収システム等の革新的省エネ技術による効果をEEDIの枠組みに組み込むために、「2013年EEDI計算及び認証のための革新的省エネ技術の取扱いに関するガイダンス」¹⁾が承認された。風力補助推進システムについては、本ガイダンスに規定された「風向・風速毎の風による推進力」の推定方法や検証方法をはじめ、「全世界航路における風の発現確率」が未完成だったため、その効果をEEDIに反映させることができなかった。一方、日本では風力補助推進システムの具体的な導入プロジェクトが複数存在しており、業界要望により、その燃費性能を公式に評価できる環境を早期に整備する必要があった。2021年3月に開催されたMEPC 76において、その効果を早急にEEDIに反映できるようにするために、日本は中国やドイツと共に、風力補助推進システムに関する革新的省エネ技術ガイダンスの改正案²⁾を提出した。MEPC 76には、フィンランド、フランス、Comoros, RINAからも風力補助推進システムに関する提案文書が提出されたものの、審議時間の関係上、次回MEPC 77に先送りされ、2021年11月に開

催されたMEPC 77において、MEPC 76の日本・中国・ドイツの改正案²⁾をベースに、フィンランド、フランス、Comoros, RINAの要素を反映した改正案³⁾が承認され、「2021年EEDI及びEEXIの計算及び認証のための革新的省エネ技術の取扱いに関するガイダンス」⁴⁾として発行され、ようやくその効果がEEDI/EEXIに反映できるようになった。

4. EEDI/EEXI規制の概要

EEDI/EEXIは新造時の船舶のスペックの1つで、『効率のポテンシャル』を表す指標である。基本概念としては、式(1)に示す通り、「機関出力」に「燃料消費率」及び「CO₂換算係数」を乗じたものを、「積載能力」及び「船速」で割ることにより計算され、1トンの貨物を1マイル輸送した際に見込まれるCO₂の排出量を表している。指定された船種にのみ適用され、船種ごとに定められたサイズ以上の船舶については、規制値への適合が要求され、それ未満の船舶であれば、規制値の設定はない。

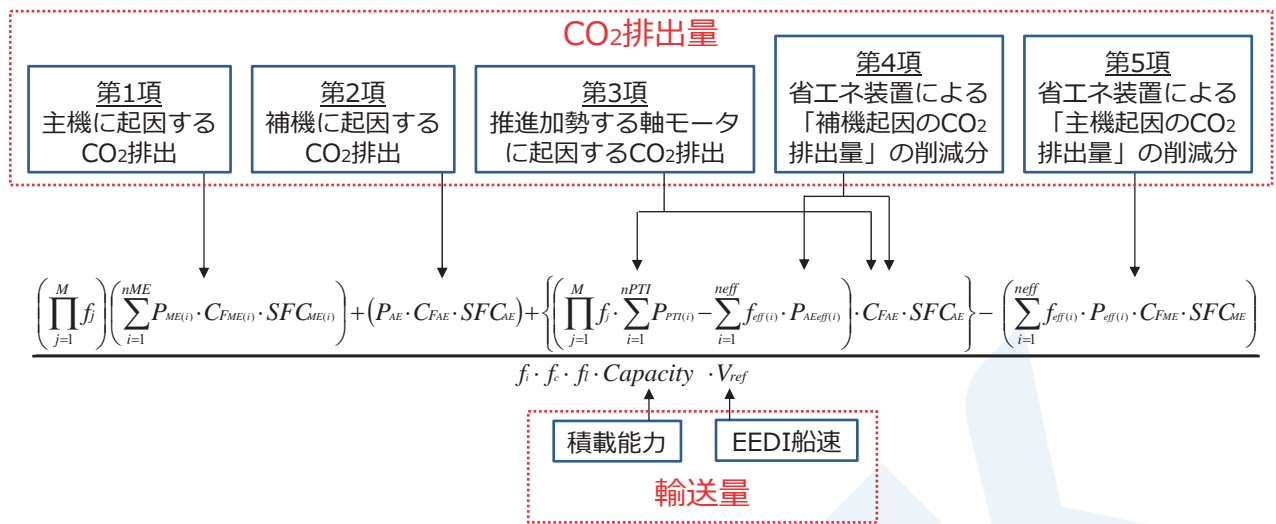
EEDI/EEXI (g/ton・mile)

$$= \frac{\text{CO}_2\text{換算係数} \times \text{燃料消費率(g/kWh)} \times \text{機関出力(kW)}}{\text{積載能力(ton)} \times \text{船速(mile/h)}}$$

(1)

4.1 EEDI/EEXI計算式

図2に示す通り、EEDI/EEXIの計算式は一見複雑に見えるが、その考え方は先の基本概念に基づいている。数式の分子第1項は、主機に起因するCO₂排出量を見積もるためのもので、機関出力、燃料消費率、CO₂換算係数を掛け合わせることでCO₂排出量を計算する。分子第2項は、補機に起因するCO₂排出量を見積もるためのもので、基本的な考え方は第1項の主機の場合と同様である。分子第3項は、推進加勢する軸モータに起因するCO₂排出量を見積もるためのものである。分子第4項と第5項については、省エネ装置を搭載した場合のCO₂排出量控除項で、補機又は主機に起因するCO₂排出量からの省エネ効果による削減分をそれぞれ減算することができる。計算式の分母における積載能力Capacityには、客船を除き、最大夏期満載喫水における載荷重量DWTを用いることが規定されており、船速V_{ref}については、最大夏期満載喫水における75%出力での平水中速力を用いることが規定されている。



P_{ME} :	主機出力 $0.75 \times (MCR_{ME} - P_{PTO})$ [kW] (P_{PTO} は軸発出力であり、軸発搭載時は原則 P_{AE} を上限に控除可能)
P_{AE} :	補機出力 $0.025 \times MCR_{ME} + 250$ [kW] (ただし、 $MCR_{ME} < 10,000$ kWの場合は $0.05 \times MCR_{ME}$)
P_{PTI} :	軸モータによる出力消費の75% [kW]
SFC :	燃料消費率 [g/kWh]
C_F :	燃料油種類別による CO_2 換算係数
Capacity :	DWT (但し、コンテナ船は70%DWT, 客船はGT)
V_{ref} :	平水中、最大夏期満載喫水 (コンテナ船は70%DWT時の喫水) における出力 P_{ME} 時の船速 [knots]

図2 EEDI/EEXI計算式

表1 革新的省エネ技術のカテゴリー

分類	内容		省エネ技術
Category A	推進効率・全抵抗に影響し、パワーカーブに反映されるもの		船尾付加物, 船型改良等
Category B	(B-1)	ON状態であれば常に、主機の出力を減少させるもの	$f_{eff} = 1.0$ 空気潤滑システム
	(B-2)	周辺環境に依存し、主機の出力を減少させるもの	$f_{eff} < 1.0$ 風力推進システム
Category C	(C-1)	ON状態であれば常に補機・モータの出力を減少させるもの	$f_{eff} = 1.0$ 廃熱回収システム
	(C-2)	周辺環境に依存し、補機・モータの出力を減少させるもの	$f_{eff} < 1.0$ 太陽光発電システム

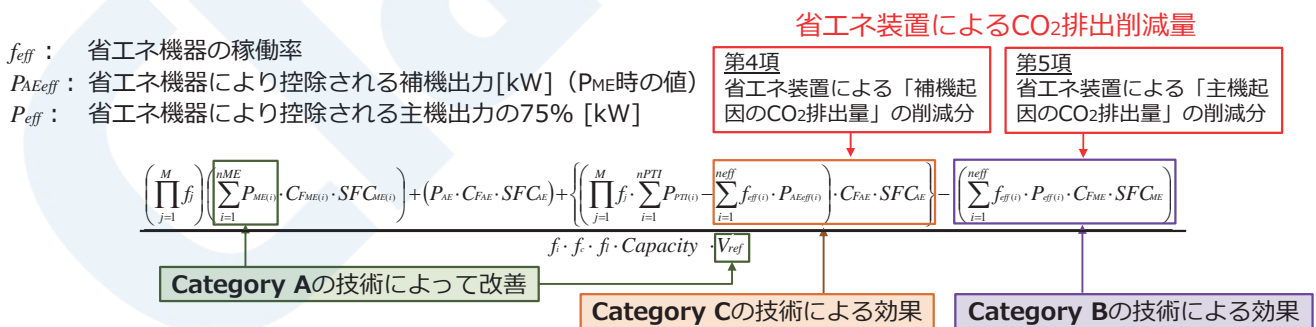


図3 革新的省エネ技術の各カテゴリーにおけるEEDI/EEXIの計算方法

4.2 省エネ技術のEEDI/EEXIへの反映方法

表1に示す通り、革新的省エネ技術は、EEDI/EEXIにおいて、3つのカテゴリーに分類されている。一つ目はカテゴリーAで、推進効率・全抵抗に影響し、パワーカーブに反映されるもので、ダクトやフィンのような船尾付加物や船型改良が該当し、図3に示す通り、その効果は分子第1項の主機

出力や船速に反映される。二つ目はカテゴリーBで、機器を作動させることで主機出力を減少させるもので、空気潤滑システムがカテゴリーB-1に該当し、風力補助推進システムは周辺環境に依存するため、カテゴリーB-2に該当し、その削減分は分子第5項により反映される。三つ目はカテゴリーCで、機器を作動させることで補機やモータの出力を減少させ

るもので、廃熱回収システムがカテゴリーC-1に該当し、太陽光発電システムは周辺環境に依存するため、カテゴリーC-2に該当し、その削減分は分子第4項により反映される。カテゴリーBとカテゴリーCの省エネ機器における具体的なEEDI/EEXIの計算方法や認証方法については、IMOの「革新的省エネ技術ガイダンス」に規定されている。

5. 風力補助推進システムのEEDI/EEXIへの反映方法

風力補助推進システムは主機出力を減少させるが、周辺環境に依存するため、カテゴリーB-2に該当し、その削減分は分子第5項により反映される。革新的省エネ技術ガイダンスに具体的な風力補助推進シ

ステムの計算方法が規定されており、図4に示す通り、風向・風速毎の風による推進力に関する行列 (Wind Force Matrix) と世界の主要航路に基づく全世界航路における風向・風速毎の発現確率に関する行列 (Global Wind Probability Matrix) を掛け合わせることで風力補助推進システムによる推進力を計算し、その推進力を船舶の推進効率で割ることによりプロペラ推進力の減少分を求め、この減少分とシステムの消費電力から主機関からのCO₂削減量を求める。

5.1 Wind Force Matrix

表2に示す通り、Wind Force Matrixは風向・風速毎の風による推進力に関する行列であり、革新的省エネ技術ガイダンスにおいて、風力補助推進システムに応じて、風洞試験、CFD等の数値計算、実

$$\frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}) + \left\{ \left(\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AE_{eff}(i)} \right) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right\} - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f \cdot f_c \cdot f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref}}$$

$$(f_{eff} \cdot P_{eff}) = \left(\frac{1}{\sum_{k=1}^q W_k} \right) \cdot \left(\left(\frac{0.5144 \cdot V_{ref}}{\eta_D} \sum_{k=1}^q F(V_{ref})_k \cdot W_k \right) - \left(\sum_{k=1}^q P(V_{ref})_k \cdot W_k \right) \right)$$

with $F_1 - F_k \geq 0 \wedge F_{k-1} - F_k \geq 0$

(sorting all force matrix elements in descending order)

and $\sum_{k=1}^{q-1} W_k < \frac{1}{2} \wedge \sum_{k=1}^q W_k \geq \frac{1}{2}$

(defining q: the number of elements added in the formula)

$F(V_{ref})_k$: 風向・風速毎の風による推進力に関する行列 (Wind Force Matrix)

W_k : 世界の主要航路よる全世界航路における風向・風速毎の発現確率に関する行列 (Global Wind Probability Matrix)

$P(V_{ref})_k$: 風力補助推進システムの消費電力に関する行列

図4 風力補助推進システムのEEDI/EEXIへの反映方法

表2 風向・風速毎の風による推進力に関する行列 (Wind Force Matrix)

Wind Angle(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115
<1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	3.7	5.0	6.0	6.5	6.7	6.6	6.2
<4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	9.3	13.3	16.6	19.1	21.0	22.1	22.6	22.6	22.0	21.0	19.6
<5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.4	13.5	20.6	26.5	31.4	35.1	37.7	39.2	39.6	39.1	37.8	35.8	33.3	30.5
<6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	19.9	30.1	38.8	45.9	51.4	55.1	57.2	57.7	56.8	54.8	51.8	48.1	43.9	39.4
<7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	22.2	36.5	48.9	59.2	67.2	72.9	76.3	77.4	76.6	74.1	70.3	65.6	60.2	54.5	48.6
<8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.6	37.9	55.1	69.8	81.6	90.3	95.9	98.5	98.5	96.1	92.0	86.6	80.4	73.6	66.5	59.2	52.2
<9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.1	32.5	55.6	75.8	92.7	105.9	115.1	120.4	122.1	120.7	116.8	111.2	104.4	96.8	88.7	80.2	71.4	62.2
<10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.1	48.1	75.1	98.5	117.6	132.0	141.6	146.4	147.0	144.3	139.1	132.1	124.0	115.1	105.6	95.5	85.3	75.1
<11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.4	65.3	96.5	123.1	144.5	160.1	169.8	174.0	173.6	169.6	163.1	154.9	145.6	135.3	124.2	112.6	101.0	90.8
<12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	44.0	84.1	119.7	149.7	173.4	190.0	199.8	203.3	201.9	196.8	189.2	179.8	169.2	157.4	144.7	131.6	119.2	109.0
<13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.1	58.9	104.5	144.7	178.3	204.1	221.8	231.6	234.5	232.1	225.9	217.3	206.8	194.8	181.4	167.0	152.8	140.4	129.2
<14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.8	75.1	126.5	171.6	208.8	236.8	255.5	265.2	267.6	264.3	257.2	247.5	235.8	222.4	207.3	191.4	176.5	165.0	154.8
<15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.4	92.6	150.2	200.3	241.1	271.5	291.1	300.8	302.6	298.5	290.5	279.8	266.9	251.9	235.1	218.0	203.1	193.3	184.2
<16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.8	111.4	175.4	230.8	275.4	308.1	328.6	338.4	339.6	334.8	325.9	314.3	300.0	283.4	265.0	247.0	232.6	225.3	218.2
<17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	53.2	131.5	202.3	263.1	311.7	346.6	368.1	377.9	378.6	373.1	363.5	350.8	335.2	316.9	297.0	278.5	265.4	256.2	249.1
<18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	66.5	152.9	230.7	297.2	349.8	387.1	409.6	419.4	419.8	413.7	403.3	389.5	372.4	352.3	331.2	312.6	301.4	301.1	295.0
<19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	80.8	175.6	260.8	333.1	389.8	429.5	453.0	463.0	463.0	456.3	445.2	430.3	411.7	390.0	367.7	349.4	340.6	344.8	339.5
<20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.9	199.6	292.4	370.8	431.8	473.9	498.5	508.6	508.3	501.1	489.3	473.2	453.0	429.6	406.5	389.1	383.3	392.5	387.2
<21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	111.9	224.8	325.7	410.4	475.6	520.3	546.0	556.3	555.7	548.1	535.5	518.2	496.4	471.4	447.6	431.5	429.5	444.1	439.6
<22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	128.9	251.4	360.5	451.7	521.4	568.7	595.5	606.0	605.3	597.3	583.9	565.4	541.8	515.4	491.2	476.9	479.0	499.6	495.6
<23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	146.8	279.3	396.9	494.7	569.1	619.0	647.0	657.8	657.0	648.6	634.4	614.6	589.4	561.5	537.3	525.2	532.0	558.8	554.8
<24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	165.6	308.4	434.9	539.6	618.7	671.3	700.6	711.8	710.8	702.0	687.1	665.9	639.0	609.9	585.9	576.4	588.4	621.9	618.9
<25	0.0	0.0	0.0	0.0	19.4	185.3	338.8	474.5	586.3	670.2	725.7	756.2	767.8	766.8	757.7	741.9	719.3	690.7	660.4	636.9	630.5	648.3	688.8	684.8
>=25	0.0	0.0	0.0	0.0	23.5	195.5	354.6	494.9	610.3	696.7	753.6	784.7	796.6	795.6	786.3	770.1	746.8	717.4	686.6	663.4	658.7	679.5	723.6	720.6

機による試験から求めることが規定されている。例えば、カイトの場合、模型による風洞試験は難しいことから、実機による試験により妥当性が検証されたCFDで計算することも認められており、風力補助推進システムに応じて、適切な推定手法によりWind Force Matrixを作成する必要がある。

5.2 風速の高度影響の考慮

図5に示すように、地表や海面付近の風は摩擦の影響により風速が上空よりも減少する。地上や海上からの高さによる風速の変化（風速の鉛直分布）を表す式として「べき法則」があり、革新的省エネ技術ガイダンスでは、風速の高度影響を考慮できるように、式(2)に示す通り、ITTCの推奨手法に従い、海上10mの風速を基準とする1/9乗則を採用している。

カイトは上空を飛行することから、飛行高度における風速を用いて推進力を求め、帆も同様に、風速の鉛直分布を考慮して推進力を求めてWind Force Matrixを作成する必要がある。図6に示す通り、300m上空の風速は海上10mの1.46倍となり、100m上空では1.29倍となる。

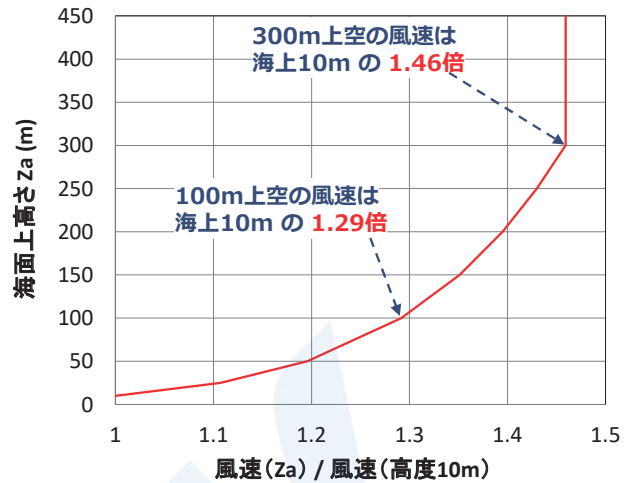


図6 海上における風速の高さ方向分布

5.3 Global Wind Probability Matrix

IMOでは、船舶はあらゆる航路に投入される可能性があるという前提で規則化しており、特定航路ではなく、全世界航路で評価せざるを得ないことから、Global Wind Probability Matrixは、図7に示すように、世界の主要航路に基づく全世界航路における風向・風速毎の発現確率に関する行列として定義されている。航路影響により、EEDI/EEXI上の効果と実際の効果が乖離するが、設計指標によるコンセプトの限界であり、運航指標であるCIIには実際の効果が反映される。

5.4 Wind Probability Matrixによる航路影響

中国⁵⁾によると、図8に示す二本の硬翼帆を搭載したVLCCにおいて、全世界航路によるWind Probability Matrixを使用した場合、そのEEDIの改善効果はたったの1.6%だが、中東-極東航路によるWind Probability Matrixを使用した場合は、16%であることが報告されている。中東-極東航路の場合、横風を受けて航行することが多く、風力補助推進システムにとって理想的な環境であることから、このような極端な差が生じたものと考えられる。

5.5 風力補助推進システムへのインセンティブ付与

航路影響により、EEDI/EEXI上の効果と実際の効果が乖離するため、風力補助推進システムの普及促進への影響を懸念したドイツとフィンランドが風力補助推進システムにインセンティブを与える提案文書⁶⁾をIMOに提出し、審議の結果、この提案が受け入れられた。具体的には、Global Wind Probability Matrixのうち、風力が大きい上位半分成分を残し、残り半分成分を切り捨てる方法で、1/3有義波高の考え方を応用したものであり、明確な物理的根拠はない。ドイツとフィンランドの提案

<https://official.rikanenpyo.jp/posts/6160>

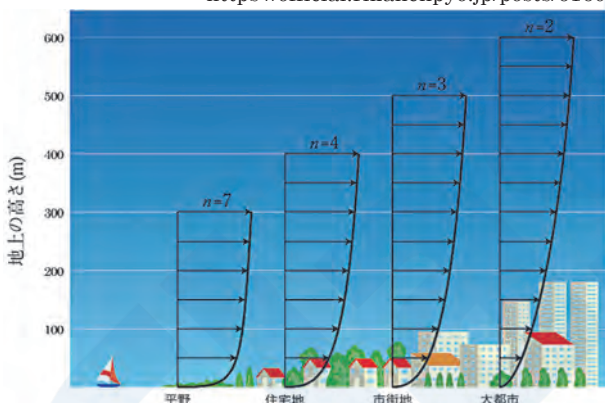


図5 風速の高さ方向分布

$$v_{Zref} = v_{10m} \left(\frac{Z_{ref}}{10} \right)^\alpha \quad \text{for } Z_{ref} < 300m$$

$$v_{Zref} = v_{10m} \left(\frac{300}{10} \right)^\alpha \quad \text{for } Z_{ref} \geq 300m$$

(2)

- Z_{ref} : 海面からの参照高さ (m)
- v_{10m} : 海上10mにおける風速 (m/s)
- v_{Zref} : 参照高さにおける風速 (m/s)
- α : 1/9 (ITTCの推奨手法から引用)

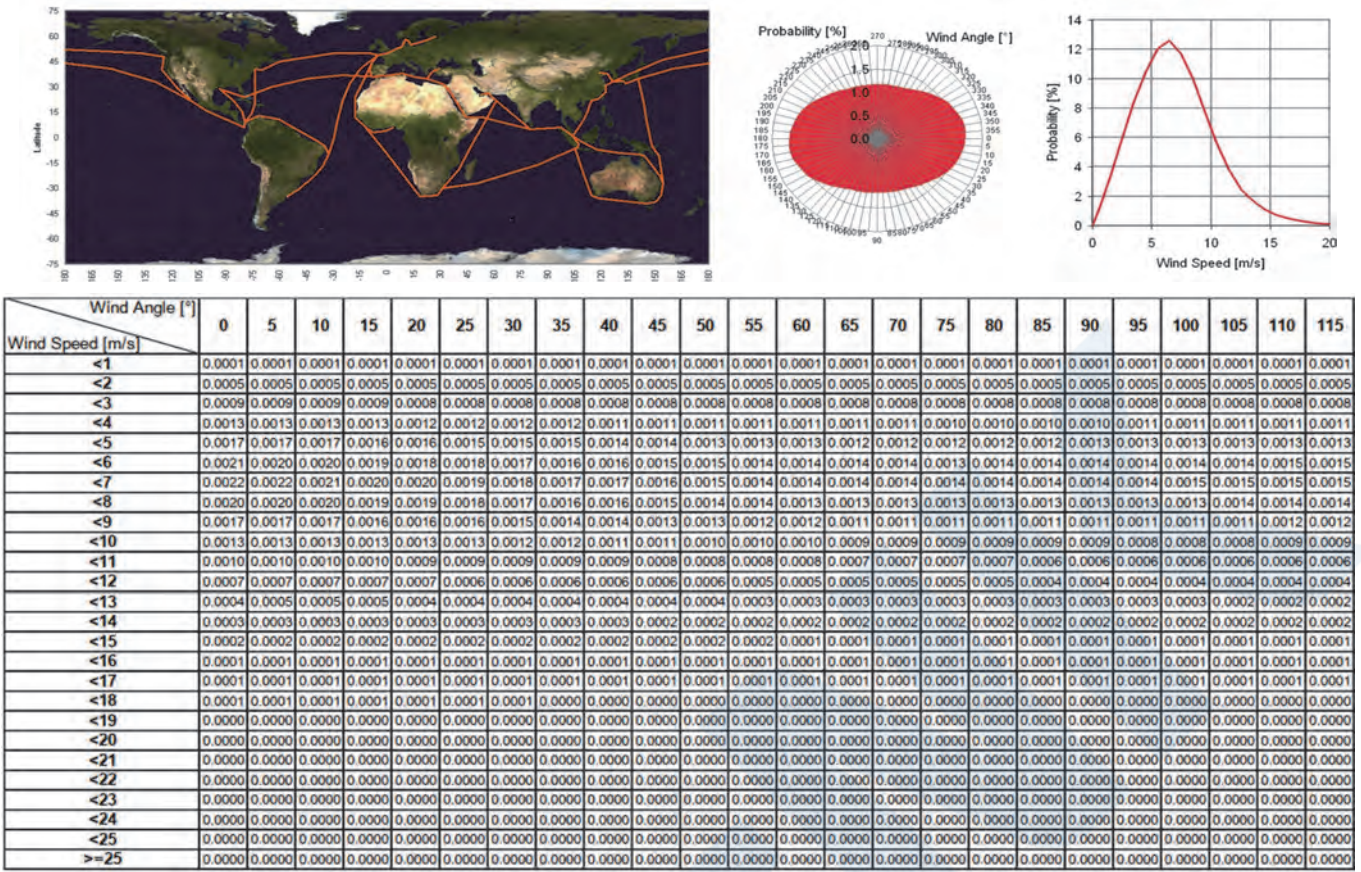


図7 世界の主要航路に基づく全世界航路における風向・風速毎の発現確率に関する行列 (Global Wind Probability Matrix)



図8 二本の硬翼帆を搭載したVLCC (大連船舶重工)



図9 ローターセイルを搭載した 8,660DWT RO-RO貨物船

文書によると、図9に示すローターセイルを搭載した8,660DWT RO-RO貨物船の場合、インセンティブが無い場合はEEDI/EEXIの改善効果は15%で、インセンティブがある場合は30%になることが報告されている。ケースバイケースだが、少なくともこのケースでは、インセンティブによりEEDI/EEXIの改善効果が二倍になることが分かる。

6. 風力補助推進システムのEEDI/EEXI認証

風力補助推進システムのEEDI/EEXI認証では、革新的省エネ技術ガイダンスに従い、予備認証において、Wind Force Matrixの設定根拠を含む各種資料（風洞試験結果、CFD等の数値計算結果、実機による試験結果等）を確認し、最終認証において、装置の構成や搭載を確認することでEEDI/EEXI値を検証する。

7. 考察

革新的省エネ技術ガイダンスの改正にあたり、風力補助推進システムの効果を早急にEEDIに反映できるようにすることが優先されたため、インセンティブの妥当性など、改善の余地が残されていることから、今後、その効果をより適切に評価できるガイダンスの改正（改善）が望まれる。考えられる改善事項は以下の通り。

- 1) EEDI/EEXIは75%MCR時の船速で評価するが、現在、減速運航が常態化しているため、最早、評価船速が実態と乖離している。風力補助推進システムでは船速が遅いほどその効果の割合が高く、EEDI/EEXIは実際の効果を過小評価していることから、今後、船速の補正式等を開発し、導入することが望ましい。
- 2) 船舶はあらゆる航路に投入される可能性があるため、改正ガイダンスでは、特定の航路ではなく、世界の主要航路による全世界航路で評価している。このため、EEDI/EEXI上の効果と実際の効果は乖離するが、設計指標によるコンセプトの限界であり、運航指標のCIIには実際の効果が反映される。しかしながら、世界の主要航路においても、風速・風向が最適な航路が存在するため、今後、その最適航路に基づくWind Probability Matrixを開発し、導入することが望ましい。
- 3) 特定航路における風力補助推進システムの効果を適切に予測（評価）することは、商談上、メーカーや船主等の関係者にとって重要なため、IMOとは関係ないが、IMOガイダンスに、参考情報として、特定航路のWind Probability Matrixが記載されると、関係者にとって大変有益であり、第三者による性能鑑定にも有効活用できる。
- 4) 改正ガイダンスでは、風力補助推進システムにより生じる斜航や当舵の影響が考慮されていないため、今後、その影響について調査し、要すれば、影響の補正式等を開発し、導入することが望ましい。
- 5) 風力補助推進システムにインセンティブを与えるために、Global Wind Probability Matrixのうち、風力が大きい上位半分の成分を残し、残り半分の成分を切り捨てる方法を採用したが、1/3有義波高の考え方を応用したものであり、明確な物理的根拠はないことから、今後、その妥当性を検証し、要すれば改善することが望ま

しい。

- 6) 風洞試験、CFD等の数値計算、実機による試験、海上試運転での試験方法等に関する実施方法や検証方法についても、今後、その詳細を規定することが望ましい。

8. 風力補助推進システムのガイドライン

本会では、船級承認を行うための風力補助推進システムの安全な設計の指針として、2019年に「風力を利用した船舶補助推進装置の設計に関するガイドライン（初版）」を発行しており、本ガイドラインを参照することで、風力補助推進システムの設計において考慮すべき設計要素を押さえることが可能になった。さらに、実プロジェクトや最新の研究開発成果を通じて得られた知見を反映し、2023年に第2版として大幅にガイドラインを更新した。第2版では、風力補助推進システム設計者と船舶設計者の両者が分かり易いようにガイドライン全体の構成を見直し、「風力装置」、「搭載船」、「検査」の3部構成とした上で、それぞれの要件を詳細化及び明確化した。風力補助推進装置の設計、また船舶への搭載にあたって検討すべき点も包括的に確認できるものとなっている。

第2版では、風力補助推進システムの効果に関して、IMOの革新的省エネ技術ガイダンスに従ってEEDIやEEXIに反映できることが規定された。さらに、特定航路における風力補助推進システムの効果についても、別途本会が適当と認める方法により評価できることが規定された。

9. おわりに

風力補助推進システムの効果をより適切に評価できるIMOガイダンスの改正（改善）にあたり、本会は、引き続き技術面で積極的にサポートすることで海運業界に貢献できれば幸いである。さらに、風力補助推進システムに関するEEDI/EEXI認証をはじめ、特定航路における性能鑑定や実際のGHG削減量に関する認証など、様々なGHGに関する第三者認証において、引き続き貢献できれば幸甚である。

参考文献

- 1) IMO : 2013 GUIDANCE ON TREATMENT OF INNOVATIVE ENERGY EFFICIENCY TECHNOLOGIES FOR CALCULATION AND VERIFICATION OF THE ATTAINED

- EEDI, IMO MEPC.1/Circ.815, 2013
- 2) China, Germany and Japan : Draft amendments to MEPC.1/Circ.815 for verification of the wind propulsion system, IMO MEPC 76/6/2, 2021
 - 3) Comoros, Finland, France, Germany, Japan, Spain, Netherlands and RINA : Draft amendments to MEPC.1/Circ.815 for verification of the wind propulsion system, IMO MEPC 77/6, 2021
 - 4) IMO : 2021 GUIDANCE ON TREATMENT OF INNOVATIVE ENERGY EFFICIENCY TECHNOLOGIES FOR CALCULATION AND VERIFICATION OF THE ATTAINED EEDI, IMO MEPC.1/Circ.896, 2021
 - 5) China : Findings on the EEDI assessment framework for wind propulsion systems, IMO MEPC 74/INF.39, 2019
 - 6) Finland and Germany : Additional draft amendments to MEPC.1/Circ.815 for verification of the wind propulsion system, IMO MEPC 76/6/6, 2021

GHG検証 サプライチェーン排出量（スコープ1, 2, 3）入門

事業開発本部 認証部 山本 謙一郎

1. 背景

気候変動とは、地球の気候が長期間にわたって変化する現象を指す。地球温暖化は、気候変動の一つの要因であり、地球上の温室効果ガス（以下GHG, Greenhouse Gasの略称*1）の増加によって地球の気温が上昇する現象を指すが、地球全体に広範な影響を及ぼしており、以下のような現象が報告されている。

- 1) 気温上昇：温室効果ガスの増加によって地球の気温が上昇し、極端な気温の変化や気候パターンの変動が生じる。
- 2) 氷河の融解と海面上昇：温暖化によって氷河や氷床が融解し、海面が上昇する。
- 3) 極端な気象現象：熱波、豪雨、台風などの極端な気象現象が増加、これによって異常な気候条件が発生し、農作物や生態系に影響を及ぼす。
- 4) 生態系への影響：温暖化によって生態系が変化し、生物多様性の減少や生態系の崩壊が懸念される。
- 5) 農業と食料供給：農業生産にも影響を与え、収穫量の減少や食料供給の不安定化が問題となってくる。

GHG排出量の測定と報告は、地球温暖化対策における基礎ともなるもので、いくつかの国際的な基準やガイドラインが設けられている。これらを理解することにより、企業や組織が環境負荷を軽減し、持続可能な経済を実現するための基盤を築くことができる。ここでは、その具体的な基準、ガイドラインを示し、温室効果ガス検証の重要性とサプライチェーンにおける排出量の評価に焦点を当てる。

2. GHG排出量の測定と報告のための国際的な基準やガイドライン

GHG排出量を測定し、報告するための国際的な基準やガイドラインはいくつか存在する。

- 1) 国連気候変動枠組条約（UNFCCC）ガイドラ

イン：国連気候変動枠組条約の下で、各国は自国の温室効果ガス排出量を報告することが求められている。UNFCCCは温室効果ガスの測定、報告、検証に関する国際的なガイドラインを提供しており、各国の報告が国際的に一貫性のある方法で行われるよう支援している。

- 2) GHGプロトコル（Greenhouse Gas Protocol）：企業や組織がGHG排出量を評価し報告するための基準で、スコープ1、スコープ2、およびスコープ3の概念はGHGプロトコルで定義されている。

- 3) ISO 14064：GHGの測定、報告、検証に関する国際標準で、GHG排出量の計測や報告の手法、データ管理、検証のプロセスなどについて包括的な指針を提供している。ISO 14064は下記のような構成となっている。

- ① ISO 14064-1：温室効果ガスの測定と報告—企業のGHG排出量を評価し報告する手法を提供している。

- ② ISO 14064-2：温室効果ガスの測定と報告—プロジェクトベースの取り組みに焦点を当てており、特定のプロジェクトのGHG影響を評価するための手法を提供している。

- ③ ISO 14064-3：温室効果ガスの測定と報告—検証と検証者の資格に関する手法を提供している。

- 4) IASE3410：国際公認内部監査士協会（The Institute of Internal Auditors, IIA）によって策定された国際規格の1つで、主に財務監査人による非財務情報の保証業務の一部として、GHG報告について、焦点が当てられている。環境に関連するデータと報告に対する信頼性を確保し、持続可能性に関する情報の透明性を高めるために貢献するものである。

これらの基準やガイドラインは、組織や国が環境への影響を評価し、持続可能性に向けた取り組みを進める際に以下のような重要な役割を果たしている。

- 1) 透明性と信頼性の向上：これらの基準やガイドラインに従って排出量を測定・報告することで、

*1 国連気候変動枠組条約締約国会議（COP19）で採択された改訂UNFCCCインベントリ報告ガイドライン（Decision 24/CP.19, Annex）で規定されている温室効果ガスは、二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）、一酸化二窒素（N₂O）、ハイドロフルオロカーボン類（HFCs）、パーフルオロカーボン類（PFCs）、六ふっ化硫黄（SF₆）、三ふっ化窒素（NF₃）の7種類

組織や企業の排出量データが透明性かつ信頼性のあるものとなる。これにより、ステークホルダーは正確な情報に基づいて判断を行えるようになる。

- 2) 比較と評価の可能性：これらの基準やガイドラインに基づくデータは、異なる組織や企業、業界間での排出量の比較や評価が可能となる。これにより、業績改善や持続可能性への取り組みが促進される可能性がある。
- 3) 規制遵守とリスク管理：多くの国や地域で、温室効果ガスの排出量に関する規制が存在するが、これらの基準やガイドラインに従ったデータ収集と報告は、これらの規制への遵守を支援し、違反リスクを軽減する助けとなる。
- 4) 持続可能な経営：組織や企業が自身の排出量を測定し、改善することで、環境への影響を低減する取り組みが可能となる。これは長期的な経営戦略やブランド価値の向上に寄与するものである。
- 5) 顧客・消費者の要求への対応：環境への配慮が高まる中で、多くの顧客や消費者が持続可能性に関する情報に興味を持っている。これらの基準やガイドラインに基づく報告は、これらの要求に応えるための一手段となる。
- 6) 国際的な協力と取り組み：これらの基準やガイドラインは国際的に広く参照されており、異なる国や地域での組織間で共通の基準を使用することができる。これにより、国際的な協力や取り組みが促進され、グローバルな課題に対する対応が強化される可能性がある。

これらの基準やガイドラインを利用してGHG排出量を測定することは、組織や企業の持続可能性戦略の一環として、環境への負荷を評価し改善するための重要なステップと言える。どの規格を選ぶかは、組織の目的、業界、地域規制、利用可能なリソースなどに依存する。また大規模な企業や組織は、これらの規格の要素を組み合わせて使用することもある。どの基準やガイドラインを選択しても、これらを適切に理解し遵守することが肝要であるが、ここでは特にGHGプロトコルと、サプライチェーンにおけるスコープ1、スコープ2、スコープ3の排出量を評価するための理論的および実践的な手法について説明する。

3. GHGプロトコルの概要

GHGプロトコルは、GHGの計測・報告・検証(MRV=Measurement, Reporting and Verification

の略語)のための国際的な枠組みである。これは、World Resources Institute (WRI) と World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) によって1998年に共同開発され、企業や組織がGHG排出量を評価し、持続可能なビジネス戦略を策定する際に使用される。GHGプロトコルは、持続可能な経営戦略の一環として、排出量の評価と削減を支援するための重要なツールとして広く受け入れられており、主に企業や組織が自身のGHG排出量を評価し、環境への影響を管理する際のツールとして使用されている。

GHGプロトコルは次のような特徴をもっている。

- 1) カバーする排出源：企業の活動全体にわたってGHG排出量をカバーする。これには、燃料の燃焼やプロセスからの排出、消費する電力の発電過程による排出、サプライチェーンや製品のライフサイクルに関連する他の排出などが含まれる。
- 2) GHG排出量算定報告の手法：各スコープに対するGHG排出量算定報告手法を提供する。企業は、自社の活動に起因するGHG排出量を詳細に測定し、報告するための適切な手法を選択することが求められる。
- 3) 企業の持続可能性への対応：企業が持続可能な経営戦略に向けた取り組みを支援する。GHG排出量の評価に基づいて、企業は省エネルギー策や再生可能エネルギーの導入などの対策を講じ、環境への負荷を軽減し、持続可能なビジネスモデルを構築することが可能となる。
- 4) 国際的な標準化：国際的な共通の枠組みとして広く認知されており、世界各国の企業や組織が利用している。これにより、異なる国や地域でのGHG排出量の評価と比較が容易になる。

GHGプロトコルの実際の章立ては、以下の通りである。

第1章：GHG排出量の算定及び報告の原則 GHG

排出量の算定及び報告原則のガイダンス

第2章：ビジネスの目標とインベントリの設計

第3章：組織の境界の設定 組織境界を設定するためのガイダンス

第4章：運営境界の設定 運営境界の設定に関するガイダンス

第5章：GHG削減量の算定

第6章：経年活動データの設定 経年的パフォーマンス・データの設定に関するガイダンス

第7章：GHG排出量の識別と計算

第8章：インベントリの質の管理

第9章：GHG排出量の報告 GHG排出量算定報告

のガイダンス

第10章：GHG排出量の検証

4. GHGプロトコルによるGHG排出量の算定

GHGプロトコルは、GHG排出量の算定のためスコープ1、スコープ2、スコープ3の分類を提供している。

1) スコープ1：直接排出量＝事業者自らによる温室効果ガスの直接排出（燃料の燃焼、工業プロセス）

スコープ1は、企業の直接的な活動に起因するGHG排出量を示す。具体的には、以下のようなGHGの排出が含まれる。

- ① 燃料の燃焼：企業が所有する燃料を使用した際に発生するGHG排出量。例えば、ガソリンやディーゼルの車両の排出、ガスボイラーの燃焼などが含まれる。
- ② プロセスからの排出：企業の製造プロセスや産業プロセスによって発生するGHG排出量。例えば、セメント製造や鉄鋼生産などが含まれる。
- ③ 漏洩：企業の活動によって意図せずに発生するGHG排出量。例えば、冷却液のリークやメタンガスの漏洩などが含まれる。

スコープ1のGHG排出量は企業自身が直接コントロールできるものであり、燃料の使用や製造プロセ

スの最適化などによって削減が可能となる。

2) スコープ2：間接排出量＝他社から供給された電気、熱・蒸気の使用に伴う間接排出

スコープ2は、企業の活動に間接的に関連して発生するGHG排出量を示す。主に電力消費、熱・蒸気の使用によるGHG排出が含まれる。

3) スコープ3：その他間接排出量＝スコープ1、スコープ2以外の間接排出（事業者の活動に関連する他社の排出）

スコープ3は、企業の活動に間接的に関連して発生する他のGHG排出量を示す。これには企業のサプライチェーンや製品のライフサイクルなどが含まれる。スコープ3のGHG排出量は企業自身が直接コントロールすることが難しく、サプライチェーンの協力や顧客への影響などが考慮される。しかし、サプライチェーン管理や製造プロセス等の改善によって削減が可能となる。具体的には、以下のような排出が含まれ、15のカテゴリに分類されている。

- ① サプライヤーからの調達：企業が原材料や製品を調達する際に発生するGHG排出量
- ② 製品使用：企業が製造した製品を消費者が使用する際に発生するGHG排出量。例えば、事務用品、購入した各種サービスによる排出量などが含まれる。
- ③ 廃棄物処理：廃棄物の処理を外部に委託する際に発生するGHG排出量



出典 環境省資料 「サプライチェーン排出量の算定と削減に向けて」

□ スコープ3における15のカテゴリ

Scope3カテゴリ		該当する活動（例）
1	購入した製品・サービス	原材料の調達, パッケージングの外部委託, 消耗品の調達
2	資本財	生産設備の増設（複数年にわたり建設・製造されている場合には、建設・製造が終了した最終年に計上）
3	Scope1, 2に含まれない燃料及びエネルギー活動	調達している燃料の上流工程（採掘, 精製等） 調達している電力の上流工程（発電に使用する燃料の採掘, 精製等）
4	輸送, 配送（上流）	調達物流, 横持物流, 出荷物流（自社が荷主）
5	事業から出る廃棄物	廃棄物（有価のものは除く）の自社以外での輸送, 処理
6	出張	従業員の出張

7	雇用者の通勤	従業員の通勤
8	リース資産（上流）	自社が賃借しているリース資産の稼働 （算定・報告・公表制度では、Scope1,2 に計上するため、該当なしのケースが大半）
9	輸送、配送（下流）	出荷輸送（自社が荷主の輸送以降）、倉庫での保管、小売店での販売
10	販売した製品の加工	事業者による中間製品の加工
11	販売した製品の使用	使用者による製品の使用
12	販売した製品の廃棄	使用者による製品の廃棄時の輸送、処理
13	リース資産（下流）	自社が賃貸事業者として所有し、他者に賃貸しているリース資産の稼働
14	フランチャイズ	自社が主宰するフランチャイズの加盟者のScope1,2 に該当する活動
15	投資	株式投資、債券投資、プロジェクトファイナンスなどの運用
	その他（任意）	従業員や消費者の日常生活

出典 環境省資料「サプライチェーン排出量の算定と削減に向けて」

5. サプライチェーンGHG排出量算定の手順

サプライチェーンGHG排出量評価の手順には、データ収集と測定、GHG排出量計算の方法論、不確実性の考慮が含まれる。以下にそれぞれの詳細を述べる。

1) データ収集と測定

データ収集と測定により、サプライチェーン内のさまざまな活動によるGHG排出量を把握する。主な手順は以下の通り。

- ① スコープの確定：まず、評価の対象となるスコープ（スコープ1、スコープ2、スコープ3）を決定する。サプライチェーン内の活動に対して適用するスコープを明確にすることが重要である。
- ② データ収集計画の策定：サプライチェーン内の活動を理解し、データ収集の範囲と頻度を計画する。サプライチェーンに関与するサプライヤーや協力企業との連携が必要な場合もある。
- ③ データ収集：データ収集計画に基づいて、エネルギー使用量、燃料の使用量、原材料の調達量などのデータを収集する。これらのデータは、サプライチェーン内の各活動によるGHG排出量の評価に必要となる。
- ④ 測定の精度向上：可能な限り正確なデータを収集することが重要である。測定機器の精度向上など、測定の信頼性を高めるための取り組みが必要となる。

2) 排出量の算定

サプライチェーンGHG排出量を計算する際には、スコープごとに適切な計算方法論を使用する。以下に、それぞれのスコープの計算方法論について簡単に説明する。

① スコープ1（直接排出量）

- 1. 使用する燃料の種類（石油、天然ガスなど）および消費量＝活動量、特定のプロセスにおいて発生するGHG排出量＝活動量を収集
 - 2. 各燃料に対して、燃焼時に発生する温室効果ガスの排出係数を確認
 - 3. 温室効果ガス排出量（tCO₂e）＝活動量×排出係数（活動量当たりの排出量）となる。
- ② スコープ2（間接的エネルギー関連排出量）
- 1. 購入した電力、蒸気、冷暖房などのエネルギーの使用量＝活動量を収集
 - 2. 使用したエネルギーの種類に応じて、それに対応する排出係数を確認
 - 3. 温室効果ガス排出量（tCO₂e）＝活動量×排出係数（活動量当たりの排出量）となる。
- ③ スコープ3（その他の間接排出量）
- スコープ3は各カテゴリに分かれるが、各カテゴリの排出量の算定方法には以下-1.及び-2.の2種がある。また、-3.に計算例を示す。
- 1. 関係する取引先から排出量の提供を受ける方法（一次データを利用する方法）
 - 2. 取引先から「@年度の貴社向け生産に係る総排出量は**トンでした」のような報告を受ける。「排出量＝活動量×排出原単位」という算定式を用いる方法
 - ・ 活動量を自社で収集
 - ・ 排出原単位は、外部データベースや取引先から得る
 - 3. 計算例
 - ・ 原材料調達に関連する排出量計算（カテゴリ1）：
 - 製品の生産に必要な原材料や部品の調達量を収集
 - 各原材料や部品の生産に関連する排出係数を確認し、調達量と排出係数を掛けて排出

量を計算

- ・ 製品輸送に関連する排出量計算（カテゴリ4）
 - 製品の輸送距離や輸送手段（トラック、船、飛行機など）を収集
 - 輸送距離や手段に応じた排出係数を確認し、輸送量と排出係数を掛けて排出量を計算
- ・ 通勤や出張に関連する排出量計算（カテゴリ6）：
 - 従業員の通勤や出張の距離や手段を収集
 - 距離や手段に基づいた排出係数を確認し、通勤や出張の量と排出係数を掛けて排出量を計算
- ・ 廃棄物処理に関連する排出量計算（カテゴリ5, 12）：
 - 廃棄物の種類や処理方法（廃棄、リサイクル、焼却など）を収集各処理方法に対する排出係数を確認し、廃棄物の量と排出係数を掛けて排出量を計算

*環境省等のガイダンス等を参照するとよい。

https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/estimate.html

3) 不確実性の考慮

サプライチェーンGHG排出量評価では、計測やデータ収集に伴う不確実性を考慮することが重要である。データの不確実性が排出量の評価に与える影響を理解し、信頼性の高い結果を得るための手法として以下の点を考慮する。

- ① 不確実性の評価：データの収集や測定に伴う不確実性を評価する。
- ② 不確実性による影響：データの不確実性が排出量に与える影響を考慮して、修正を加えることがある。修正は、不確実性を考慮した統計的手法に基づいて行われる。
- ③ 不確実性の報告：不確実性の評価結果は、GHG排出量のレポートに適切に報告する。これにより、評価結果の信頼性を明確に示すことができる。

サプライチェーンGHG排出量評価は複雑なプロセスであり、データの収集と測定、GHG排出量計算の方法論、不確実性の考慮を適切に行うことが正確な評価結果を得るために不可欠となる。

6. GHG排出量算定報告の第三者検証の意義

GHG排出量算定報告は、組織や企業が発生させる温室効果ガスの排出量を定量的に評価するための手段である。第三者検証は、このGHG排出量算定報告の信頼性と正確性を確保するために非常に重要

な役割を果たす。以下に、GHG排出量算定報告における第三者検証の意義をいくつか説明する。

1) 信頼性と透明性の向上

第三者検証は、GHG排出量算定報告が信頼性のあるものであることを確認する手段となる。独立した第三者検証機関による検証が行われることで、情報の正確性と透明性が高まる。これにより、GHG排出量算定報告の内容や方法論に対する信頼が向上し、ステークホルダーは組織の環境パフォーマンスに対する情報をより信頼して受け入れることができる。

2) 法的要件と規制への適合

一部の国や地域では、特定の規制や法的要件に基づいてGHG報告が求められることがある。第三者検証は、これらの要件を満たすために重要な役割を果たす。検証を受けたGHG排出量算定報告は、法的な信頼性を持ち、規制への適合をサポートする。

3) 内部管理の向上

第三者検証は、組織内でのプロセスやデータの管理方法に関する洞察を提供する。検証プロセスによって、インベントリの作成方法やデータ収集の信頼性に関する改善点が浮き彫りにされ、組織は自身の環境管理プロセスを向上させるための情報を得ることができる。

4) 外部報告の強化

GHGインベントリは、投資家や顧客、サプライヤーなど、外部のステークホルダーに向けた報告の基盤となる。第三者検証を受けたGHG排出量算定報告は、これらのステークホルダーに対して、独立した専門家によって検証された情報を提供することができる。これにより、組織の信頼性と透明性が高まり、外部とのコミュニケーションが強化される。

第三者検証はGHGインベントリの信頼性と価値を高めるために不可欠な要素となる。組織が環境への影響を評価し、改善策を推進する過程で、第三者検証を取り入れることで、より効果的な持続可能性の実現が可能となる。

7. GHG排出量算定報告とデータの利用

GHG排出量算定報告とデータの利用に関する重要な点として、GHG排出量の評価結果の理解、結果の報告と透明性、GHG削減戦略の策定と改善がある。

1) GHG排出量の理解

GHG排出量の理解を進める事は、企業や組織の持続可能性への取り組みや環境への影響を理解する上で重要な情報源となる。

- ① 前年度との比較：過去の結果と比較すること

で、GHG排出量のトレンドや改善の進捗を把握する。

- ② 業界ベンチマーク：同業他社や業界全体の平均と比較することで、自社のパフォーマンスを評価する。
- ③ スコープの重要性：スコープ1、スコープ2、スコープ3のカテゴリごとに、排出量の重要性和影響を理解する。
- ④ リスクと機会：気候変動のリスクや持続可能なビジネスモデルの機会を特定するのに役立つ。

2) 結果の報告と透明性

GHG排出量算定報告は、内部利害関係者や外部利害関係者と共有することが重要である。透明性のある報告は、企業の信頼性を高めるだけでなく、持続可能性への取り組みを示す重要な手段となり得る。

- ① GHG排出量算定報告：GHG排出量算定報告には、計測方法、不確実性の評価、取り組みの進捗状況などが含まれる。
- ② 外部報告：GHG排出量算定報告は、CSRレポート、持続可能性報告書、公式ウェブサイトなどを通じて外部報告に利用できる。
- ③ 持続可能性報告指針：国際的な持続可能性報告指針（例：GRIガイダンス）に基づいて報告することで、透明性を確保する。

3) GHG削減戦略の策定と改善

GHG排出量算定報告を元に、GHG削減戦略の策定と改善を行う。これにより、GHG排出量を減少させ、持続可能なビジネスに向けた取り組みを進めることができる。

- ① GHG削減目標の設定：GHG排出量算定報告の結果を踏まえて、適切なGHG削減目標を設定する。目標は具体的、計測可能、現実的、計画的な設定を考慮する。
- ② GHG削減戦略の構築：排出量の大きい活動への対策や再生可能エネルギーの導入、エネルギー効率の改善などの戦略を策定する。
- ③ 持続的改善：GHG削減戦略の実施後も、定期的な検証と改善を行う。達成された成果や課題を把握し、戦略の改善を継続的に進めることが重要となる。

GHG排出量算定報告のデータの利用は、企業や組織の持続可能性への取り組みを具体化するために重要な役割を果たす。透明性のある報告とGHG削減戦略の策定と改善によって、より持続可能な経営戦略に寄与する事が可能かと考えられる。

8. GHG排出量算定報告における課題と解決策

GHG排出量算定報告にはさまざまな課題が存在する。以下に、それぞれの課題と可能な解決策について述べる。

1) データの入手と品質

- ・ 課題：GHG排出量算定報告では、多くのデータが必要となるが、データの入手が困難な場合やデータの品質が十分でない場合がある。特にサプライチェーンの情報収集が難しいことがある。
- ・ 解決策：
 - サプライチェーンのデータ収集を改善するために、サプライヤーとの協力を強化し、データ提供の為の合意形成が重要である。
 - データ収集プロセスを自動化する技術等を活用することで、効率的なデータ収集を実現できる。
 - データの信頼性を向上させるために、校正や検証プロセスを導入し、データ品質を確保する。

2) メソドロジーと標準化の問題

- ・ 課題：GHG排出量算定報告は複雑なプロセスであり、メソドロジーの違いや標準の欠如が問題となることがある。異なる手法や基準による計算結果の相違が生じる可能性がある。
- ・ 解決策：
 - GHGプロトコルやISO14064-1などの国際的な基準を導入することで、計算手法を統一する。
 - 業界団体や専門家の協力を得て、標準的なメソドロジーを策定し、産業全体で共通の基準を確立する。
 - 透明性を持ちながら、採用したメソドロジーと計算手法をレポートに記載することで、他者による評価と比較が可能となる。

3) ステークホルダーとのコミュニケーション

- ・ 課題：GHG排出量算定報告の結果や持続可能性の取り組みに対して、ステークホルダーとのコミュニケーションが十分に行われていない場合がある。ステークホルダーの期待に応えるためには、透明性と対話が重要である。
- ・ 解決策：
 - GHGレポートやCSRレポートを公開し、GHG排出量評価結果をステークホルダーと共有する。
 - ステークホルダーとの定期的なダイアログを重視し、フィードバックを収集して持続

可能性戦略の改善に活かす。

- ・ ステークホルダーの関心や期待に合わせて、重要な問題に対して具体的な対策を講じることで、信頼関係を築く。

これらの課題への対処は、GHG排出量算定報告の信頼性と持続可能なビジネス戦略の実現にとって非常に重要である。データの品質向上や標準化の推進、ステークホルダーとの透明なコミュニケーションによって、企業はより持続可能なビジネスモデルを確立することができる。

9. 今後の展望

- 1) 技術の進化とデータの精度向上：データ収集や測定において、新たな技術の導入やデータ精度の向上が期待される。これによりGHG排出量算定報告の信頼性が向上するとともに、サプライチェーンの持続可能性向上に貢献することが期待される。
- 2) グローバルな標準化の推進：国際的な標準化の推進が進むことで、GHG排出量算定報告のメソドロジーの統一が進むと期待される。これにより企業間の比較が容易になり、持続可能性の評価が向上することが期待される。
- 3) ステークホルダーとの協力強化：ステークホルダーとのコミュニケーションを強化し、ステークホルダーの要望を踏まえたGHG排出量算定報告と持続可能なビジネス戦略の実践を進めることが重要である。
- 4) サプライヤーとのパートナーシップ強化：サプライチェーンの持続可能性向上において、サプライヤーとの協力と連携を強化することが必要である。企業とサプライヤーが共に持続可能なビジネスモデルを推進することで、持続可能性の実現がより可能となる。

本会ではGHG排出量算定報告の認証事業を多数手掛けているが、これに派生して、海運、空運をはじめ陸運を含めるロジステック分野における排出量、クレジットを用いた排出量のオフセット、鉄鋼メーカー向けにマスバランス方式を利用したグリーンスチール、環境省が主催するSHIFT事業、Jクレジット事業等々認証事業の拡大、また審査件数の拡大が著しい。引き続き市場需要に応える、多様な認証事業を、高い品質を維持して提供できるよう努めている。

以上

参考文献

環境省 地球温暖化対策 ウェブサイト
ISO14064シリーズ, GHGプロトコル文書類

安全関連システムのRAMSによる管理の考え方とその適用

吉永 純*

1. 鉄道のRAMSについて

1.1 RAMSの概要

RAMSは、Reliability（信頼性）、Availability（アベイラビリティ）、Maintenability（保守性）のRAMと、Safety（安全性）の4要素を表すもので、鉄道分野向け機能安全規格、IEC 62278「RAMS」の通称である。

「鉄道RAMS」と呼ぶべきかもしれないが、他にRAMとSafetyを併記した国際規格は無く、世界的にも定着しているため、本稿ではRAMSと表記する。

RAMSは、鉄道製品に要求されるRAM及びSafetyの4要素に関する要求事項を実現し、かつ実証（すなわち根拠のある説明ができること）するための手順を定めている。海外の鉄道プロジェクトでは急速にデファクト化し、安全上重要な製品にはRAMSへの適合性が要求されている。

しかし、鉄道にはIMOに相当する国際的な枠組みは無く、一部の国を除いて法的な義務もないため、当事者間の仕様書でRAMSの適用を決めるのが一般的である。日本国内の案件ではRAMSが要求されることは無いものの、RAMSを活用できる鉄道製品メーカーは徐々に増えている。

RAMSは、鉄道分野以外の機能安全規格と比べ、安全性（S）を重視しつつも、RAM及びSafetyの各ファクター間及びライフサイクルコスト（LCC）とのバランスの重要性に言及されている点が特徴的である。

本稿では鉄道のRAMSを例として、RAMSの管理手法によるメーカー及びユーザーの製品開発及び製品使用時の管理法や、従来のトラブルゼロを目指す考え方との違いなど、特徴的な点を述べる。

1.2 RAMSが広がる理由

海外の鉄道事業者の立場では、想定外のリスクが生じない安全な製品を調達するため、メーカー（インテグレータを含む。）にRAMSに適合した手順で、着実な製品開発を行うことを求めている。

このRAMSによる製品開発を大づかみして頂くため、椅子の開発を例示したい。なお、RAMSは本来、




プログラムを内蔵した製品を対象としている。

一般的に椅子を開発する時、基本形状を考えた上で、足の強度や材質を検討するのではないだろうか。

これは「荷重による破損」リスクに対し、「どれだけの荷重に耐えればよいか」と目標を考え、「その値以上の強度を持たせる」と、リスクへの安全対策を頭の中で検討している、と考えられる。

図1では3種類の椅子を作ろうとしているが、直観的に（2）や、可動部のある（3）の椅子には多くの危険性（リスク）を挙げられると思う。次に、これら挙げられたリスクへの安全対策を考えていく。

（3）の椅子に懸念される「指を挟む」リスクに、「異物検知機能（センサー）」が不可欠な対策と考えた場合、高額な高信頼性センサーを選ぶのは、おそらく早計である。むしろ、手頃な価格のセンサーを複数使って、見逃しを防ぐ機構としたほうが合理的なためである。このような検討が、RAM及びSafetyの4要素のバランスの考慮に該当する。

【仮想プロジェクト】 椅子の開発 【Imaginary project】 Development new chairs	(1)箱型 Box chair	(2)普通 Normal	(3)リフト Seat lift
			
開発段階 Development stage			
1. 機能・部品構成を考える Functions/parts definition	少数 few	中 several	多数 many
2. リスクを挙げる Risks consideration	少数 few	中 several	多数 many
3. 安全対策を考える Safety measures consideration	少数 few	中 several	多数 many
4. 製品の安全性の確認 Safety confirmation	☑	< ☑	<< ☑
製品リリース Product Release	→		
使用段階 Use-stage			
1. 保守 Maintenance	可能ならば if required		必須 essential
2. 設計の正しさの確認 Validation of overall design correctness			

全活動の文書化
documentation of
all activities

図1 リスクベースの製品開発イメージ

安全対策はハードウェア、ソフトウェアに限られず、ユーザーの使用方法、定期点検等、さまざまに

* 独立行政法人自動車技術総合機構 交通安全環境研究所 交通システム研究部 研究員（元国土交通省鉄道局 車両工業企画室長）

対策する。しかし、それでも残る一定水準以下のリスク（残存リスク）は、許容する。RAMSでは、上記の一連の検討は部品や機能ごとに、計画に従った手順で進め、要所では実施結果を多層的に検証する。最終的に、すべての活動の計画、実行、判断材料等を文書化し、立証資料とする。

RAMSなどの機能安全規格の手順では、複雑な機能をもつ製品ほど作成する文書量は増大するが、RAM及びSafetyに関する要求事項に対して十分な検討や対策を、機能安全規格に基づいて開発を行ったことを立証できる。また、ユーザーとメーカーの責任範囲も明確になる。

これに対し従来の手法は、例えば、「家具のガイドラインに整合している」のように、技術基準等への適合性により一定の安全性が示せるが、技術基準等が想定するリスクの範囲は明確ではない。

海外案件では、製品ユーザーが必ずしも専門家ではないため、安全と言える根拠や、RAMの見通しを説明する必要がある。メーカーの常識はユーザーの常識ではないため、もし誤解があると後々トラブルとなることから、RAMSで製品が想定しているリスクの範囲や判断根拠、メーカーとユーザーの責任分担の分かる文書の作成が要求されており、これら文書で確認できることが重要となる。

椅子の例では、万一事故が生じた際、これら文書によりメーカーの開発過程で安全要求事項及びRAM要求事項を満たし（図2）、機能安全規格に従った手順で開発したシステムだ、と安全性の根拠を機能安全規格に求めることができる。また、事故の原因究明も客観的に行える。

一方、従来手法では、開発手順の拠り所はISO 9001ベースとなり、手順の妥当性を示すことには労力を要すると思われる。

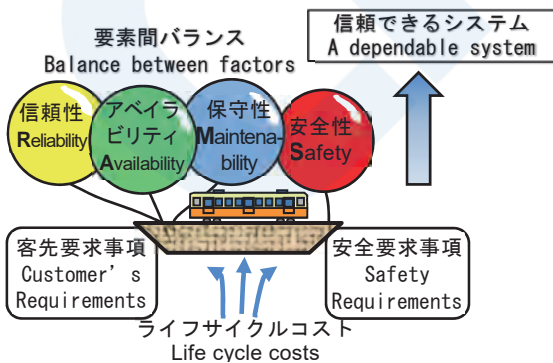


図2 機能安全を拠り所としたシステム開発

2. 機能安全規格

2.1 概要

ここまで述べてきた機能安全とは、安全に関係するシステム・装置の安全性を保つための手法の1つである。機能安全では、システムや装置には何らかのリスクが内在していると考えられる。故障や人為的なミス等によってそのリスクが顕在化した場合にも、許容できないような被害は生じないシステム・装置を「安全機能（safety function）」により実現することで、安全を確保する手法である。

国際規格IEC 61508シリーズ「電気・電子・プログラマブル電子系（E/E/PE）安全関連系の機能安全」が発行され、国内ではJIS C 0508が対応している。

日本でも、従来は安全基準への適合性によって安全性を確認していた装置が、IT技術により複雑化、リスクが見えにくくなったことに伴い、安全性の立証に機能安全を適用するケース²⁾など、新たなリスクマネジメント手法として利用され始めている。

2.2 産業分野別の機能安全規格

機能安全規格IEC 61508は、全産業向けの安全機能に使用されるE/E/PEが対象で、メーカーやユーザーも適用対象であり、抽象度の高い語句で記述されているため業務のイメージをつかみにくい。

そのためRAMSのような、特定の産業分野向けに、検討すべき指標や開発段階が製品の特長に合わせた機能安全規格の開発が進められている（表1）。船舶分野に対する規格は、現状では発行されていない。

表1 機能安全規格の体系 ^{2) 3)}

分類	該当規格の例
基本安全規格 Basic safety publication	IEC 61508 (JIS C 0508) 機能安全
グループ安全規格 Group safety publications	IEC 62278 鉄道RAMS IEC 62279 鉄道ソフトウェア安全 ISO 26262 自動車電子制御 IEC 62061 産業機械類 ISO 13849 機械類の制御システム安全関連部 IEC 61513 原子力分野

3. RAMSの考え方

3.1 製品ライフサイクルの品質管理

機能安全では、製品の構想段階から使用終了段階まで、製品ライフサイクルをフェーズに分け、各フェーズで行うべき要求事項を規定する。

IEC 61508の場合は16段階、RAMSでは一部の段階を統合しているため14段階だが、詳細は割愛する。

ライフサイクルの各段階を一般化し、かつ、大きく

くりすると図3の点線部のように3つに分類できる。

製品のリリースは、「設計段階」と「営業段階」の間にあたる。リリースをもって製品開発業務が一段落し、点検修理等のアフターセールスの範疇となることが一般的と思われるが、RAMSの場合、リリースの後のRAMやSafetyに関して行う活動も製品開発の一連の業務として、一貫した活動計画をメーカーが事前に作成することを要求している。

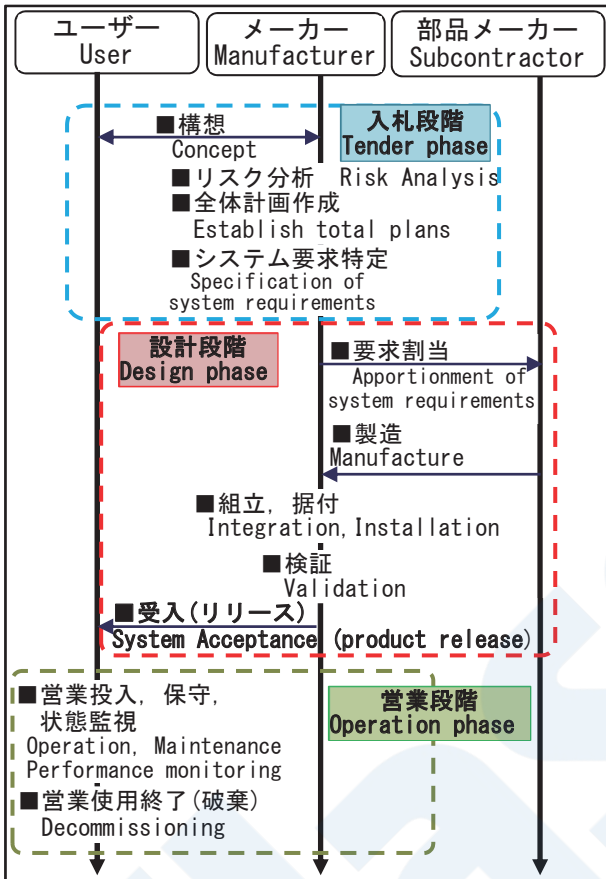


図3 製品ライフサイクルにおける活動

作成する計画は、安全性は「Safety Plan」、RAMは「RAM programme」と呼ばれるが、実際の書類名は任意である。両計画とも、製品の目標、達成のための方策、人員体制、設計・製造・検証方法や作成する文書等の管理活動を計画する。

さらに、営業段階において、設計時に算出したRAM目標の状況確認方法、設計時に前提としたメンテナンス方法も記述される。これらは後述するように、ユーザーに引き継がれる情報となる。

こうしたRAMSに基づく活動は、組織の品質管理システムと関連して実施することがRAMSの必須要求(“shall” requirement)であり、品質管理システムはRAMSにおいて重要な位置付けである(図4)。

両計画とも製品設計開始前に作成され、大枠の事項が書かれるが、RAMSではライフサイクル全体を

通じた首尾一貫した計画があることが重視される。なぜなら計画すれば計画の実施をチェックでき、計画に無い手順による勝手な仕様の追加や修正等無秩序な活動が行えないこと(無秩序な行動は、妥当性確認ができず、潜在リスク増大の可能性がある)、ユーザーへ必要情報を漏れなく伝えられることなど、製品ライフサイクル全体にわたって品質を管理できるためである。3.2.2に後述するように、ソフトウェアの品質確保の上でも重要な考え方となっている。

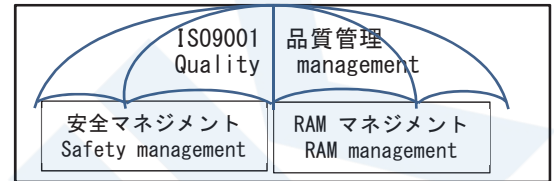


図4 品質管理の下での安全性保持

3.2 故障の種類と対策

RAMSでは、故障(failure)には以下の2種類があり、その特徴に適した対策を行う(図5)。現状多くの装置がソフトウェアを内蔵する(E/E/PE)と考えられるため、その場合、両方の対策が必要となる。

- (1) ランダム故障：確率的に発生する故障
- (2) システマティック故障：特定の入力の組み合わせ又は特定の環境条件下で発生する故障

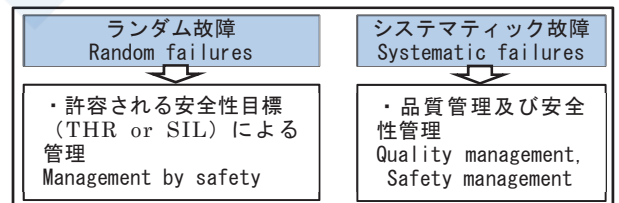


図5 故障の種類と対策

3.2.1 ランダム故障対策

ランダム故障は、ハードウェアの施工不良や劣化等により確率的に発生する。影響評価は深刻度と発生率によるため、どのようなハザードが、どの程度の深刻度・発生率(リスク)で起こるかが重要となる。

そのため、ランダム故障に対しては図6のように、ハザードごとに(この図では「ガイド機能の喪失(脱線)」)、システムに必要となる目標(許容される故障率目標、THR: Tolerable Hazard Rate又はSIL: Safety Integrity Level)をサブシステムに割り当て、この目標を達成すべく安全対策を行う。割り当てた目標はサブコントラクターに伝達することで、システム全体の性能を守る。

実務上は、THRを表2により換算したSILを用いることが多い。また、サブシステムが決まっている場合、サブシステムの故障率目標を先に決める場合もある。

割り当てにあたっては、個々のサブシステムに必要以上の高い目標を割り当てることは、不必要な複雑化やコスト要因となるため、合理的に割り当てること、バランス重視のRAMSにかなっている。

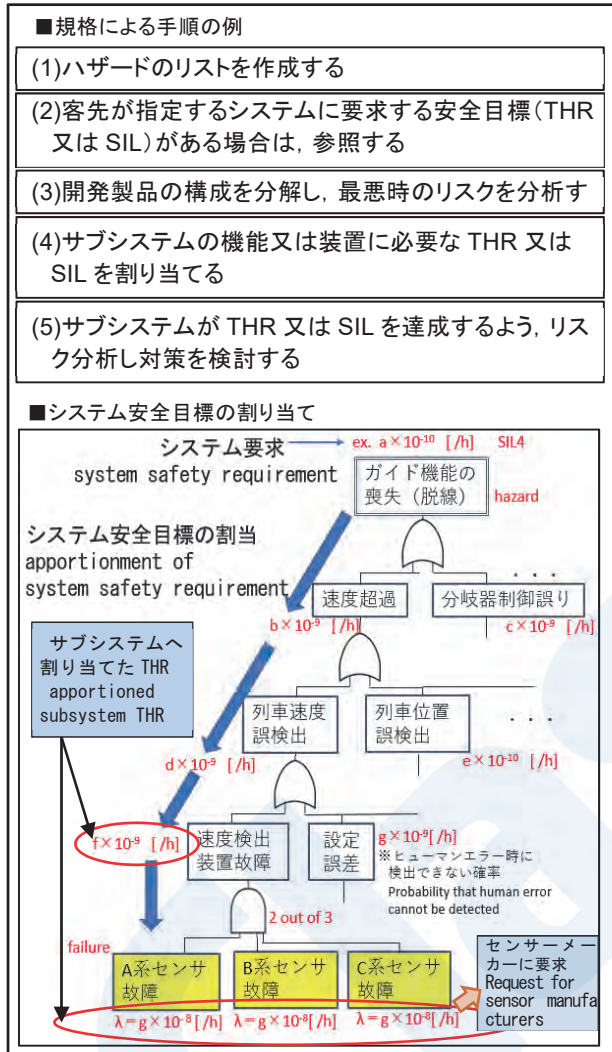


図6 サブシステムへのTHR割当の例

表2 THRとSILの換算

安全機能の目標とする危険側故障率の平均値	対応SIL
1×10 ⁻⁸ [1/h] 未満 ~ 1×10 ⁻⁹ [1/h]	SIL 4
1×10 ⁻⁷ [1/h] 未満 ~ 1×10 ⁻⁸ [1/h]	SIL 3
1×10 ⁻⁶ [1/h] 未満 ~ 1×10 ⁻⁷ [1/h]	SIL 2
1×10 ⁻⁵ [1/h] 未満 ~ 1×10 ⁻⁶ [1/h]	SIL 1
~ 1×10 ⁻⁵ [1/h]	SIL 0

出典：IEC 61508-1 Ed.2.0 Table 2を一部改変
備考：要求（高頻度）に応じ稼働するE/E/PEシステム及び連続稼働するE/E/PEシステムの場合である。

3.2.2 システムティック故障対策

システムティック故障は、典型的にはソフトウェアのバグや、作業指示ミスによる設計間違いのような作り込まれたものである。特定条件が揃うと必ず発生し、確率的に生じるものではない。

このような故障への対策として、前述の許容される故障率目標（THR）にふさわしいマネジメントや、技法（Techniques and Measures。以下「技法」という。）を適用することで、作り込みの防止や、人為ミスを検査等で検出するといった対策を行う。

マネジメントに関しては、能力のある者による段階ごとの検証（Verification）や妥当性確認（Validation）が特徴的である。技法に関しては、表3のRAMSの関係規格の例のような、いわば、このSIL目標の製品を製作する場合、このような対策が必要、というノウハウを示すもので、SILが高いほど要求は多くなる。

従来手法で開発された製品の場合、規格に書かれる技法とは完全には一致しないため、製品品質は優れていても規格と不整合、という事態が生じる。回避するためには、今後の開発時には、極力機能安全規格の技法と整合させ、相違の生じる点は、その理由を記録しておくことが重要である。

表3 規格の技法の例

技術・手法 Technique/Measure	SIL0	SIL1	SIL2	SIL3	SIL4
4. 機能試験の実施 Functional testing	M	M	M	M	M
5. チェックリストで確認 Checklists	R	HR	HR	M	M
9. レビューアによる検証 Walkthrough	R	R	R	HR	HR

凡例：M:義務(Mandatory),
HR:強く推奨(Highly Recommended),
R:推奨(Recommended)

出典：IEC 62279 Ed2.0 Table A.11(抜粋)

3.2.3 安全に関するリスク分析

機能安全規格の「安全」は、機能安全規格ごとに差異があるが「許容できないリスクがないこと(freedom from unacceptable risk)」と定義される。

リスクは、「危害の発生確率とその危害の程度の組み合わせ(combination of the probability of occurrence of harm and the severity of that harm)」と定義される。発生頻度が高く、かつ危害の程度が重篤なほど高いリスクとなる。許容できるリスクかどうかは極めて重要で、既存品の実態調査等、何らかの根拠から適正に決定することが、バランスのよいシステムの実現に不可欠である。

反面、対策を講じてもお残るリスク(residual

risk) (図7) は、社会的に許容 (tolerable) されると判断できるリスクは製品への残存を許容し、0にしない。

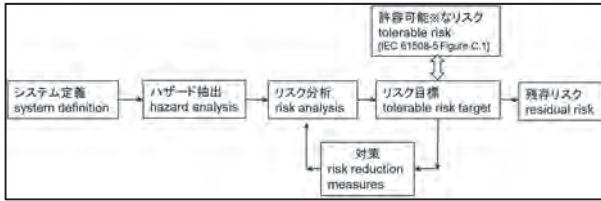


図7 リスク縮減フロー

表4は、リスクの発生頻度と被害の深刻度のマトリクスである。メーカーでは、発生頻度や深刻度を具体的に決め、表5、表6のようなFMEA解析により少なくとも「望ましくない」「許容できない」範疇のリスクを除去又は軽減する対策を行う。欧州のメーカーでは、FMEA解析では表5に加え、その部品に適した保守方法も合わせて検討されている(5.1に後述)。

リスクの発生頻度のレベル分けやFMEAを行うためには、現状の故障率が欲しいところだが、この把握はメーカー各社とも苦労している。さらに、不幸にしてリスクが顕在化するのには営業段階のため安全関係の法令の規制対象となるが、法令やRAMSには社会的に許容される水準は示されておらず、ユーザーの要求事項やALARP原則⁴⁾等を参照し、メーカーが安全性やRAMについて、目標を決める必要がある。

これらは、図8のsafety caseという文書にまとめる。

関係者への立証に用いる観点からは、考えられるリスクは取捨選択をせず淡々と計上することが望ましい。さらに、リスクへの対策、判断根拠、ユーザーの要求事項等を文書上でつながりを追える(トレースという)必要もある点が独特な点といえる。

表4 安全性のリスク評価マトリクス

危険な事象の発生頻度	リスクの程度			
	頻繁に発生	望ましくない	許容できない	許容できない
発生の可能性大	許容できる	望ましくない	許容できない	許容できない
時として発生	許容できる	望ましくない	望ましくない	許容できない
いつか発生	無視できる	許容できる	望ましくない	望ましくない
発生しそうな	無視できる	無視できる	許容できる	許容できる
考えられない	無視できる	無視できる	無視できる	無視できる
	軽度	許容限界	重大	深刻
	結果の深刻さの程度			

出典：IEC 62278:2002 Table 6 より抜粋

表5 Functional FMEAの例

ID	装置/機能 ITEM/Function	フォールト Fault	生じる事象 Fault consequence	既存の対策 Existing Measures
R1	Invertor	current v data loss	halt	warning
	...			

表6 Design FMEAの例

ID	装置/機能 ITEM/Function	フォールト Fault	対策前 Potential			対策後 Result			
			重篤度 Sev	頻度 Occ	評価 RPN	対策 Mitigation	重篤度 Sev	頻度 Occ	評価 RPN
M1	Invertor	current v data loss as a result of wrong input	2	3	6	add input data rationality check function	2	1	2
	...								

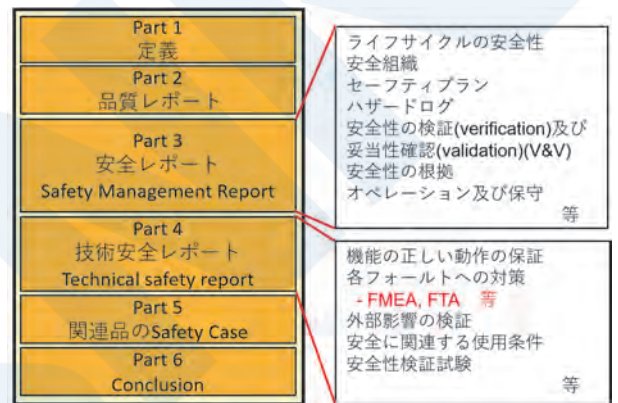


図8 安全性立証書類safety caseの構成

4. RAMの管理の考え方

4.1 RAMの要素

製品ユーザーは、製品のSafetyは当然のものとして、ライフサイクルコストに関わるRAMを重視している。鉄道車両は特にRAMが重視されるため、具体的な数値が書かれた調達仕様が見受けられる。

RAMの各要素について、具体的な指標に関する規定はなく、いくつか例示だけのため(例：CLC/TR 50126-3, EN 50657)、製品に適した指標が選ばれる。主なものを表7に列記する。

例えば「列車の不稼働頻度 5 [分/年]」ならば、アベイラビリティ要求 9.5×10^{-6} (9.5×10^{-4} [%]), 「列車運行が停止する故障 2件/10万 [車両走行km]」なら、MTBF (深刻な故障) = 50,000 [車両走行km] が要求されていることとなる。

同表中の λ は故障率である。安全性の面では危険側に作用する故障率が重要で、さまざまな分類方法があるが、ここでは λ_s (安全側故障率) と λ_D (危険側故障率) により、次の式(1)のように定義し表中で使用している。

故障時に安全側に動作するよう設計する「フェー

ルセーフ」は、 λ_D の割合を下げる工夫をしたアーキテクチャとも言える。

表7 RAM及びSafetyの指標

	概要	主な指標
信頼性 (R)	要求された機能を、失敗することなく、所定の時間動作させることができる能力	MTBF [h], MDBF[km] (平均故障間隔), $\frac{1}{\lambda_S + \lambda_D} = \frac{1}{\lambda}$ [1/h]
アベイラビリティ (A)	部品やシステムが、要求された機能を、ある瞬間又は所定の時間動作させることができる状態にしておける能力	$\frac{MTBF}{(MTBF + MTTR)}$ [%] $\frac{\mu}{\lambda + \mu}$ [%]
保守性 (M)	所定の条件で使用されている製品を、所定の時間内にメンテナンスすることが出来る可能性	$\mu = \frac{1}{MTTR}$ [%], MTTR [h] (平均修理時間)
安全性 (S)	許容できないリスクがないこと	λ_D [1/h] (危険側故障率), MTBF-H [t] (平均ハザード発生間隔)

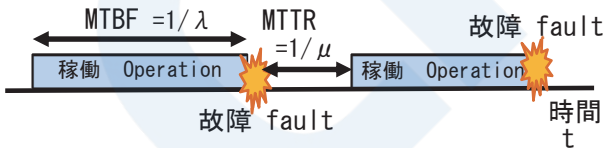
表中において

$$\lambda = \lambda_S + \lambda_D \quad (1)$$

ただし $0 \leq \lambda \leq 1$ を満たす時間的一定値

MTBF, MDBFは図9のように、故障が発生する平均時間又は平均列車走行キロを表す。例えばMDBF=100,000kmのシステムは、平均10万km走行ごとに1件故障が発生することを意味する。

表中のMTTRは、修理又は交換が前提のシステムで、修理手配や保守部品手配も含む、故障から修理完了までの時間を表す。



MTBF (Mean Time Between Failure): 平均故障間隔 [h]
MTTR (Mean Time To Repair) : 平均修理時間 [h]

MTBF:MTTRが9:1のとき、アベイラビリティ (A)=0.9
MTBF:MTTR=9:1, Availability=0.9

図9 平均故障間隔の概念

MTTRの逆数 μ は、単位時間当たりの修理完了率 [1/h] で、保守の完了までの時間が確率的な場合に適している。故障後すぐに修理できる場合も、深夜まで待つて修理する場合もある鉄道車両では、例えばMTTR=20h ($\mu=1/20$), というように、製品の保

守性の目標を立てるのに使われる。

以上まとめると、信頼性 (R) はシステムが機能する時間や距離、アベイラビリティ (A) はシステムが全時間のうち稼働している割合、保守性 (M) は故障後に修理に要する時間又は修理される確率 (正味の保守時間に加え、移動時間も含む) を表す。ただし他の指標もありえる。

なお、保守性についてはここでは主に修理としているが、製品特徴によっては、定期点検、塗油、摩耗品交換、清掃作業まで含める場合もある。

4.2 RAM目標の設定と割り当て

前掲の図6においてSafetyのシステム要求の割り当てを述べたが、RAMのうち特に信頼性 (R) については客先要求がある場合、メーカーがシステム目標値を決め、次にサブシステムへ割り当てを行う。

このときFTAは複雑すぎるため、IEC 61078による信頼性ブロックダイアグラムで論理構造を単純化し、システム全体の信頼性を計算する (5.2参照)。

また、解析された信頼性の適否を評価するため、前掲の表4 (リスク評価マトリクス) と同様に、信頼性についても、故障の深刻さと発生頻度を、メーカーにおいて定義を行う。

表8は鉄道車両に搭載する部品に関するリスク評価項目の例である。鉄道車両部品のため、機能の維持状況を判断基準としている。頻度については、MTBF (又はMDBF) が使われることが多いが、安全性への影響度合い、影響の波及範囲など、把握しやすく、ユーザーに分かりやすい分類が行われる。

表8 信頼性のリスク評価例

深刻さ	システムの故障モード	運行への影響
深刻	全体故障	運行不能
大きい	許容限界の機能故障	応急的運行
小さい	許容限界に達しない機能故障	応急的運行
無視	無視できる程度の機能故障	正常運行

アベイラビリティ (A) については、前掲の表7のように信頼性、保守性と密接な要素のため、アベイラビリティの目標は信頼性・保守性の目標達成により達成する関係にある。

保守性 (M) については、システム、サブシステムごとに、表9の保守の種類のをどのような頻度で適用すべきかを、保守コストやMTTR, 安全性への関与度合いから判断した目標を設定する。

RAM及びSafetyの各要素は相互に密接である。繰り返し検討することで各要素の目標を達成する。

表9 主な保守の種類

保守の種類 type of maintenance	概要 Outline
予防保全 Preventive maintenance	期間や走行距離などの一定周期を定め、保守作業を行う
事後保全 Corrective maintenance	故障や不具合を検知した場合に保守作業を行う
状態監視保全 Conditioned based maintenance	状態監視を行い、あらかじめ定めた指標値に達した場合に保守作業を行う

5. RAM及びSafetyのバランスの適用例

近年、状態監視技術や記憶デバイス等の汎用部品の信頼性が向上している。本章では、安全性に実質影響せず一般品活用等によるRAMの検討について例示する。

5.1 信頼性と保守性

センサー技術の発達により、従来は一定期間で交換していた部品を、故障の予兆検出時に交換する「状態監視保全」への転換が進んでいる。

図10のように故障の予兆を検出してから故障までの時間（P-Fインターバル）内で異常を検知し、保守が可能なら合理的なため、異常を検出しやすい特性をもつ機械装置に取り入れられている。

この方法は、高い安全性が求められる装置には不向きだが、その他のシステムでは、大改修せず、保守でシステムのMTBFを延ばすことが可能となる。

欧州のメーカーの場合、システムの設計時に異常の検出・表示機能の信頼性を検討した上で、部品に適した保守方法と周期を前掲の表5のFunctional FMEAに合わせて記載する等、保守を活用したシステムの信頼性向上策が戦略的に行われている。

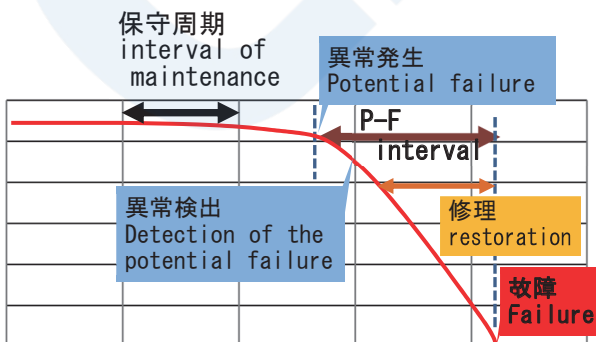


図10 P-Fインターバル内での保守

5.2 安全性と信頼性

図11は、安全関連システムで用いられる、同一装置を冗長に接続する構成を示している。2/3冗長系システムは多数決論理で2台の出力が一致した場合に採択、待機二重系システムは故障検出時に待機する一系にSW（スイッチ）で切り替える、安全対策である。

図12では、2/3冗長系システムを構成する装置A, B, Cの故障と、システム全体の故障（機能の停止の状態, failure）を図示している。

装置A, B, Cは故障率 λ 、修理率 μ 、危険側故障率 λ_D の同一装置で、スイッチ（SW）2台のいずれかの故障率を（1-p）と表せる時、安全性に影響せずに一般部品による低コスト化を狙ったシステム検討の考え方の例を示す。

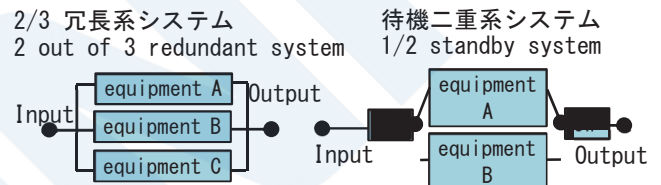


図11 ブロックダイアグラム

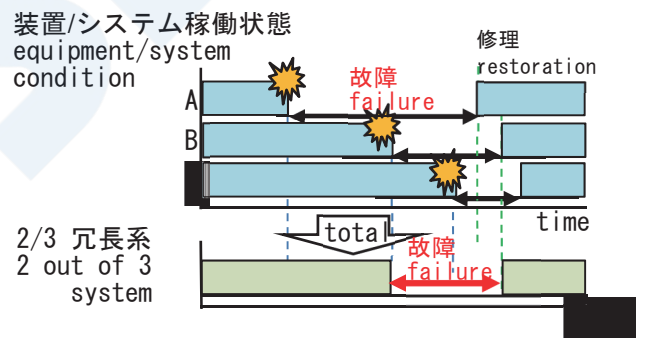


図12 2/3冗長系システムの故障

2/3冗長系システムの安全性 $S_{2/3}$ は、同時に2台以上が危険側故障を生じる場合以外の確率であるため式(2)、待機二重系システムの安全性 $S_{1/2s}$ は、スイッチ故障と、機器の危険側故障時のため、式(3)のように表せる。

$$\begin{aligned}
 S_{\frac{2}{3}} &= 1 - (\lambda_D^3 + {}_3C_2\lambda_D^2(1 - \lambda_D)) \\
 &= 2\lambda_D^3 - 3\lambda_D^2 + 1 \\
 &= (2\lambda_D + 1)(1 - \lambda_D)^2
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$S_{\frac{1}{2s}} = 1 - (p \cdot \lambda_D + (1 - p)) = p(1 - \lambda_D) \tag{3}$$

λ_D : 装置の危険側故障率
 dangerous failure rate of equipment[1/h]
 p : スイッチが2台とも故障していない割合
 inverse of failure rate of two switches[1/h]

一方、信頼性(1/ λ)については、米国空軍の研究機関の文献⁵⁾より、2/3冗長系の故障率 $\lambda_{2/3}$ は式(4)、待機二重系の故障率 $\lambda_{1/2}$ は式(5)のように表せる。

$$\lambda_{(n-q)/n} = \frac{(n)! (\lambda)^{q+1}}{(n-q-1)! (\mu)^q} \quad (4)$$

$$\lambda_{n/n+1} = \frac{n[n\lambda + (1-p)\mu]\lambda}{\mu + n(p+1)\lambda} \quad (5)$$

n : 稼働中の機器数 (この場合 $n=3$)
 number of active units ($n=3$,this case)
 q : 故障してもシステムが動作する機器数 (この場合 $q=1$)
 number of units allowed to fail ($q=1$,this case)
 μ : 修復率
 repair rate[1/h]
 p : スイッチ×2台とも故障していない割合
 inverse of failure rate of two switches[1/h]

式(2)から式(5)により、表10に、高信頼品ではあるが修理手配に時間がかかる部品を使ったシステムと、一般製品のため手配が容易だが、故障率が高い製品を使うシステム (いずれも仮想である) について、仮想の数値により、システムごとの信頼性及び安全性を算出した。

表10 安全性と信頼性の試算例

	高信頼品 high reliable equipment	一般品 normal equipment
装置単体のパラメータ Parameters of single equipment	$\lambda=1 \times 10^{-5}$ $\lambda_D=1 \times 10^{-7}$ $\mu=1/24$ $=4.17 \times 10^{-2}$ $p=1 \cdot 10^{-5}$	$\lambda'=5\lambda$ $=5 \times 10^{-5}$ $\lambda_D'=10\lambda_D$ $=1 \times 10^{-6}$ $\mu'=1/4$ $=2.5 \times 10^{-1}$ $p'=p=1 \cdot 10^{-5}$
2/3冗長系システム 2 out of 3 redundant system	$\lambda_{2/3}=1.44 \times 10^{-8}$ $s_{2/3}=1 \cdot 3 \times 10^{-14}$ (SIL 4に相当)	$\lambda_{2/3}'=6.00 \times 10^{-8}$ $s_{2/3}'=1 \cdot 3 \times 10^{-12}$ (SIL 4に相当)
待機二重系システム 1 out of 2 standby system	$\lambda_{1/2}=2.50 \times 10^{-9}$ $s_{1/2}=1 \cdot 1 \times 10^{-5}$ (SIL 1に相当)	$\lambda_{1/2}'=1.05 \times 10^{-8}$ $s_{1/2}'=1 \cdot 1 \times 10^{-5}$ (SIL 1に相当)

注：表中の数字は仮想のものである。

Remarks: All figures in the above table are virtual

一般品の故障率は高信頼品より5~10倍高い (悪い) 想定で算出しているが、アーキテクチャによ

て高信頼品を用いるシステムと同等の値を示す一般品があることが分かる。

信頼性向上への寄与度が大きい要素は、一般品の修理率 μ を24時間から6時間に短縮したことであり、修理率の改善はRAM要素の改善に効果的である。

5.3 ライフサイクルコスト (LCC) の算出

RAMSでは、LCCに関し、コストで安全性を決めてはならないこと、RAM及びSafetyとのバランスの重要性へ言及があるが、具体的な要求事項は無い。

しかしLCCは、ユーザーがRAM目標を決定する際の強い関心事項のため、欧州では、業界団体が欧州域内で調査した実績値をバックデータとした計算ツールが開発されている (図13)。

詳細な条件を入力するほど精度が増す構造であり、メーカー、ユーザーが広く共有し活用されている。

日本にはこうしたツールはなく、メーカー各社が独自に取り組んでいる。メーカー1社で把握することは難しく、業界として取り組むことが望ましいが、ユーザーの営業上の機微情報でもあるため、不可欠ではあるが、難しい課題となっている。

Parameter	Value	Unit, comments
Capital purchase cost		Cost
Manufacture cost	0.026	Unit
Life cycle and economy	0.75	
Number of units (quantity)	10000	Unit
Operating distance	0.6	Percentage
Discount rate (interest rate - inflation)	0.05	Year
Life Cycle length (used in cases)	20	Year
Product life Cycle (see note)	10	Year
Present value factor (calculated)	0.31	
Expected distance during life (calculated)	2.000	km
Revenue operating time per year		h (used in cases)
Powered time per year this system	3.500	h (used in cases)
Revenue other unit with powered time (h)		

Component configuration	Number	Notes
Control type 1	1	
Control type 2	1	
Control type 3	1	
Control type 4	1	
Control type 5	1	

図13 LCC計算ツール「UNILIFE」

6. RAMSでのユーザーの役割

製品をリリースされたユーザーは、SRAC (Safety Related Application Condition) と呼ばれる、メーカーからユーザーへの技術的な依頼事項をまとめた書類に従い、製品を使用する。

SRACは使用説明書と似ているが、SRACはメーカーのリスク分析結果を踏まえて作成されるもので、リスクの防止の観点で首尾一貫した、製品のリスクを顕在化させないために必須の使用条件が記載されたものである。メーカーが作成するセーフティケースにも含まれ、ユーザーに交付される。

またユーザーには、図14の緑色のサイクルで示す、FRACAS (Failure Reporting, Analysis and Corrective Action System) というフィールドデー

タ分析を定期的に行うことが推奨されている。日常の保守や運行で把握した故障等（同図中の紫色）や運行データから、RAM目標の実現度を監視する。

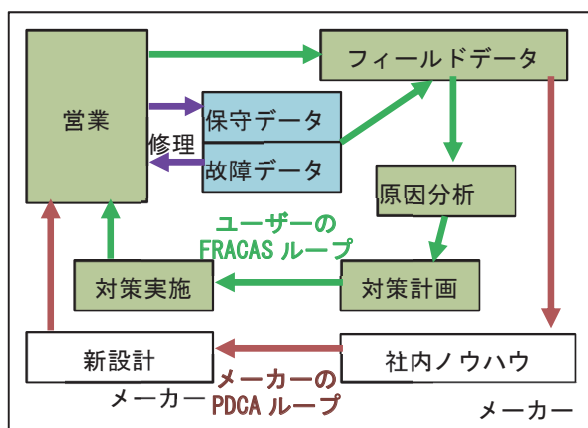


図14 ユーザーのFRACAS分析によるPDCA

その結果、もし解離が見られる場合には何らかの不具合又はリスクの顕在化も懸念されるため、原因の分析調査や、対策を実施し改善を行う。

一方メーカー側では、ユーザーからの連絡や、自身の品質マネジメントシステムの活動として、製品の設計段階で検討したRAM及びSafety指標が達成されているか調査する。

この過程でもし新たなリスクを検出した場合には、ハザードログという製品のリスクデータの更新を行い、今後の製品開発に活かすPDCA活動を行う。

製品の故障発生は、バスタブカーブとして広く知られるように、初期故障が多い状態から徐々に低下していき、やがて故障発生率が低く安定した状態に至る。そのため、海外の鉄道プロジェクトでしばしばみられる、要求未達成時に課す高額なペナルティ（製品に要求した信頼性目標を達成していない場合にメーカーに違約金を課す契約条項）を課する場合、どの時点において要求事項に対する達成判断を行うか、双方にとって重要となる。

ユーザーとメーカー間では、判断時期をあらかじめ取り決めるため、メーカーでは、製品リリース後の故障発生状況を把握して今後の推移を予測する。

もし未達成が予測される場合には、何らかの不具合等のリスクが顕在化する可能性が疑われることや、ペナルティの回避のため、早期に原因究明、対策を行うことが重要となっている。Erlang法などの数学的な予測計算手法が活用されている。

このようにRAMSでは、製品リリース後も含めた製品製造から、営業、改修、使用終了まで含む製品ライフサイクル全体を通じた活動が計画されていることにより、営業段階においてなお、リスクベース

でのアプローチが製品に対して継続される。

前述のようにユーザーの機微情報にも関わるため、メーカーが把握できる範囲は限られることも多いが、可能な限りリスクを把握し、対策を行うことで製品の品質向上に努める仕組みでもある。

7. まとめ

本稿では鉄道に関する機能安全規格「RAMS」の概要と、RAMSを通じて、機能安全による安全性を保つための手法とリスクベースの考え方を紹介した。

RAMSに基づく製品開発手順のうち、故障の種類や品質管理が重視されている点など、特徴的な考え方を述べ、RAM及びSafetyの各要素に対する目標設定、部品への目標割り当て手順などのメーカー・インテグレーターが行う業務の例と、コストを意識しRAM各要素の調整を行うイメージも紹介した。

また、ユーザーが行う、フィールドデータによるRAMS要素の分析活動の必要性を述べた。

最後に、日本国内では、何も言われなくとも迅速で丁寧なアフターセールスに努めており、文化ともいえる。一方RAMS等の機能安全では、計画等の管理がない状態は、無秩序で、リスクのある状態と考える。しかし、RAMS等の機能安全は、なかなかうかがい知れない製品品質、安全性、顧客重視の取り組みも、活用の仕方次第で実証するツールとなるものと考えている。

本稿が、技術進展の進む船舶分野において、何かのご参考、ご検討の一助となりましたら幸いです。

参考文献

- 1) 厚生労働省：機能安全による機械等の安全確保について、
<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000140176.html>, (2023年8月15日閲覧)
- 2) 佐藤吉信：機能安全に関わる人材育成セミナー【基本領域】機能安全，一般財団法人日本規格協会，2013年9月，pp24
- 3) 福田隆文：IEC 62061 機械の機能安全規格の概要，安全工学2009年48巻6号，pp379-384
- 4) 田村兼吉：海事分野におけるリスクアセスメントについてーリスクとうまく付き合うー，ClassNK技報 No.6 2022(II)，pp4
- 5) Rome Laboratory Air Force Material Command(AFMC), Reliability Engineer's Toolkit, pp90

次世代の通信インフラ

安立 恭晴*

1. はじめに

世界中でデジタル化を促進する取り組みが拡大している中、既にパソコンやスマートフォンを用いたコミュニケーションや公共交通機関の電子決済など、日常生活になくてはならない通信サービスが世界中に普及し、それを支える大容量通信ネットワークは私たちの生活において欠くことのできない社会基盤になってきている。日本の内閣府でもSociety5.0というビジョンを提唱し、通信環境を重要な社会基盤と位置づけその整備を強く推進している。このSociety5.0の内容は「サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を融合させた仕組みを構築することで、経済発展と社会的課題を解決し、人間中心の社会とする」と定義づけ、次世代の情報無線通信インフラと期待されるB5G（Beyond 5G）／6Gのコンセプトが導入、整備されることで新しい価値創造をも牽引されるとしている。

これからの世界において通信は空気と同じくあって当たり前なもの、電力や水と同様に重要なライフラインとしてその重要性はますます高まってきている。このような社会的な動向を踏まえ、本稿では、通信インフラというものを基本的な事項から整理した上で、最新のデジタル通信ネットワークに関わる技術的動向を解説し、今後の海事業界における通信インフラの重要性について考察する。

なお現在B5G（Beyond 5G）という名称でよばれている将来の6Gを本ドキュメントでは以下「B5G」と称する。

2. 通信とは

通信とは、送り手と受け手の間で情報を共有する手段であるとされている。人々はこれまで離れた相手にメッセージを伝えようと様々な方法を試みてきた。

船の世界でも遥か昔から、国籍旗を掲げ、航行灯、非常用信号を灯すことで周囲の船舶や陸上へ「目で見てわかる情報」を伝え、汽笛などの音響信号を用いて周囲の船舶に自船の位置や動きを「耳で聞いて

わかる情報」として伝えるなどの工夫を続けてきた。そして長きにわたり使われてきたこれらの通信手法は現代においても船舶間のコミュニケーションや安全な航行を維持するために重要な役割を果たし続けている。

また通信の形態は、技術の進歩と社会の変化に合わせて進化し、現在では、安定性や高速通信に向いている固定回線による通信と、移動性や柔軟性に優れた無線通信の二つのカテゴリに分けることができる。インターネットをはじめとした通信インフラの主役は、固定回線による通信であり、無線通信は、そのラストワンマイルに利用される傾向にある。すなわち通信インフラの中で主要なデータ転送経路やバックボーンネットワークは通常、固定回線を使用して構築される。固定回線による通信は、物理的なケーブルを敷設し、そのケーブルを伝わることで情報を伝達するため、高い帯域幅と信頼性を確保できるのと同時に大量のデータを効率良く転送できる。このため、企業内外の通信インフラやクラウドネットワークを構成するサーバ間などでは、できる限りこの固定回線を伝送路として利用するのが一般的である。

しかし末端の送受信機器までの接続において、回線を敷設することが難しい場合や、端末の移動性を考慮する必要がある場合には無線による通信が重要な役割を果たす。

この無線による通信は、電波を使用して情報を伝送する通信方式であり、1900年代初頭のマルコーニによるモールス信号の大西洋横断無線通信から始まり、1980年代に使われ始めた移動体無線通信技術の1G（第一世代）まで、アナログ信号を用いていた。

当時は画期的な技術とされた1Gもその主な用途は音声通話であり、携帯電話本体も大型であったうえに音声以外のデータの通信には適していなかった。

しかし、その後の3Gでは、完全にデジタル信号へ移行されたことで、多少の遅延はありながらもリアルタイムでビデオ通話などもできるようになった。そして現在の5Gでは、リモート会議を行いながら資料を共有し、さらに同時にインターネット検索も行える超高速で大容量の無線通信が行える時代に

* 技術研究所

なっている。

これら1Gから現在の5G、そして次世代のB5Gへと技術改革が進んでいる移動体無線通信技術と並行して、デジタル方式を前提とした新たな無線通信技術も多数実用化されてきている。数十m以内での近距離無線通信に適しているWi-Fi (Wireless Fidelity) とよばれる無線通信技術や、非接触での情報共有、公共交通機関の乗車券、モバイル決済までを一瞬のうちに完了させるNFC (Near Field Communication) とよばれる近距離無線通信技術など、今では街中で当たり前のように使われている。

3. 無線通信

無線通信の仕組みは、電波が空間を伝播することで、遠隔地へ情報を届ける通信手法である。

電波は電磁波の一種であり、電磁波は電場 (Electric Field) と磁場 (Magnetic Field) が交互に直交することで発生する。この現象は電流が、電荷のある物体を通過することで周囲に磁場が発生する。そしてこの磁場の变化を妨げる方向に電場が自然発生する。さらにその電場の变化により磁場が再び発生するという相互作用によって電波が空間を伝わっていく。また、電場と磁場が相互に作用しあって伝播するものであるため、宇宙空間などの振動媒体が無い真空の空間でも伝わる事ができる。さらに電磁波は、広範囲周波数範囲 (帯域) を持ち、異なる波長やエネルギーを持つことで、さまざまな特性を持つ波として存在している。

そして無線通信では、この電磁波の周波数、波長、帯域幅が、通信の伝播特性を決定づける重要な要素であり、アナログ信号、デジタル信号共に、これらの基本的な伝播特性の仕組みは同じである。

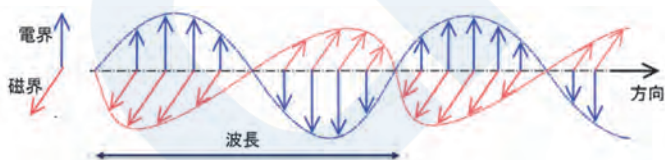


図1 電波の基本的な特性

以下に電磁波の波長、周波数、帯域幅について説明し伝播特性との関係性を述べる。

3.1 周波数

無線通信で利用されている電磁波は「波」であり、波長と周波数という関連する特性を持っている。

波長は連続した波の周期的特徴であり、隣接する波の同一位置における距離を示し、その単位はメートル (m) またはその倍数 (センチメートル, ミリ

メートル, ナノメートルなど) で表される。

周波数は単位時間あたりに波が繰り返される回数であり、現れる波の数を秒あたりに示し、その単位はヘルツ (Hz) で表され、1ヘルツは1秒間に1回の振動を意味する。

電波の伝播速度は周波数にかかわらず一定で光と同じ1秒間に約30万km進む。これを周波数で割ると波長になる。また、周波数が高くて低くても電波自体の届く速さは変わらない。波長と周波数は次のような式で表される。

$$\lambda \text{ (波長)} = \frac{c \text{ (光速)}}{f \text{ (周波数)}}$$

3.2 帯域幅

帯域幅 (Data Bandwidth) とは、利用できる周波数の幅であり「最高周波数」と「最低周波数」の差のことである。すなわち、データを伝送するために利用できる周波数の範囲であり、データの転送速度に関係する。データの転送速度の単位は1秒間に何ビット転送できるかを表すデジタルビットレート bps (bits per second) が用いられる。例えば転送速度1Mbpsは、1秒あたりに最大で1メガビットのデータが伝送できるという意味である。帯域幅とデータの転送速度の関係は、次の関係式で示すことができる。

$$\text{データの転送速度} = \frac{\text{帯域幅}}{\text{デジタル信号のビット数}}$$

基本的な考え方は、帯域幅が広いほどより多くの情報 (データ) を転送できるため、転送速度も速くなるというものである。ただしこの関係式は理論的な最大データ転送速度を計算するために使用されるもので、実際のデータ通信ではノイズや信号の変調方式、誤り訂正符号、プロトコルのオーバーヘッドなどの要素も考慮する必要がある。以下の式によりデータ転送速度を求めることが多い。

$$R = B \times \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

ここで、Rはデータの転送速度 (ビットレート)、Bは帯域幅 (ヘルツ)、 \log_2 は2を底とする対数とし、S/Nは信号対雑音比 (Signal to Noise Ratio) を示す。Sは信号の平均電力、Nはノイズの平均電力で

ある。S/Nは通信路の品質やノイズの影響を表し通信システムの性能に影響を与える。すなわちS/Nが大きいほどより高速なデータ転送速度が実現でき、またデジタル信号のビット数 (bps/Hz) は、デジタル信号の効率や変調方式によって決まる。言い換えると、より効率的な変調方式を使用すると1Hzあたりのビット数が増え、結果としてデータ転送速度も向上することとなる。

なお、この関係式は情報理論の枠組みであり、データ転送速度の計算式として利用されるが、実際の通信システムではさまざまな要件を考慮することで実現可能な転送速度を決定する必要がある。

3.3 電波の衰退

一般的に周波数が低い電波は波長が長く比較的障害物を通り抜けやすい伝播特性を持つ。その一方で周波数が高い電波は波長が短く障害物による衰退や反射が起こりやすい傾向にあるが高速なデータ転送速度を実現できる可能性をもつ。また、電波の波という性質は自由空間であっても衰退するとされ、その衰退の度合いを示すためにはフリスの伝送公式によって以下のような考え方ができる。

通信をつかさどる電波の電力密度 P_D は、電力 P を、通信距離 d を半径とした球の表面積 $4\pi d^2$ で割った値となり「距離の2乗に比例して減衰する」という特性を持つ。例えば、距離が2倍になると面積は4倍になるので電波の電力密度は1/4となる。その計算式は以下で表される。

$$P_D = \frac{P}{4\pi d^2}$$

つまり電波の衰退は距離が遠くなるほど電波のエネルギーは広がって薄まり受信する信号の強度が低下することを示している。電力の減衰はフリスの伝送公式に基づき次のように計算される。

$$P_L = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

ここで、 P_L は伝播損失、 d は送信元から受信先の距離すなわち送信アンテナと受信アンテナの距離とし、 λ は電波の波長を示す。

この式からも分かるように、衰退の傾向は伝播距離が長くなるほど増加することに加え「波長の2乗に反比例して衰退する」という特性も持つ。

なお、これらの式は自由空間を想定しており障害物や反射、散乱、回折、干渉などの影響は考慮していないため、実際の通信を考える場合にはこれらの

現象を踏まえた対応が必要となる。

4. 次世代の無線通信技術を目指すB5G

近年におけるデジタル化の目標はフィジカル空間とサイバー空間を融合させた高度なデジタル社会の実現とされており、物理的な制約を意識せず世界中のあらゆる事象を思いつくまに実現できる社会インフラの整備実現が必須となる。

この目標達成に向け2030年にリリースが予定されている次世代の無線通信ネットワークシステムB5Gでは、高速・大容量、さらに低遅延でセキュアな次世代の通信基盤の整備を実現するため、5Gまでで利用していた周波数帯よりも高い周波数領域で、より広い帯域幅を確保する必要がある。

これまでの5G以前の技術改革では、それまで利用していたミリ波とよばれる約300GHz以下の、限られた周波数帯域を利活用する形で通信方式の改良が進められてきた。この理由は、周波数がより高くなると電磁波の直進性が強くなることで、障害物に回り込むことができず、大気による減衰も大きくなるため、数メートルを超える長距離の通信は技術的に難しかったためである。

しかし、このような問題を抱えながら市場からは高い通信品質が求められ、さらに通信に利用できる周波数帯域の利用割当も逼迫する中、近年になり高周波数帯を通信に利用するための半導体素子や、これまでの無線通信技術を発展させた光の位相、振動方向の分布を捉える偏波などの技術革新が進み、新たな高周波数領域を利用するために必要な、様々な技術群が整いはじめている。

B5Gではこれら技術的な進展が後押しとなり、まずはテラヘルツギャップと言われている30THzまでの領域を無線通信に利用することを目指している。そしてさらに、その先の可視光の領域である800THzまでの活用を展望している。

4.1 光による無線通信

以下の図2に示した電波や光の特性について言及した後、光による無線通信について述べる。

無線通信をつかさどる電波も光も同じ電磁波であり同じ空間を共有している。このため電波であっても光であっても、第3章に示した無線通信の基本的な特性は同じである。

情報が伝わる際の伝達容量の違いを生むものは波長である。波が穏やかにうねれば波長は長く、周波数は低いことになり、情報の伝達速度もその分遅くなる。逆に早い波は波長が短く、周波数も高いため、ある一点を通過する波の数も多くなることで単

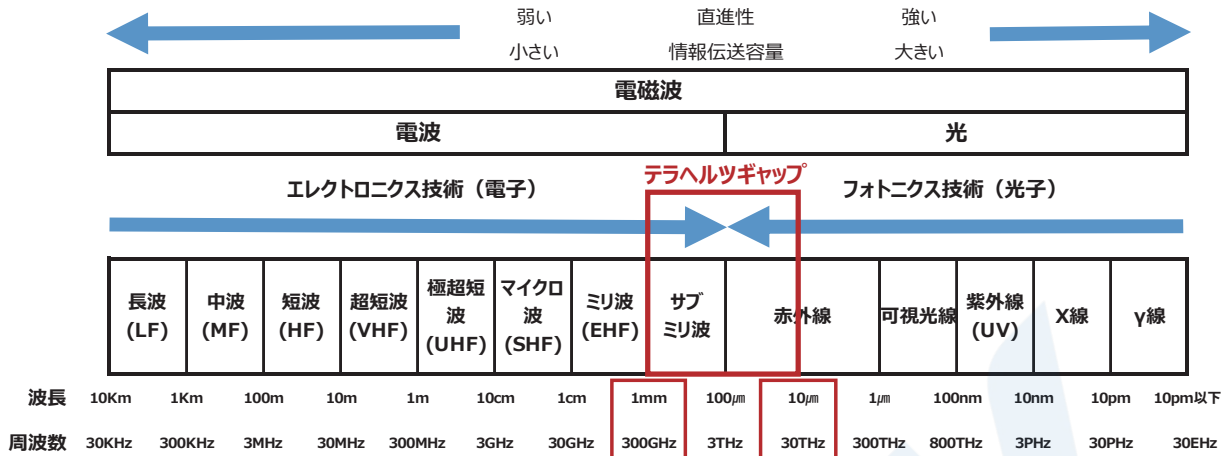


図2 電磁波の周波数

位時間あたりの伝達量も多くなり、通信速度が速いとなる。このように波長と周波数は不可分の関係にある。

光無線通信は光波をキャリア波として使用することで、高周波数のビームが大気中を直接伝搬しポイント・ツー・ポイントの通信リンクを形成してデータを送受信するアクセス技術である。

高い周波数をもつ光は電子に比べて伝搬中に損失するエネルギーは少なく、干渉やノイズにも強い。この特性により、光を使った通信では理論的に長距離での高速データ伝送や高い信号品質を実現することが可能である。ただし直進性が強い伝搬特性を持つため障害物や大気散乱、吸収、気象条件などの様々な外的要因によって光の伝播に障害が発生しやすい。また何よりこの光の直進性の高さゆえ、送信側からの細かいビームを受信するため正確な位置合わせをしないと上手く通信できない技術的事情もある。

ただし一方でこの直進性の高さが、光による無線通信は傍受され難いという恩恵をもたらしてもいる。

電波やこの光のビームは、光が集束して直進する形状のことを指す。光は波動性と粒子性の両方の性質を持ち、波の性質によって広がりを持つ一方、ビームのように集束する性質も持つ。特定の波長で同じ位相と方向を持つ光の波は非常に高い相関を持つように生成され、これにより光が直進集中し光のビームとなる。この光の特性をサイバーセキュリティ対策に生かすことで、これまでになくセキュアな通信が可能となる。

今後これらの光無線通信技術がさらに進み一般化されていくことで、サイバーセキュリティ対策も次世代のフェーズへと移り変わり、より安全な無線通信の実現が期待できる。

一方でこの光無線通信は、電化製品のリモコンや携帯電話の赤外線通信機能として既に利用されてい

る。最近になりその活用方法も徐々に広がりを見せ始めている。

例えば、電波を利用したWi-Fiに対して、光を利用した無線通信としてLi-Fi (Light Fidelity) という技術が既に開発利用されてきている。Wi-Fiと同様にLi-FiはIEEE 802.11規格を使用した無線であるが、赤外線・可視光線・紫外線など光の周波数帯を利用した無線通信であることから、電波と異なり干渉性が少なく電波障害を引き起こすこともない。また、電子機器の使用に注意が必要な病院や旅客機の機内、原子力発電所などで利用され始めている。このような光の特性を活かした光無線通信は未来へ向けた非常に有望な新しい通信手段となり得る。

なお、無線通信をつかさどる周波数の利用可能な範囲や具体的定義は国際的な規格だけでなく、特定の国や法律、産業規格、地域ごとの規制に基づいて設定されている。各国や地域によって異なる周波数が割り当てられているため使用可能な周波数帯域は地域の通信規制を確認する必要がある。また、船舶には適切な無線通信装置の搭載要件があり、装置ごとに使用できる周波数帯域の制限を受ける場合がある。日本の電波法第2条では周波数が300万MHz、すなわち3THz以下の電磁波を電波と定義づけており、これまで無線通信といえば3THz以下の電波を用いた通信を意味していた。

4.2 テラヘルツギャップ

テラヘルツ帯とは1THz前後の周波数帯を中心としたおおむね300GHzから30THz、波長にして1mmから10μmの電磁波領域を示し、光に近い性質を持った電波と光の境界に位置する(図2参照)。このテラヘルツ帯は電波側からみると波長が短いため高い分解能を有し、さらに高周波であるため帯域が広い。一方で、光波側からみると散乱されにくく透過性が高いうえ、分子固有の吸収スペクトルが表れ

てくるなどの特徴を有するため周囲の電波による干渉を受け難いという利点がある。このような理由により近年最も可能性を秘めた電磁波として世界中から注目を集めている。

ただし、このような高い周波数領域になると、電波の回り込みが減少し大気の水蒸気などによる衰減が発生する。そして、電波の発生発振効率が低下することで伝送損失の増大をまねき電波を遠くまで飛ばすことが技術的に難しかった。このため通信用としてはほとんど利用されてこなかった帯域である。これらエレクトロニクス技術とフォトニクス技術のいずれにとっても技術的課題が多く残る領域でもあることから「テラヘルツギャップ」とよばれてきた。

このテラヘルツ帯域を通信に利用するには、目的とする場所だけに送受信できる指向性の高いアンテナ技術をはじめ、電波の反射や透過の性質を利用するための高効率なテラヘルツ波発振検出素子、伝送損失を低下させるための新たな基板材料、そして、高周波の伝播特性や通信リンクの評価制御装置など、ハードウェアに重点をおいた技術革新が必要となる。

また、無線通信の発信源となる光源には高出力特性、受信機には高感度・低雑音特性が要求される。ここで要求される高感度・低雑音特性はひとまとめに雑音等価電力NEP (Noise Equivalent Power) として評価することができる。NEPは雑音電力とひとしくなる信号電力であり、受信機が持つ雑音電圧を電圧感度で割ると求まる。また、雑音電流の場合は電流感度で割ることも求めることができる。つまり、雑音と感度の大きさの比が重要となる。雑音電力は帯域に比例するため、帯域を狭くすると信号対雑音比は向上するが応答速度は低下する。このため構築するシステムによって必要な帯域を決定する必要がある。

$$NEP = \frac{PA}{\frac{S}{N} \cdot \Delta f^2}$$

P : 入射エネルギー (W/cm^2)

A : 検出素子の受光面積 (cm^2)

S : 信号出力 (V)

N : ノイズ出力 (V)

Δf : 雑音帯域 (Hz)

上記式からも分かるように、NEPは信号対雑音(S/N)が1となる時の入射光量で示される。

現在、B5Gを中心に世界中で進められている無線通信分野の研究開発では、テラヘルツ帯を利用す

るためのデバイス開発や新たな無線通信方式の開発、そしてさらに、より高い周波数帯の活用を見据えた国際標準化を活動の範囲としている。

5. 光無線通信によるNTNの展望

次世代の通信ネットワーク環境であるとされるNTN (Non Terrestrial Network) とは、宇宙空間を通信環境として活用することで、これまでにインフラの整備が難しかった場所や通信アクセスが制限されていたエリアなどに対しても、高品質で安定した通信サービスの提供を目指した構想である。地上にある通信基地局との連携も含め、静止軌道衛星や中低軌道衛星、成層圏を飛行する高高度疑似衛星などを立体的に繋ぎ合わせることで全地球をカバレッジするグローバル・ネットワーク環境が構築されようとしている。現在ITU-R WP5B (ITU Radiocommunication Sector Working Party 5B) および3GPP RAN (Third Generation Partnership Project Radio Access Network) により国際規格化が進められている。

これら人工衛星の間を相互に連携、接続する通信手段として、先に述べた光無線通信が有効な役割を果たすと考えられている。地上では、様々な外的要因を受ける光無線通信ではあるが、宇宙空間では自由空間に近い理論的な振舞が可能となる。これによりそれぞれの人工衛星間を光無線通信により相互接続することで、電波のような距離による衰減も少なく、省電力で高速、大容量な通信の実現性が高まる。ただし成層圏を飛行する高高度疑似衛星のHAPS (High Altitude Platform Station) では大気の影響を受ける可能性が高くなるため、現時点では未だ状況に応じた通信方法を選択考慮する必要がある。

一方で、利用する側の視点に立った技術革新も求められている。利用者の目的は、通信ルートなど意識することなく最適な通信経路を自動で選択してくれる、大容量の情報を高速で送受信できること、さらにその通信エリアにも制限や隔たりのない通信インフラを望んでおり、NTN構想の最終ゴールも幸いにして同じである。ただし、これらの通信環境を切望する利用者は、完成形にこだわらず、その時々で新たな通信技術を上手く取り入れていくことも検討に値する可能性がある。今後も継続的な技術革新に期待したい。

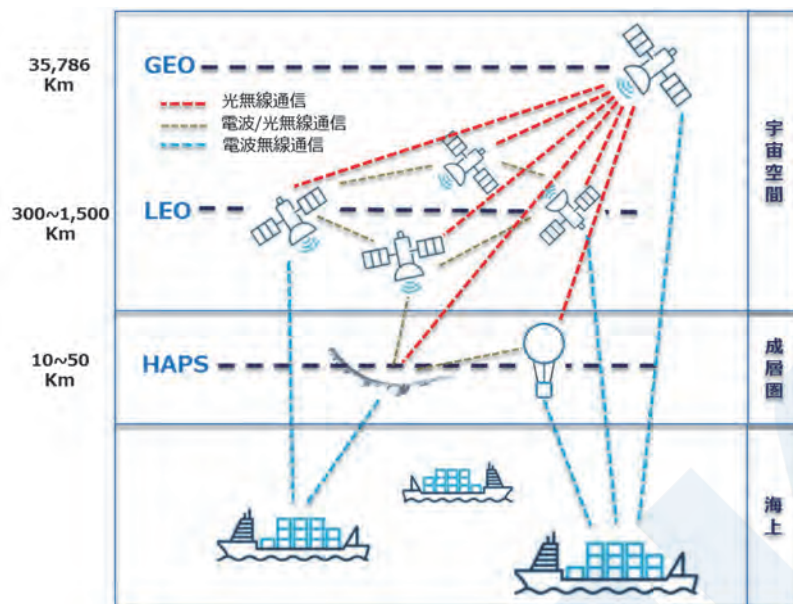


図3 NTN環境のイメージ図

6. おわりに

本稿では、通信インフラについての基本事項から最新の動向まで順を追って解説した。船舶業界における通信インフラのありかたについて考えてみると、頻りに耳にする船員の高齢化と労働力不足の問題があり、その対応改善策のひとつとして、船上でも様々なモノとのつながりを叶えるインターネット環境が特に若い世代で求められている。また、陸上における通信環境が発展、整備されて来ていることを背景に、海運会社へも運航に関わる情報をリアルタイムで陸上と共有することにより安全な運航を強化する取り組みが市場から求められるようになってきた。さらに、世界的なデジタル化の流れと共に、船舶業界を取り巻く環境に対しても改革の波が押し寄せ、IoT化や遠隔からの操船、運航の自動化などにより、航行ルートの最適化や安全性の向上などの改革が迫られている。

ただし、これらの改革はどれも皆、海上でも安定した通信インフラが整わないと成り立たないものであることに気付く。グローバルな世界に目を向けてみても、公共料金の支払いやショッピングなどはオンライン決済が一般的となり、世界中の銀行も全てオンラインで繋がれ、通信がダウンすると世界経済がストップする。

今後も船舶業界が発展を続けていくための一助となるよう通信インフラに関わる最新動向を伝えていきたい。

参考文献

- 1) 3GPP TR 38.821, Solutions for NR to support non-terrestrial networks (Release 16), 2021.
- 2) R1-2110604, LS on combination of open and closed loop TA control in NTN, in 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #106-bis-e, 2021.
- 3) 総務省：電波利用ホームページ,
<https://www.tele.soumu.go.jp/>
- 4) 総務省：令和4年版 情報通信白書,
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r04/pdf/>
- 5) 安立恭晴：通信ネットワーク技術の最新動向「次世代の海上通信ネットワークシステム」に関する調査報告,
<https://www.classnk.or.jp/classnk-rd/report/2020/001.html>
- 6) PK Sharma et al., SDN-based Platform Enabling Intelligent Routing within Transit Autonomous System Networks, In Proceedings of the IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference, 2022.
- 7) 国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT)：Beyond 5G 研究開発促進事業,
<https://b5g-rd.nict.go.jp/program/>
- 8) O Kodheli et al., Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 23(2021), No. 1, pp. 70-109.

- 9) S Schaer and D Hood, Software defined networking architecture standardization, Computer Standards & Interfaces, Vol.54(2017), Part 4, pp. 197-202.

CLASSMIX

船舶の衝突に係る研究開発

— 被衝突船の等価付加質量係数に関する一考察*1 —

塩満 大祐*, 石代 宗之**, 福井 努***

1. 緒言

IACS（国際船級協会連合）の共通構造規則では、船舶の衝突・座礁等に伴う構造強度の喪失を考慮した事故限界状態に対する残存強度要件を定めている。これにより、衝突・座礁時において波浪や内部荷重に耐える十分な船体強度を持つことが求められる。また、水素やアンモニアといった新燃料を搭載した新コンセプト船の検討・実用化には、確率論的リスク評価が必要であり、これに応じてタンクや船体構造の耐衝突・座礁性能評価が重要となる¹⁾²⁾。適切な耐衝突・座礁性能評価ができれば、浸水・沈没のリスクや燃料の漏洩リスクを考慮しつつ、より合理的な船体構造設計やタンクの柔軟な配置が可能となる。また、船舶同士が衝突する場合、衝突に伴う各船体運動に応じて、衝突船の船首部や被衝突船の船体の損傷規模が変化する。したがって、この現象を評価するためには、衝突に伴う船体運動（External dynamics）と船体構造の吸収エネルギー（Internal mechanics）の連成評価が重要となる。

その評価方法として、いくつかの種類があるが、近年の計算機の発展に伴い、非線形有限要素解析（以降、NLFEAと表記）が一般的に用いられる³⁾。しかしながら、External dynamicsにおける船体運動に伴う流体力影響（付加質量等）は、解析コスト低減のため一般的に無視されるか、簡略化されることが多い。簡略化する方法の1つとして、CAM法（Constant Added Mass Method）がある。これは、一定の付加質量を船体の排水質量に付与し、全船衝突・座礁解析を実施する方法である。Minorsky⁴⁾は、衝突時の被衝突船のSway運動の付加質量係数として0.4を提案している。元良ら⁵⁾は、被衝突船の等価付加質量係数（造波減衰力の影響を含む）が、衝突時間が長くなるにつれて0.4より大きくなることを報告している。しかしながら、被衝突船の流体力影響を適切に評価可能な等価付加質量係数の合理的かつ具体的な値については、未だ報告されておら

ず明らかになっていない。

そこで本研究では、満載状態の二重船殻VLCC同士の衝突を対象に、被衝突船のSway運動を解析することで、流体力影響を適切に評価可能な等価付加質量係数について検討する。被衝突船の適切な等価付加質量係数を導出することができれば、より簡易かつ合理的な耐衝突性能評価が可能となる。なお、本検討には、商用のNLFEAプログラムLS-DYNAに実装されている流体構造連成解析方法のMCOLおよびS-ALE（Structured Arbitrary Lagrangian and Eulerian）を使用する。

2. 衝突解析における流体構造連成方法の概要

2.1 MCOL

MCOLは、LS-DYNAの衝突解析における流体力影響を効率的に考慮することができるサブプログラムである⁶⁾。具体的には、付加質量、造波減衰力（メモリー影響）、復原力、粘性力を考慮した衝突解析を実施することができる。付加質量や造波減衰係数は、別途ポテンシャル理論に基づく解析プログラム等を用いて算出する必要がある。

MCOLは、船体を1質点6自由度の剛体と仮定して次の運動方程式を解く⁷⁾。

$$\begin{aligned} [M + M_A][\ddot{x}] + [G][\dot{x}] \\ = [F_W(\dot{x})] + [F_H(x)] + [F_V(\dot{x})] + [F_C] \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 M と M_A はそれぞれ、船体の排水質量／慣性マトリックスと周波数無限大時の付加質量／慣性マトリックス、 G はジャイロマトリックス、 F_W 、 F_H 、 F_V 、および F_C はそれぞれ、造波減衰力（メモリー影響）、復原力、粘性力、および接触力を表す。 F_W において、次式に示すメモリー影響を計算する。

$$F_W = - \int_0^t [G(\tau)][\dot{x}(t - \tau) - \dot{x}(0)]d\tau \quad (2)$$

*1 本論文は、著者らが執筆した日本船舶海洋工学会講演会論文集 第34号 449-455頁の転載（一部改変）であり、公益社団法人日本船舶海洋工学会から許可を頂いたものである。

* 技術研究所

** 坂出支部（研究当時：技術研究所）

*** 次世代環境船舶開発センター（研究当時：技術研究所）

ここで,

$$G(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} [C(\omega)] \cos(\omega\tau) d\omega$$

$C(\omega)$ は造波減衰係数マトリックスを表す。本研究では、3次元グリーン関数法プログラムを用いて、周波数無限大時の付加質量/慣性マトリックスおよび周波数0.02~2.38rad/sの範囲(0.04rad/s刻み)の造波減衰係数マトリックス $C(\omega)$ を算出した。また、粘性力項において抗力係数 C_D の値を指定する必要があるが、本研究ではVLCCを取り扱うため $C_D = 0.8$ (Sway方向)と仮定した⁸⁾。

2.2 S-ALE

ALE法は、流体構造連成解析方法の1つであり、衝突解析等の複雑な非線形現象に適用することができる。LS-DYNAに実装されているALEは、これまでに船舶の衝突に関する研究に使用されてきた実績がある⁹⁻¹¹⁾。最近では、このALEを高効率化したS-ALEと呼ばれる機能が利用可能である。S-ALEは、並列化効率の向上により、従来のALEより高速化されている。本研究では、このS-ALEを使用する。S-ALEは従来のALEと同様に、構造体をLagrangian要素、流体をEulerian要素でモデル化する。

本研究で利用したモデルをFig. 1に示す。流体として海水と空気をモデル化し、文献¹²⁾を参考に決定した物性値(MAT)および状態方程式(EOS)の値をTable 1に示す。また、流体の全表面にアンビエント要素を配置し、無限領域場を模擬した。

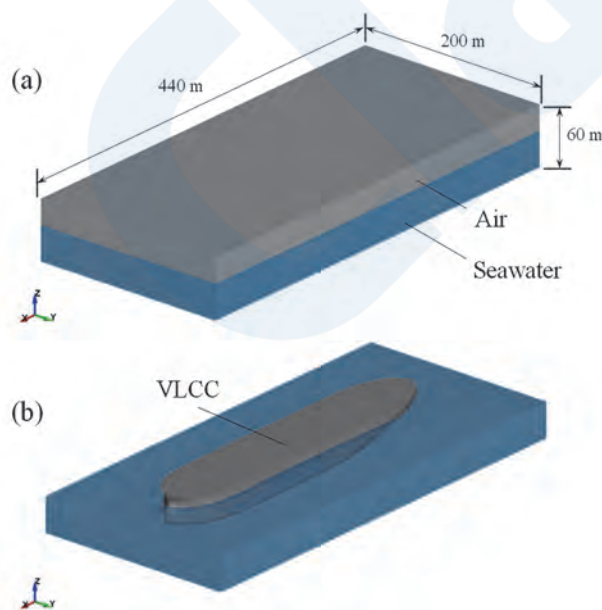


Fig. 1 FE-model for S-ALE: (a) dimensions of fluid domain; (b) VLCC which floats on fluid domain.

Table 1 Material properties for seawater and air.

Seawater		
*MAT NULL	Density, ρ (kg/m ³)	1025
	Pressure cutoff, P_c (Pa)	-100
	Viscosity coefficient, μ (Pa·s)	1.075×10 ⁻³
*EOS GRUNEISEN	Nominal sound speed, C (m/s)	1500
	S1, S2, S3, GAMAO, A, E0	0.0
	V0 (-)	1.0
Air		
*MAT NULL	Density, ρ (kg/m ³)	1.1845
	Pressure cutoff, P_c (Pa)	-10
	Viscosity coefficient, μ (Pa·s)	1.850×10 ⁻⁵
*EOS LINEAR POLYNOMIAL	C0, C1, C2, C3, C6	0.0
	C4, C5 (-)	0.4
	E0 (Pa)	2.533×10 ⁵
	V0 (-)	1.0

2.3 MCOLと従来のALEとの違い

Rudanら¹¹⁾は、MCOLと従来のALEを用いて、衝突時の接触力を模擬した荷重をLPG船に与えることでSway速度について解析し、両者の比較を実施した。結果として、MCOLから得られたSway速度の方が、従来のALEから得られたSway速度より大きくなるということを報告している。LS-DYNAのALEでは、流体解析において抗力計算を実施できないが、一方でMCOLでは簡易的に抗力を考慮することが可能である。その点において両者で違いが存在する。しかしながら、MCOLとALEで差異が生じる具体的な理由について詳細は判明していない。そこで本研究では、各流体力影響評価方法(MCOL, S-ALE, CAM法)を用いて、VLCCに対するSway速度、接触力、吸収エネルギーを解析し、比較検証を実施する。

3. 全船衝突解析

3.1 衝突シナリオ

危険な衝突シナリオとして、衝突船のサイズが被

衝突船と同等以上で、衝突船の運動エネルギーが大きいシナリオが一般的に考えられる。そこで本研究では、衝突船および被衝突船は同一船で、共に満載状態と仮定した。対象船（二重船殻VLCC）の主要目をTable 2に示す。また、Fig. 2に示すように、衝突船の中心線が被衝突船の重心位置に対して直角に衝突すると仮定し、被衝突船がSway運動するように設定した。衝突船の船速は3, 6, 9ktの3種類とし、被衝突船は停止状態とした。

Table 2 Principal particulars of VLCC.

Dimensions	Value
Length, L_{oa} (m)	333
Length, L_{pp} (m)	324
Breadth, B (m)	60
Draft, d (m)	20.5
Displacement, Δ (ton)	3.418×10^5

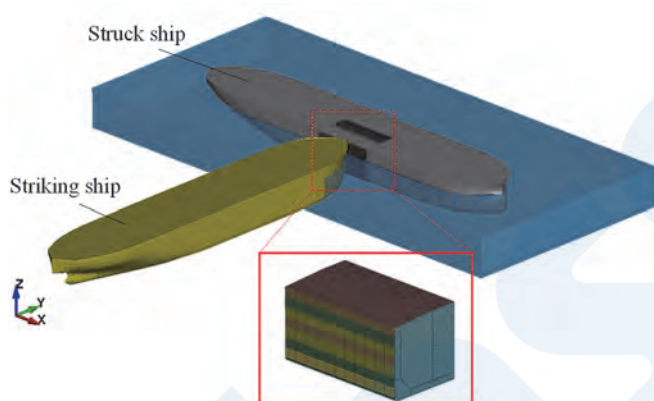


Fig. 2 FE-model for S-ALE between two ships in collision.

3.2 解析モデルおよび解析条件

本研究では、解析にNLFEAプログラムLS-DYNA (ver. mpp d R12.0.0) を使用した。Fig. 2にS-ALEを使用した場合の衝突船と被衝突船のFEモデルを示す。衝突船と被衝突船の全船モデル（船体形状のみ）は、共に剛体（1質点6自由度）とした。また、被衝突船の船体中央部右舷側の船長方向1タンク範囲を弾塑性体で別途モデル化した。その船体中央部右舷側モデルの横隔壁（剛体）を、剛体同士を結合できるLS-DYNAの*CONSTRAINED RIGID BODIESを用いて全船モデル（剛体）に結合した。このように結合した理由は、流体構造連成の解析上の制約である。すなわち、S-ALEを使用するにあたり、構造体要素サイズと流体要素サイズをほぼ等しくする必要があるが、弾塑性体部の要素サイズは非常に細かい（約100mm×100mm）

これと同サイズの流体要素を用いることが解析コストの観点から不可能なためである。したがって、より大きな要素サイズ（約4m×4m）を適用した全船モデルに、船体中央部右舷側モデルを取り付け、全船モデルのみが流体要素と連成することにより、効率的な流体構造連成解析が可能となる。ここで、全船モデルと船体中央部右舷側モデルの要素が重なるものの、衝突船の船首部が被衝突船の船体中央部右舷側モデルのみと接触するよう（全船モデルとは接触しないよう）設定することにより、衝突解析におけるExternal dynamicsとInternal mechanicsの連成評価が可能となる。この方法は、従来研究^{10,11}において用いられている。衝突船と被衝突船の解析条件をまとめた表をTable 3に示す。なお、全船モデルの要素サイズ（約4m×4m）は、S-ALEにおける収束計算を実施した上で決定し、船体中央部右舷側モデルの要素サイズ（約100mm×100mm）は、従来研究¹³を参考に決定した。

船体中央部右舷側モデルの全部材をシェル要素（4節点のBelytschko-Tsay要素）で作成し、要素数は約264万要素となった。真応力-真ひずみ関係に基づく材料定数等をTable 4に示す。材料構成則としてLS-DYNAの*MAT PIECE-WISE LINEAR PLASTICITY (024) を使用し、ひずみ速度依存性をCowper-Symondsモデルを用いて考慮した。また、相当塑性ひずみがTable 4に示す破断ひずみの値に達したとき、要素が削除されることで当該部材の破断を表現した。この破断ひずみの値は、メッシュサイズを勘案しつつ従来研究¹³を参考に決定した。静的/動的摩擦係数は0.3とした。本研究では、各流体力影響評価方法の相対比較および等価付加質量係数の検討を目的とするため、上記の弾塑性体部の材料定数等については簡易的に仮定したことに注意が必要である。

Table 3 Analysis condition.

	Struck ship	Striking ship
Loading condition	Full	Full
Motion	6-DoF	Surge
Velocity (kt)	0.0	3.0, 6.0, 9.0
Hull (including bow)	Rigid	Rigid
Tank	Elasto-plastic	-
Coupling with fluid	Hull	-

Table 4 Material properties for the tank (true stress-strain)¹³⁾.

Steel grade	MS	HT32	HT36
Yield stress, σ_y (MPa)	235	315	355
Ultimate tensile stress, σ_u (MPa)	450	530	560
Critical failure strain, ε_{cr} (-)	0.20	0.167	0.15
Density, ρ (kg/m ³)	7850	7850	7850
Young's modulus, E (GPa)	206	206	206
Poisson's ratio, ν (-)	0.3	0.3	0.3
Tangent modulus, E_t (MPa)	1085	1303	1385
Strain rate parameter, C (-)	40.4	3200	3200
Strain rate parameter, P (-)	5.0	5.0	5.0

4. 解析結果

4.1 Sway速度（剛体）

前述したように、LS-DYNAのMCOLと従来のALEで解析したSway速度に差異が生じることが報告されている¹¹⁾。そこで、まず初めに、全船モデル（剛体、1質点6自由度）のみのSway速度について、各流体力影響評価方法（MCOL, S-ALE, CAM法）を用いて解析し、得られた結果を比較した。本研究では、船体重心にFig. 3に示すような衝突時の接触力を模擬した荷重（sin波、作用時間5秒）をSway方向に与えることで対象船を運動させた。この荷重は、衝突船の前進速度が6ktのときの全船衝突解析で得られた接触力を模擬している。

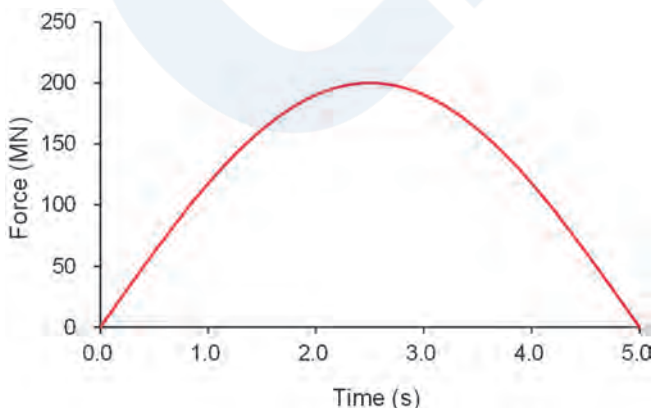


Fig. 3 Force assumed in sine wave similar to contact force during collision.

Fig. 4は、各流体力影響評価方法におけるSway速度の比較結果を示す。まず初めに、MCOLとS-ALEの結果は、良好に一致していることが確認できる。従来研究において、これらは一致しないと報告されていたが、本研究では一致した。この違いが生じた理由の詳細は判明していないが、従来研究と本研究における船種等の違いが一因と推定される。また、前述したとおりLS-DYNAのALE（S-ALEを含む）では抗力計算を実施できないが、MCOLでは簡易的に抗力を考慮することが可能である。ただし、本解析においてS-ALEとMCOLのこの違いがSway速度に与える影響は小さいと考えられる（詳細は後述する）。続いて、CAM法を用いた場合、等価付加質量係数の大きさが大きくなるにつれてSway速度が小さくなることが確認できる。これは等価付加質量係数が大きくなると実質的に排水質量が大きくなるため、当然の結果である。また、等価付加質量係数が0.4のCAM法の結果は、3秒程度までMCOLやS-ALEの結果と一致していることが確認できる。元良ら⁹⁾は、衝突時間が短い場合、等価付加質量係数0.4を用いることで流体力影響を評価することができると報告しているが、それと同様の傾向となった。一方で、時間の経過とともに、MCOLやS-ALEから得られた速度は低下するのに対し、CAM法から得られた速度は、ある一定の値に収束することが確認できる。これは、MCOLやS-ALEでは時間変化する造波減衰力の影響（メモリー影響）を考慮しているのに対し、CAM法では減衰影響を等価付加質量係数に含めた一定値として考慮しているためである。これを裏付ける結果をFig. 5に示す。

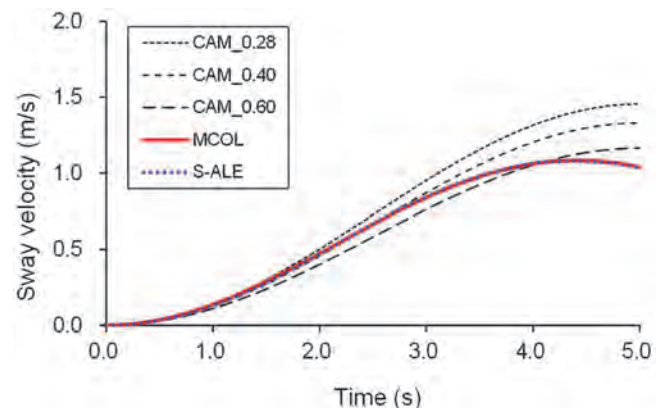


Fig. 4 Sway velocity of VLCC obtained by FEA with MCOL, S-ALE, and CAM. Equivalent added mass coefficients in CAM are 0.28 (infinite frequency), 0.40, and 0.60.

Fig. 5は、MCOLにおける各流体力影響（付加質

量、造波減衰力（メモリー影響）、復原力、粘性力）をすべて考慮した場合と、それぞれ考慮しない場合のSway速度を表している。本解析において、復原力と粘性力（抗力）の影響は、非常に小さいことが確認できる。また、時間の経過とともに造波減衰力の影響（メモリー影響）が大きくなることが確認できる。このため、等価付加質量係数を用いたCAM法は、時間の経過とともにMCOLやS-ALEから得られたSway速度と差異が生じることになる。この差異が、衝突時の被衝突船の吸収エネルギーに、どの程度の影響を与えるのか調査が必要であると考えられる。当該調査結果を次節に示す。

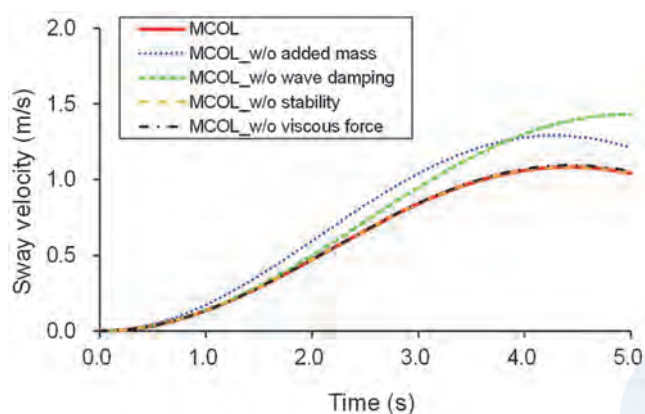


Fig. 5 Hydrodynamics effects on sway velocity of VLCC obtained by FEA with MCOL.

4.2 Sway速度, 接触力, 吸収エネルギー（弾塑性体）

船体中央部右舷側モデル（弾塑性体）を全船モデル（剛体, 1質点6自由度）に取り付け、各流体力影響評価方法（MCOL, S-ALE, CAM法）を用いて全船衝突解析を実施した。ただし、本研究では、被衝突船のみに対して流体力影響を考慮している。衝突船はSurge運動のみ可能であり、流体との連成は考慮していない。本研究では、被衝突船の等価付加質量係数の検討に主眼を置いているため、衝突船の流体力影響の考慮については今後の課題としたい。

まず初めに、Fig. 6に衝突船の前進速度が6ktの場合の、S-ALEにおける解析終了時の様子を示す。図より自由表面が攪乱されている様子が確認できる。

次に、Fig. 7に衝突船の前進速度が3, 6, 9ktの場合の、S-ALEにおける解析終了時の被衝突船の弾塑性体部のダメージの様子（変形および相当塑性ひずみ分布）を示す。衝突船の前進速度が大きくなるにつれて被衝突船の変形が大きくなることが確認できる。本研究では、衝突船の船首部を剛体としたため、当該衝突シナリオにおいて被衝突船に発生した変形・ダメージは、衝突船を弾塑性体でモデル化

した場合に比して過大であることに留意を要する。



Fig. 6 Sway motion of the struck ship and disturbed fluid surface obtained by NLFEA with S-ALE at final time of simulation. Surge velocity of the striking ship is 6 kt.

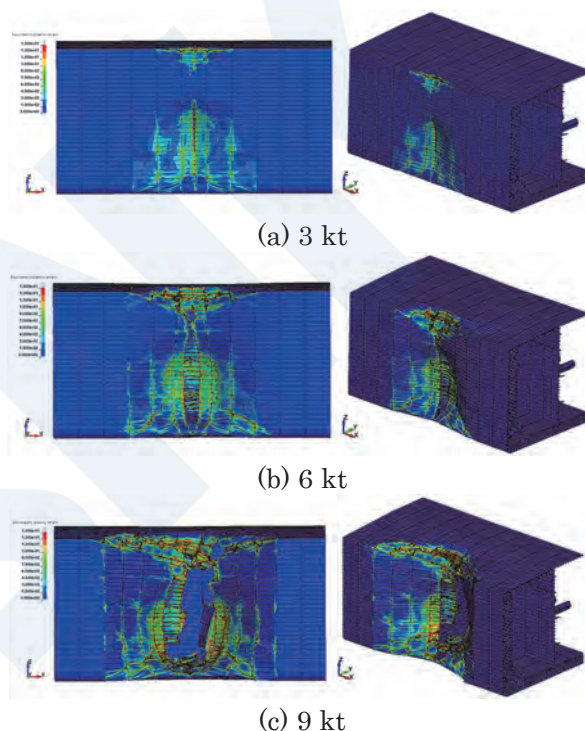
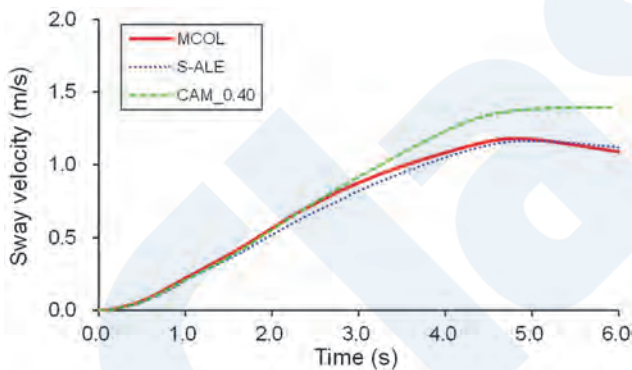


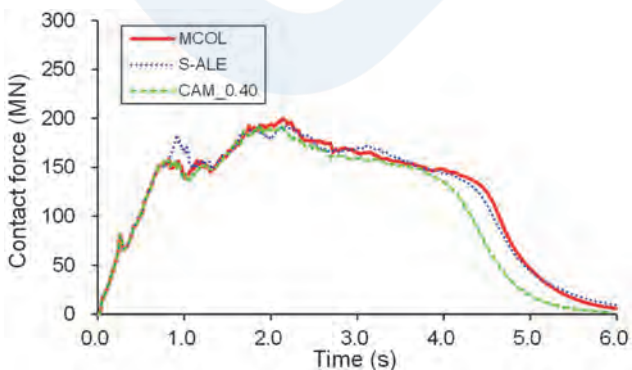
Fig. 7 Structural damage (deformation and equivalent plastic strain) of the struck ship obtained by NLFEA with S-ALE at final time of simulation. Surge velocity of the striking ship: (a) 3 kt; (b) 6 kt; and (c) 9 kt.

続いて、Fig. 8(a)に衝突船の前進速度が6ktの場合の、各流体力影響評価方法から得られた被衝突船のSway速度の比較を示す。図より、MCOLとS-ALEから得られたSway速度は、良好に一致していることが確認できる。前述した全船モデルの場合と同様に、弾塑性体を含めた衝突解析においてもMCOLとS-ALEでほぼ等しい結果を得ることが可能であると言える。一方で、CAM法（等価付加質量係数0.4）を用いた場合、衝突時間3秒程度までMCOLやS-ALEの速度と等しいが、それ以降は、MCOLやS-ALEの速度より大きくなることが確認できる。これは前述したように、減衰影響を一定値として考慮していることに起因する。続いて、Fig.

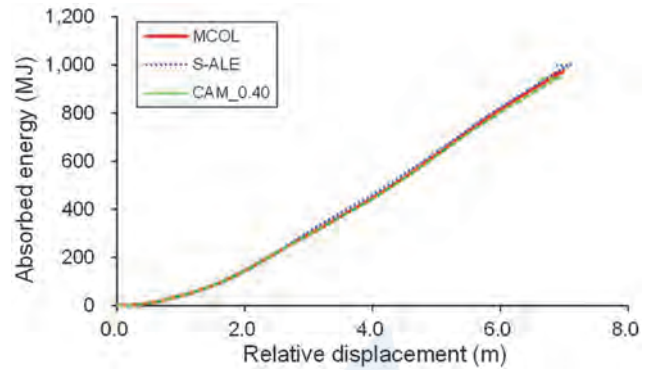
8(b)に接触力の時刻歴を示す。図より、すべての流体力影響評価方法で4秒程度まで、ほぼ等しい接触力履歴となっていることが確認できる。ただし、1秒辺りでS-ALEの傾向が、他の傾向と異なっている。これは、S-ALEのみ重力を考慮した解析を実施しており、この影響により被衝突船が高さ方向にわずかに変位し、衝突船との接触箇所が変化したためである。これを裏付けるために、被衝突船の高さ方向の変位を拘束した解析を別途実施し、接触力履歴が他の流体力影響評価方法（MCOLとCAM法）と一致することを確認した。4秒以降にCAM法のみ接触力が小さくなっているが、これは前述したCAM法での被衝突船のSway速度がMCOLとS-ALEより大きくなるためである。次に、得られた接触力を貫入量（本研究では衝突船と被衝突船の相対変位）で積分することによって算出した吸収エネルギーをFig. 8(c)に示す。結果として、衝突終了時（本研究では衝突船と被衝突船の速度が一致するときと定義）の吸収エネルギーは、CAM法（等価付加質量係数0.4）を1.00として、MCOLが1.02、S-ALEが1.05となった。MCOLとS-ALEの差は3%程度であり、良好に一致している。一方で、CAM法（等価付加質量係数0.4）を用いると、衝突船の前進速度が6ktの場合、耐衝突性能をわずかながら非安全側に推定してしまうことを確認した。



(a) Sway velocity



(b) Contact force



(c) Absorbed energy

Fig. 8 Sway velocity, contact force, and absorbed energy obtained by NLFEA with MCOL, S-ALE and CAM (Equivalent added mass coefficient is 0.4). Surge velocity of the striking ship is 6 kt.

最後に、上記の各流体力影響評価方法を用いた衝突解析のCPU時間（8CPU, MPP）は、CAM法とMCOLで約110時間、S-ALEで約120時間であった。CAM法とMCOLでは、ほぼ差が無かったため、MCOLは解析コストを増加させることなく流体構造連成解析が可能であると言える。また、S-ALEは、他の方法と比較して10時間程度の増加にとどまっており、解析時間が長くなることがデメリットであると考えられたが、本研究の解析条件においては問題なく使用できることを確認した。

4.3 解析解を用いた等価付加質量係数の算出

MCOLとS-ALEを用いた衝突解析で得られた吸収エネルギーから、等価付加質量係数を評価するために、運動量保存則と運動エネルギー損失 ΔE_k を考える。まず、衝突船が被衝突船の重心位置に直角に衝突すると仮定すると、運動量保存則が次式で表される。

$$m_1(1 + A_1)v_1 = [m_1(1 + A_1) + m_2(1 + A_2)]v_c \quad (3)$$

ここで、 m_1 と m_2 は衝突船と被衝突船の排水質量、 A_1 と A_2 は衝突船と被衝突船の等価付加質量係数、 v_1 は衝突船の前進速度、 v_c は衝突終了時の衝突船と被衝突船の共通速度である。続いて、衝突終了時までの運動エネルギー損失 ΔE_k は、次式で表される。

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}m_1(1 + A_1)v_1^2 - \frac{1}{2}[m_1(1 + A_1) + m_2(1 + A_2)]v_c^2 \quad (4)$$

式(3)を共通速度 v_c について変形し、式(4)に代入することで次式を導出できる。

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \frac{m_1(1+A_1)m_2(1+A_2)}{m_1(1+A_1)+m_2(1+A_2)} v_1^2 \quad (5)$$

式(5)はMinorsky⁴⁾によって導出された。そして、本研究では、衝突船と被衝突船は同型船のため、排水質量は $m_1 = m_2$ 、衝突船の等価付加質量は考慮していないため $A_1 = 0$ となり、それらを代入し、まとめると式(5)は次式となる。

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \left(\frac{1+A_2}{2+A_2} \right) m_1 v_1^2 \quad (6)$$

結果として運動エネルギー損失 ΔE_k は、衝突船の初期運動エネルギー $m_1 v_1^2/2$ と被衝突船の等価付加質量係数 A_2 で表される。

まず初めに、式(6)と、CAM法（等価付加質量係数0.4）を用いたNLFEAから得られた運動エネルギー損失を比較することによって解析精度の検証を実施した。ここで、本研究での運動エネルギー損失は、言い換えると被衝突船の衝突終了時の内部エネルギーや接触（摩擦）エネルギーの吸収エネルギーであるため、衝突終了時のCAM法の吸収エネルギー（Fig. 8(c)における最大値）と式(6)で計算した値を比較した。衝突船の前進速度が6ktの場合、CAM法から得られた吸収エネルギーの値は948MJ、式(6)の値は950MJであり、誤差約0.2%で良好な一致を示した。結果として、本研究での衝突解析結果は妥当であると言える。以降、式(6)から得られる値は、CAM法を用いたNLFEAから得られる値と等しいとする。CAM法を用いたNLFEAは、衝突船の前進速度6ktの場合のみ実施した。Table 5に、衝突船の前進速度を変化させた場合の、MCOLとS-ALEを用いたNLFEAから得られた吸収エネルギーを、式(6)で計算した値（等価付加質量係数0.4）で無次元化した結果を示す。まず初めに、MCOLとS-ALEの結果を比較すると、衝突船の前進速度が変化しても、差が3%程度であり、両者でほぼ等しい結果が得られたことが確認できる。そして、式(6)で計算した値（等価付加質量係数0.4）は、最大で約8%、耐衝突性能を非安全側に推定してしまうことが確認できる。したがって、衝突船の前進速度等の変化に関わらず、等価付加質量係数を0.4一定で取り扱うことは適切でないと言える。

Fig. 9に衝突船の初期運動エネルギー $m_1 v_1^2/2$ に対するMCOLとS-ALEから得られた吸収エネルギーを示す。同図より、初期運動エネルギーと吸収エネルギーは比例関係にあることが確認できる。これは式(6)からも確認できる。そして、MCOLとS-ALE

の結果の近似直線から傾きを取得し、式(6)の右辺の等価付加質量係数項 $(1+A_2)/(2+A_2)$ と等しいとすることで、MCOLとS-ALEの結果から逆算した等価付加質量係数を得ることができる。結果として、MCOLから逆算した等価付加質量係数は0.57、S-ALEは0.68となり、従来使用されてきた等価付加質量係数0.4より大きくなることを確認した。これは、緒言で述べたように元良ら⁹⁾の報告と一致する。ここで、MCOLとS-ALEの等価付加質量係数0.57と0.68で、約20%の差が存在するが、吸収エネルギーは、前述したように両者で約3%の差であるため、等価付加質量係数の変化が吸収エネルギーの変化に与える影響は小さいと考えられる。したがって、本研究での衝突条件等において、対象船の衝突終了時までの吸収エネルギーを評価する場合、等価付加質量係数を例えば0.7とすることで、耐衝突性能を合理的かつ安全側に評価できると考えられる。

Table 5 Energy of the struck ship obtained by NLFEA with MCOL and S-ALE.

Surge velocity of striking ship (kt)	Energy* (MCOL/Eq. (6))	Energy* (S-ALE/Eq. (6))
3.0	0.99	1.04
6.0	1.02	1.05
9.0	1.05	1.08

*Note: Energy represents the value of absorbed energy obtained by NLFEA with MCOL or S-ALE divided by Eq. (6) with equivalent added mass coefficient 0.4.

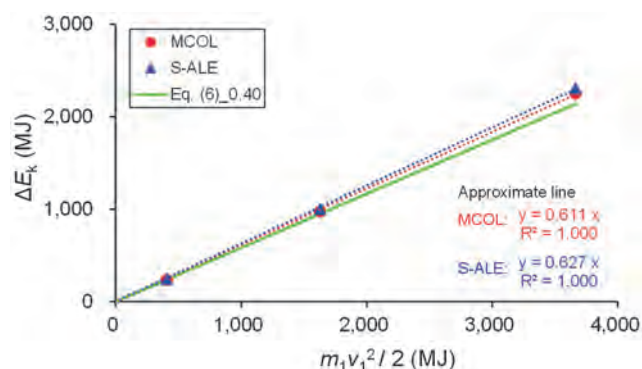


Fig. 9 ΔE_k obtained by NLFEA with MCOL and S-ALE.

5. 結言

本研究では、商用のNLFEAプログラムLS-DYNAを用いて、満載状態の二重船殻VLCC同士の

衝突に対する流体構造連成解析 (MCOLおよびS-ALEを使用) を実施し, 被衝突船のSway運動に対する等価付加質量係数について検討した。被衝突船の適切な等価付加質量係数を導出することで, より簡易かつ合理的な吸収エネルギーの評価が可能となる。得られた知見を以下に示す。

- (1) 被衝突船のSway速度評価において, LS-DYNAで使用できるMCOLとS-ALEで, ほぼ等しい結果を得ることが可能である。
- (2) 従来使用されている等価付加質量係数0.4を用いて被衝突船の衝突終了時の吸収エネルギーを評価すると, 衝突船の前進速度によっては, MCOLやS-ALEから得られた吸収エネルギーより小さく推定してしまい, 耐衝突性能を非安全側に評価する可能性がある。
- (3) 等価付加質量係数の変化が, 吸収エネルギーの変化に与える影響は小さく, 耐衝突性能を合理的かつ安全側に評価するためには, 被衝突船 (二重船殻VLCC) のSway運動の等価付加質量係数を0.7程度に設定することが妥当である。

本研究では, 被衝突船として二重船殻VLCCのみを取り扱ったため, 今後の課題として, 船種等を変更した衝突解析の実施が挙げられる。

参考文献

- 1) DNV: The tank punch test.
<https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/The-tank-punch-test.html>, accessed on 21st February 2022.
- 2) Lloyd's Register: Guidance notes for assessment for the location of low-flashpoint fuel tanks, July 2016.
- 3) J. W. Ringsberg et al.: MARSTRUCT benchmark study on nonlinear FE simulation of an experiment of an indenter impact with a ship side-shell structure, *Marine Structures*, Vol 59, pp. 142-157, 2018.
- 4) V. U. Minorsky: An analysis of ship collision with reference to protection of nuclear power ships, *Journal of Ship Research*, Vol 3 (2), pp. 1-4, 1959.
- 5) 元良誠三ら: 衝突時の等価付加質量について, *日本造船学会論文集*, 第126号, pp. 141-152, 1969.
- 6) 遠藤久芳, 山田安平: 衝突・座礁のCAE, *日本造船学会誌*, 第876号, pp. 763-767, 2003.
- 7) H. L. Sourne et al.: LS-DYNA applications in shipbuilding, 4th European LS-DYNA Users Conference, pp. 1-16, 2003.
- 8) K. G. Oh, K. Hasegawa: Prediction of ship hull hydrodynamic force and moment in low speed, *日本船舶海洋工学会講演会論文集*, 第15号, pp. 201-204, 2012.
- 9) S. G. Lee et al.: Full-scale ship collision, grounding and sinking simulation using highly advanced m&s system of fsi analysis technique, *Procedia Engineering*, Vol 173, pp. 1507-1514, 2017.
- 10) M. Song et al.: Fluid-structure interaction analysis of ship-ship collisions, *Marine Structures*, Vol 55, pp. 121-136, 2017.
- 11) S. Rudan et al.: Numerical study on the consequences of different ship collision modelling techniques, *Ships and Offshore Structures*, Vol 14, pp. 387-400, 2019.
- 12) LS-DYNA AWG: Modeling Guidelines Document, Version 13-1, 2013.
https://www.predictiveengineering.com/sites/default/files/awg_ls-dyna_modeling_guidelings_document_v13-1.pdf, accessed on 26th January 2022.
- 13) O. Ozguc: Numerical assessment of FPSO platform behaviour in ship collision, *Transactions on Maritime Science*, Vol. 9 (2), pp. 161-186, 2020.

IMOの動向

— IMOでの主な審議内容・結果の紹介 —

開発本部 国際部

1. はじめに

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

前号では、2022年12月に開催された第79回海洋環境保護委員会（MEPC 79）及び2022年11月に開催された第106回海上安全委員会（MSC 106）の審議内容を紹介した。

今号では、2023年7月3日から7日に開催された第80回海洋環境保護委員会（MEPC 80）及び2023年5月31日から6月9日に開催された第107回海上安全委員会（MSC 107）の主な審議結果を紹介する。なお、MEPC 80で審議された温室効果ガス（GHG）関連の議題については、本稿に加えて別稿「国際海運からのGHG排出削減に関する最新動向」を併せて参照されたい。

2. MEPC 80の審議結果—海洋環境保護関連—

2.1 温室効果ガス（GHG）関連

2.1.1 燃料消費実績報告制度の見直し

2019年より燃料消費量等の運航データの収集及び報告が義務付けられている燃料消費実績報告制度（IMO DCS）について、主に報告データの粒度の強化及び報告する項目を拡充するための見直し作業が2022年より進められている。

今回の会合では、IMO DCSで報告が要求される以下の項目の修正及び追加を含むMARPOL条約附属書VI付録IXの改正案が承認された。

1. 燃料を使用する機器ごとの燃料消費量（主機、補機及びボイラ等）
2. 航海以外での燃料消費量
3. 航海距離（積荷航海距離をボランティアで提出可）
4. 貨物輸送量
5. 総陸電供給量
6. エネルギー効率向上のための革新的技術の種類

本改正案は次回MEPC 81で採択される見込みとなっている。なお、「貨物輸送量」に関しては実貨物量を基に算出することも併せて合意されており、その詳細等も含め、次回MEPC 81にて関連ガイド

ラインの修正について検討されることとなった。

2.1.2 EEDI規制における非常用出力

エネルギー効率設計指標（EEDI）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）には出力制限を解除することを認めるコンセプトを導入することについて、これまでの会合において合意されている。

今回の会合では、本コンセプトの導入に向けてEEDI計算における主機出力（ P_{ME} ）の定義、 NO_x 認証において参照すべき連続最大出力（MCR）、及び NO_x テクニカルコードへの影響について審議がなされた。特に P_{ME} の定義については、EEDI規制の制限最大出力（ MCR_{lim} ）の75%を基準とするか、 MCR_{lim} の83%とMCRの75%のいずれか小さい方の値を基準とすべきかについて各国で意見が分かれたが、本件を含め合意には至らなかったことから、次回MEPC 81以降に継続して審議されることとなった。

2.1.3 船上CO2回収装置

船舶の排ガスからCO2を分離・回収することで、船舶から排出されるGHGを削減する船上CO2回収（OCC）技術が開発・検証され始めている。前回の会合において、OCC装置を搭載している場合、回収されるCO2量をEEDI、就航船のエネルギー効率指標（EEXI）及び燃費実績格付け制度（CII）の計算において考慮すべき、との提案があった。

今回の会合では、OCC装置の使用を認めるための規制枠組みを検討するため、温室効果ガスに関する中間作業部会（ISWG-GHG）において新規議題を設置することが合意された。

2.2 バラスト水管理条約関連

2.2.1 バラスト水管理条約の見直し

バラスト水管理条約が発効した2017年以降、同条約の履行状況を評価し条約要件の見直しを検討するための経験蓄積期間（EBP）が設けられており、これまで条約レビュー計画（CRP）の策定作業が通信部会によって進められていた。

今回の会合では、条約要件の見直しに向けた優先改正事項を含むCRPが採択された。今後、改めて通信部会が設置され、次回MEPC 81に向けて条約要件の見直し作業が継続されることとなった。なお、条約要件の改正案はMEPC 84（2026年春）を目処

に承認され、MEPC 85（2026年秋）を目処に採択される見通しとなっている。

2.2.2 水質に問題がある海域でのバラスト水管理並びに処理済み汚水及びグレーウォータの一時貯留

バラスト水処理装置（BWMS）の正常な連続運転が困難となるような水質の港湾があることを受け、そのような港湾ではBWMSを通さないバイパス処理によってバラスト水を取水し、処理装置が正常に運転できる海域においてバラスト水交換（BWE）及びバラスト水処理（BWT）を行うための暫定ガイダンスが提案されている。今回の会合では、バイパス処理を開始すべき時期や、通常の運転を再開すべき時期等に関する意見があったが、全般的な合意が得られなかったため、次回MEPC 81にて引き続き議論が行われることとなった。

また、特定の港湾において処理済みの汚水やグレーウォータの排出が禁止されていることから、該当する港湾においてバラストタンクに汚水やグレーウォータを一時貯留する際に実施すべき措置等を示すガイダンスが提案されている。今回の会合では複数のガイダンス案について議論されたが、時間の制約上、次回MEPC 81までにガイダンス案を統合する作業を実施した上で改めて議論が行われることとなった。

2.2.3 バラスト水適合監視装置の試験手順

バラスト水管理条約では、船外排出されるバラスト水に要求される体積当たりの生物含有数が規定されている。この規定への適合性を確認するため、バラスト水のサンプルを採取し分析するバラスト水適合監視装置が利用されており、同装置に対する試験手順を作成すべく、汚染防止・対応小委員会（PPR）において検討が進められていた。

今回の会合では、バラスト水適合監視装置を検証するための試験手順が採択された。本試験手順に従って承認された適合監視装置は、PSCサンプリング時や船上モニタリングにおいて利用されることが期待される。

2.2.4 バラスト水管理条約証書様式の統一解釈

主要な改造を受けた船舶に対する、バラスト水管理条約の証書様式上における建造日の取扱いを明確化する統一解釈案がPPRで作成され、今回の会合において採択された。

2.2.5 バラスト水記録簿関連

今回の会合で採択された強制要件であるバラスト水記録簿（BWRB）の書式の改正に関連し、BWRBの記録例を示すガイダンスが採択された。

また、バラスト水電子記録簿の利用促進を目的としたガイドラインが採択され、関連するバラスト水管理条約A-1及びB-2規則の改正案が承認された。同条約改正案は次回MEPC 81にて採択される見込みとなっている。

2.3. 大気汚染防止関連

2.3.1 低引火点燃料油及びガス燃料に対する燃料油供給証明書関連要件の改正

前回の会合において、安全上の観点から燃料油供給証明書（BDN）に燃料油の引火点を記載するようMARPOL条約附属書VIの改正が採択された。一方で、低引火点燃料及びガス燃料に対するBDN関連要件の適用に関する明確化が求められていた。

今回の会合では、低引火点燃料油及びガス燃料に対するBDNの所持及び記載事項等に関する要求を明確化したMARPOL条約附属書VIの改正案が承認された。本改正案は次回MEPC 81で採択される見込みとなっている。

2.4. その他の審議事項

2.4.1 船体付着生物の越境移動の抑制

2011年に採択された船体付着生物管理ガイドライン（決議MEPC.207(62)）について、その実用性及び有効性の評価による見直し作業が2020年より行われている。

今回の会合では、船体防汚システム（AFS）の適用に応じた船体の部分ごとの点検頻度及び同点検結果に基づく船体清掃の推奨方法などに関する要件を盛り込んだ船体付着生物管理ガイドラインの改正版が採択された。今後2025年にかけて、船体水中洗浄におけるバイオマスや粒子の回収率要件などに関するガイドラインの検討を行うことが合意された。

2.4.2 有害物質インベントリ作成ガイドラインの改正

2023年1月より船体防汚塗料としてのシブトリンの使用が制限されていることを受け、「2009年の船舶の安全かつ環境上適正な再生利用のための香港国際条約（通称シップリサイクル条約）」において作成が要求される有害物質インベントリ（IHM）に記載すべき有害物質としてシブトリンを追加する、有害物質インベントリ作成ガイドライン（決議MEPC.269(68)）の改正版が採択された。

2.5. 採択された強制要件

2.5.1 バラスト水記録簿の書式

バラスト水管理条約の付録IIに定められているバラスト水記録簿（BWRB）の書式について、これまで記録する事項を「項目」（数字）のみで指定する形式とされていましたが、油記録簿（Oil Record Book）と同様に、記録すべき事項を「コード」（ア

ルファベット)と「項目」(数字)に分けて指定する形式とする改正が採択された。この改正は2025年2月1日より発効となる。

3. MSC 107の審議結果—海上安全関連—

3.1 条約及び関連コードの主要な改正の採択

MSC 107で採択された主要な義務要件は以下の通り。

- (1) 揚貨設備及びアンカーハンドリングウインチの安全要件に関するSOLAS条約II-1章の改正
SOLAS条約上で揚貨設備及びアンカーハンドリングウインチに対する安全要件を策定するためのSOLAS条約II-1章の改正が採択された。本改正により、新造船及び既存船に搭載される当該設備に対し、下記3.3.2(1)のガイドラインに従った詳細検査及び荷重試験が要求される。
- (2) パーフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS) を禁止するためのSOLAS条約II-2章等の改正
PFOSを含む消火器の使用を禁止するためのSOLAS条約II-2章及び1994/2000 HSCコードの改正が採択された。
- (3) 電子傾斜計の搭載に関するSOLAS条約V章及びSE証書書式の改正
3,000GT以上のバルクキャリア及びコンテナ船に対し、電子傾斜計の搭載を要求するためのSOLAS条約V章の改正が採択された。また本件に関連し、SE証書上のParticulars of shipにコンテナ船を追加する書式改正が採択された。本要件は、新造のSOLAS条約XII章適用のバルクキャリア及び主としてコンテナを運送する船舶に適用される。
- (4) LSAコードの改正
全閉型救命艇に対する換気要件を新設するためのLSAコードの改正、及び関連の効力試験等を規定するための救命設備の試験に関する勧告(決議MSC.81(70))の改正が採択された。
- (5) IMSBCコードの改正
新規貨物の追加を含む、IMSBCコードの第7回改正 (AMENDMENT 07-23) が採択された。

3.2 承認された条約及び関連コードの主要な改正

今回の会合で承認された主要な義務要件は以下の通り。これらは、2024年5月に開催されるMSC 108にて採択される見込みである。

- (1) IGFコードの見直し及び低引火点燃料に関するガイドライン検討作業の一環として検討された、IGFコードの改正が承認された。また、同コード4.2.2及び8.4.1から8.4.3については早期実施のMSCサーキュラーを発行することが合意された。
- (2) 国際穀類コード(決議MSC.23(59))の改正
特にばら積み穀類の運送に適した区画で、貨物艙ハッチ開口部の途中までの部分積載かつ貨物艙ハッチ開口部の周囲がトリミングされていない積載状態を追加するための国際穀類コードの改正が承認された。
- (3) SOLAS条約II-1章3-4規則の改正
20,000GT以上のタンカー以外の船舶に非常用曳航設備を搭載することを要求するSOLAS条約II-1章3-4規則の改正が承認された。尚、詳細な要件に関しては、既存のガイドラインである決議MSC.35(63)に基づき今後SDC小委員会にて検討される予定。
- (4) LSAコードの改正
次の要件に関するLSAコードの改正、及び関連の効力試験等を規定するための救命設備の試験に関する勧告(決議MSC.81(70))の改正が承認された。
 1. 救命胴衣の水中性性能要件。
 2. 自由降下式を除くつり索によって進水する救命艇に使用される、負荷離脱能力を有する単一のつり索及びフックの要件。
 3. 満載状態の生存艇及び救助艇の最大・最小降下速度の要件。
- (5) SOLAS条約II-2章及びFSSコードの改正
Ro-Ro旅客船等の火災安全に関する下記SOLAS条約II-2章及びFSSコードの改正が承認された。
 1. 主に下記に示す新造及び既存Ro-Ro旅客船の火災安全要件。
 - 固定式火災探知警報装置(熱探知ケーブル)
 - Ro-Ro区域のビデオ監視
 - Ro-Ro及び特殊分類区域における開口配置
 - 暴露甲板の配置
 - 暴露甲板保護のための放水モニター
 2. 貨物船において居住区域だけでなく、全制御室及び貨物制御室にも固定式火災探知警報装置を要求するSOLAS条約II-2章7.5.5規則の改正。

3.3 統一解釈等の承認

今回の会合において承認された統一解釈、ガイドライン及び指針等のうち、主要なものは以下の通り。以下で参照されているIACS統一解釈（UI）は、IACSウェブサイト（<http://www.iacs.org.uk/>）にて公開されている。

3.3.1 統一解釈

(1) IGFコードの統一解釈

1. 開放甲板に位置しない燃料調整室の区画配置及びビルジウエルの要件の適用を明確にするための5.8の解釈。
2. 機器に燃料を移送する管装置においてシングルコモンフランジの使用を制限するための9.2.2の解釈。

(2) IGCコードの統一解釈

1. LNGバンカー船における貨物移送設備には、貨物区域の火災探知及び保護に関する11.3.1.4, 11.3.1.5, 11.4.1, 11.4.3, 18.10.3.2が適用されることを明確にする統一解釈。
2. 4.20.3.5, 4.20.3.6, 4.20.3.7, 5.13.2.5, 13.3.5において最初の満載となる貨物の積荷及び揚荷時に要求される検査の実施に関する統一解釈。

(3) 2008 ISコードの統一解釈 (MSC.1/Circ.1537/Rev.1) の改正

特定の海水流入点の取り扱い（機関区域への給気のため常時開放が要求される風雨密閉鎖装置付きの通風装置を非保護開口とする）に関し、風波中復原性要件のみが適用対象であったものを2008 ISコード全体に適用するための、同コードに関する統一解釈 (MSC.1/Circ.1537/Rev.1) の改正。

(4) SOLAS 条約 II-1 章の統一解釈 (MSC.1/Circ.1362/Rev.1) の改正

下記に関するSOLAS条約II-1章の統一解釈 (MSC.1/Circ.1362/Rev.1) の改正。

1. 係船配置及び設備に関して、主管庁またはROが3-8規則への適合を確認する際に必要となる文書を明確にするための解釈。
2. 旅客船の火災試験後、水密隔壁の貫通部に対する水圧試験の実施が要求されることを明確にするための13.2.3規則の解釈。

(5) LSAコード及び1994/2000 HSCコードの統一解釈

救命いかだ、救命艇及び救助艇に備える「1つの予備の電球」の代替として、1つのLEDの故障が他のLEDの機能を妨げない前提の下、

複数の光源を有するLED式電気灯を認めるための、LSAコード及び1994/2000 HSCコードの統一解釈。

(6) SOLAS II-2章の統一解釈 (MSC.1/Circ.1276) の改正

SOLAS条約II-2章9.7.2.5規則における、調理室のダクトだけでなく一般化された「ダクト」の適用と整合するための統一解釈 (MSC.1/Circ.1276) の改正。本改正は承認日以降に建造契約が締結される船舶に搭載される防火構造、設備及び配置に適用される。

3.3.2 ガイドライン及び指針等

(1) 揚貨設備及びアンカーハンドリングウインチに関するガイドライン

上記3.1(1)のSOLAS改正と併せて承認された、揚貨設備及びアンカーハンドリングウインチに関する2件のガイドライン。

(2) LPG燃料船の安全に関する暫定ガイドライン IGFコードの見直し及び低引火点燃料に関するガイドライン検討作業の一環として作成された、LPG燃料船の安全に関する暫定ガイドライン。

(3) 陸電に関する暫定ガイドライン 国際航海に従事する船舶に給電するための陸電の安全なオペレーションに関する暫定ガイドライン。

(4) SOLAS条約II-1章25規則, II-1章25-1規則, XII章12規則適用船の液面検知計の性能基準 (決議MSC.188(79)/Rev.1) の改正

ビルジウエル底面からの高さの計測について、II-1章25-1.3規則に規定されるビルジ液位センサーに適用されることを明確にするための、SOLAS条約II-1章25規則, II-1章25-1規則, XII章12規則適用船の液面検知計の性能基準 (決議MSC.188(79)/Rev.1) の改正。

(5) 危険区域の分類 (SOLAS条約II-1章45.11規則の適用関連) (MSC.1/Circ.1557) の改正

IEC 60092-502の基準との間の不整合に対応するための、危険区域の分類 (SOLAS条約II-1章45.11規則の適用関連) (MSC.1/Circ.1557) の改正。(IACS UI SC274関連)

3.4 GMDSS関連設備の性能基準の一部適用猶予 (決議MSC.511(105), MSC.512(105), MSC.513(105)の適用関連)

Global Maritime Distress and Safety System (GMDSS) の近代化として、関連の性能基準、ガイドラインや指針が2024年1月1日を発効日として

MSC 105で承認されている。

しかしながら、関連の新規IEC基準の策定作業が遅れていることから、MSC 105で承認された新しい性能基準に適合した船用VHF、MF及びMF/HF無線設備並びにインマルサットC型船舶地球局が発効日までに供給されない懸念が示された。

今回の会合ではこの状況に対処するべく、2028年1月1日までは既存の関連基準（総会決議A.803(19)、A.804(19)、A.806(19)、A.807(19)及びそれらの改正）に適合した設備の搭載を認めることが合意された。

これに従い、決議MSC.511(105)、MSC.512(105)、MSC.513(105)に規定されるGMDSS機器の改正性能基準への適合の遅延に関するMSCサーキュラー及び船用無線設備の有効性に関する指針(MSC.1/Circ.1460/Rev.3)の改正が、今回の会合で承認された。

3.5 自動運航船関連要件の検討

自動運航船の開発が進んでいる中で、その国際規則であるMASSコードの策定がMSCで進められている。

今回の審議では、コレスポネンスグループ（通信作業部会）からの報告や第2回法律委員会（LEG）・簡易化委員会（FAL）との共同作業部会（JWG2）による会合結果等に基づき、自動運航船に関する非義務的ガイドラインの策定作業が進められた。また、作業ロードマップの更新案を議論し、コレスポネンスグループを再設置するとともに、2023年10月末に会期間作業部会を新たに設置し、本年9月に予定されていた第3回共同作業部会（JWG3）を2024年春に延期することで合意された。さらに、義務的コードの発効年（2028年1月）を維持しつつ、採択予定を2025年（MSC 110）から2026年（MSC 111）に変更することで合意された。

3.6 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った燃料油の硫黄分0.50%規制をきっかけとして、燃料油の使用における安全上の問題が検討されている。前回の会合では、給油の際に燃料油供給業者が船舶に提供する燃料油供給証明書に引火点の情報を記載すること等を強制化するSOLAS条約II-2章の改正が採択された。

今回の会合では、MARPOL条約附属書VI 18.3.1.1.3に規定されている燃料油の安全に関する一般規定と同様の規定をSOLAS条約に明記するためのSOLAS条約II-2章の改正案が承認された。また、SOLAS条約及びMARPOL条約の下において共通のサンプリング手法を確立するため、既存ガイド

ライン（決議MEPC.182(59)）を基に、バンカリング時の燃料油サンプリング手法に関するMSCとMEPCの合同ガイドライン案が承認された。このガイドライン案は今後MEPCで承認された後、MSC-MEPCサーキュラーとして発行される予定。

ClassNK 技報

No.8(2023 年(Ⅱ))

編集: 藤浪幸仁

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

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。

© 2023 ClassNK



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