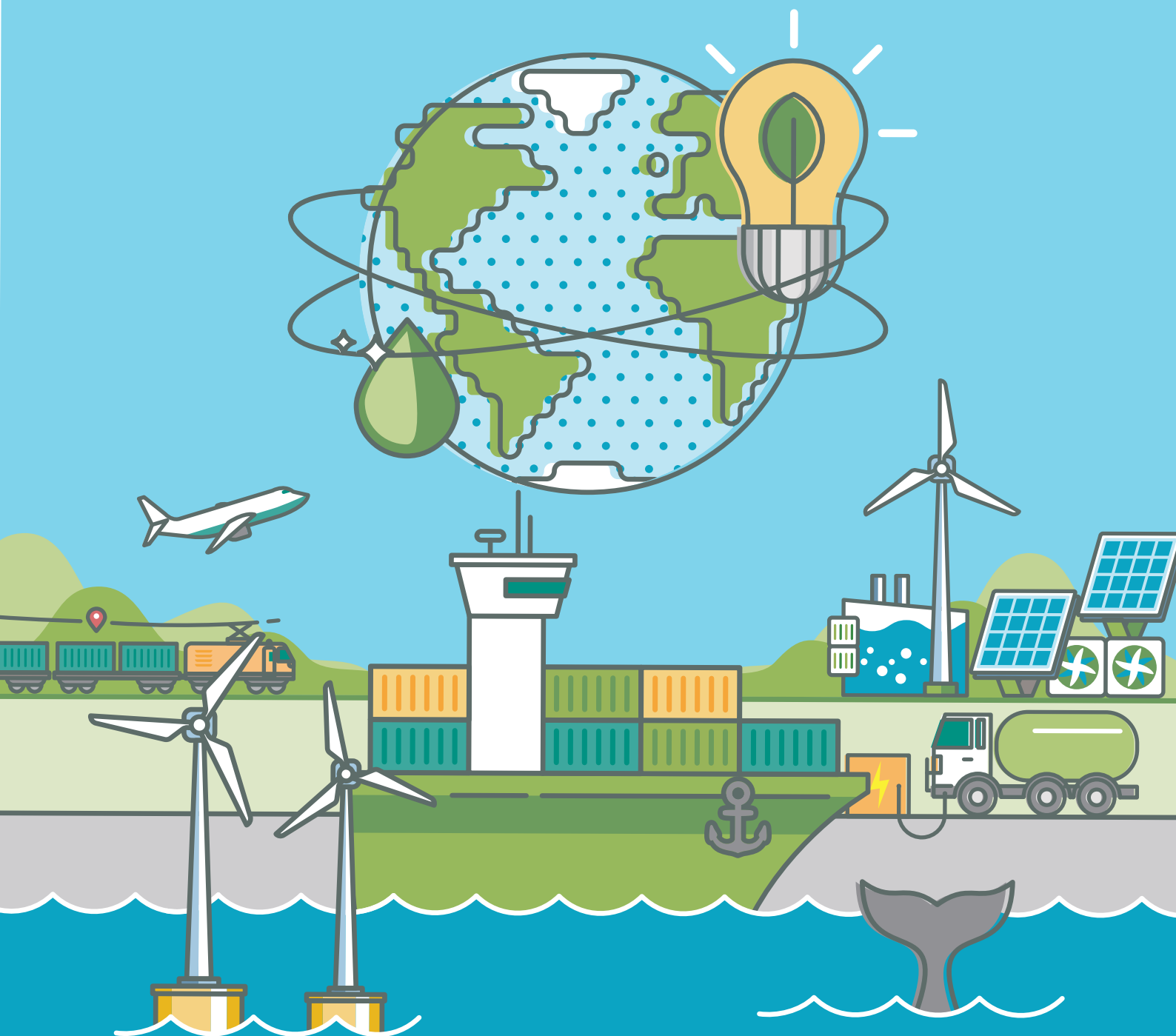


ClassNK 技報

No.10 2024年（Ⅱ）

特集記事： GHG関連の最新動向と NKの取組み



—目 次—

巻頭言	開発本部 技術研究所長 石橋 公也.....	1
-----------	------------------------	---

特集記事 「GHG関連の最新動向とNKの取組み」

ClassNK 代替燃料インサイト

.....企画本部 グリーントランスフォーメーションセンター.....	3
-------------------------------------	---

2050年GHG排出ネットゼロへ向けて、今後は代替燃料の利用が不可欠となる。一方で、船舶で利用可能な代替燃料は多岐にわたることから、適切な燃料選択のためには、代替燃料に関連する技術的事項だけでなく、燃料の調達可能性やコスト見通しなどを含む、代替燃料全体の動向把握が欠かせない。本会は、そのような燃料選択のサポートを目的として、「ClassNK 代替燃料インサイト」を発行している。本稿では、「ClassNK 代替燃料インサイト」の概要について分かりやすく解説する。

IMO船用燃料ライフサイクルGHG強度ガイドライン

.....開発本部 技術研究所.....	15
----------------------	----

MEPC 80で採択された2023年IMO GHG削減戦略では、新たな目標として2050年頃GHG排出ネットゼロが掲げられた。戦略には船用燃料の製造、輸送、船上での使用に至るライフサイクル全体でのGHG排出を考慮することが盛り込まれ、併せて、ライフサイクル全体でのGHG強度（単位エネルギー当たりのGHG排出量）を評価するためのガイドラインも採択された。本稿では、この船用燃料ライフサイクルGHG強度ガイドラインについて、最新情報を交えて解説する。

代替燃料船の動向と本会の取組みについて	技術本部 技術部.....	25
---------------------------	---------------	----

船舶からのGHG排出削減については、IMOのGHG削減戦略の新たな目標として、2050年までに国際海運からのGHGゼロ排出を目指すこととされている。これに対応すべく、業界では新技術・代替燃料導入等に向けた取組みが活発化している。このような背景の中、代替燃料船に関する規則体系、審査体制及び本会がかかわる代替燃料船の動向を説明する。

GHG削減に向けた船舶用Dual Fuel（二元燃料）エンジンの開発動向

.....九州大学 高崎 講二.....	31
----------------------	----

本稿は、昨年のClassNK技報 No.7「GHG削減に向けた船舶用エンジンと燃料開発の取組み」の続報となる。前報では、各代替燃料をエンジンで使用する際の燃焼上の課題と解決策について述べた。本稿では、船舶用Dual Fuel（二元燃料）エンジンが課題を解決して開発されつつある状況を紹介する。経過として、その開発は国内外において技術的には十分勢いがあると言える。

技術一般

船舶サイバーセキュリティ規制の最新動向

.....技術本部 機関部, 認証本部 認証・海技部..... 39

船舶のデジタル化が進む現代, サイバー攻撃のリスクは船舶の安全運航を脅かしている。IACSは, この脅威に対抗するため, 統一規則E26とE27を策定し, 船舶のサイバーセキュリティ対策を強化した。

本稿では, サイバー攻撃の脅威, IMOとIACSの取り組み, E26とE27の要件と目的を解説する。さらに, 本会規則への取り入れ, 独自のガイドライン発行やポータルサイト開設等のサポート体制を紹介する。

CFDによる波浪中垂直曲げモーメントの非線形性の検討

.....開発本部 技術研究所, 開発本部 開発部..... 47

最新の解析技術の一つであるCFDを用いて, また, 設計不規則波による波条件を与えることで, 船体構造設計で考慮する極限海象において生じ得る波浪中の垂直曲げモーメントの非線形性につき, 計55隻の船舶を対象として試算を行った。ホギング及びサギングモーメントそれぞれにおいて生じる非線形影響について分析し, 肥大船及び瘦型船における傾向の差異や, 船舶の主要目に対する感度を観察した。それぞれについて方形係数, 水線面積係数に対する感度が高い傾向であることのほか, 既存規則の一つ (IACS UR S11A) の技術背景資料に記されたデータとマクロの傾向は良い相関があること等を確認した。

3Dレーザースキャナを用いた実船の初期たわみ計測と分析

.....国立大学法人大阪大学大学院, 開発本部 技術研究所..... 59

船体構造を構成する防撓パネルには溶接により初期たわみが生じるが, 隣接パネル間の反対称な成分の初期たわみは, パネルの座屈強度に有意な影響を与える。実船における初期たわみ計測が古くから実施されてきたものの, 隣接パネル間の初期たわみのデータ数は非常に限られている。そこで本研究では, 3Dレーザースキャナを用いて実船の隣接パネル間のデータを取得した。さらに, その初期たわみ形状を予測できる統計モデルを開発した。

IMOの動向開発本部 国際部..... 67

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81回海洋環境保護委員会 (MEPC 81) 及び第108回海上安全委員会 (MSC 108) の審議概要を紹介する。

巻頭言

特集「GHG関連の最新動向とNKの取組み」発刊によせて

開発本部 技術研究所長 石橋 公也

ClassNK技報No.10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.9）では、電気自動車のより安全な輸送に貢献するために世界に先駆けて発行したガイドラインの解説とそれに対応する消火技術に加えて、ロケット回収船等の最新技術動向や最新の研究開発成果等を報告いたしました。

2023年7月にIMO MEPC 80（国際海事機関 海洋環境保護委員会）において「遅くとも2050年頃までにGHGネットゼロ排出を目指す」という野心的目標が策定されました。本会は、GHGネットゼロ排出への円滑な移行を包括的にサポートすることを目的として、「ClassNK トランジション サポート サービス」を展開しております。本号では、お客様のニーズに合わせたソリューションを提案するサポートサービスのメニューの中にある「規制を理解する」「代替燃料サポート」に関連する最新情報を皆様に提供する特集記事「GHG関連の最新動向とNKの取組み」を掲載します。本特集記事では、GHG排出に係る規制、代替燃料の特質、サプライチェーン、ライフサイクルコスト及び船用機関の代替燃料への対応状況等について解説します。

また、本年7月1日に建造契約される船舶より、船舶のサイバーセキュリティ強化の観点から適用されることとなった国際船級協会連合（IACS）の統一規則E26及びE27については、海事業界において関心が高いと考えられることから、規制の背景や動向、そして本会の取組みについて概説いたします。

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。

ClassNK 代替燃料インサイト

渡辺 博之*

1. はじめに

2023年7月、国際海運において新たなGHG排出削減目標が掲げられた。「2050年頃までにGHG排出ネットゼロ」である。これは、将来的に国際海運全体で代替燃料が必要とされることが決まった、国際海運にとっての言わばターニングポイントである。今後、国際海運は2050年に向けて大規模な燃料転換の時代を迎えることになる。

一方で、船舶で利用可能な代替燃料は多岐にわたる。多岐にわたるが故に、船舶の種類やサイズ、航路などに応じてどの燃料をどのタイミングで導入していくかが今後の海運ビジネスを左右することになる。導入検討のためには、代替燃料に関する技術的事項だけでなく、燃料の調達可能性やコスト見通しなどを含む代替燃料全体の動向把握が欠かせない。

本会は、そのような燃料選択のサポートを目的として、「ClassNK 代替燃料インサイト」を発行している。本インサイトでは、代替燃料を導入する上で最低限押さえておかなければならないポイントを「規制を理解する」「トレンドを知る」「代替燃料を理解する」「コストを把握する」の4つのステップに分けて紹介している。本稿は、「ClassNK 代替燃料インサイト」の内容理解を助けることを目的として、その概要を解説するものである。

2. 規制を理解する

2.1 GHG排出のコスト化

なぜ代替燃料を導入する必要があるのか。それは、船舶からのGHG排出がコストとなる時代がまもなく到来するためである。国際海運からのGHG排出に影響を及ぼす2つの規制主体である国際海事機関（IMO）および欧州連合（EU）は、GHG排出削減目標としてそれぞれ「2050年頃までにGHG排出ネットゼロ」、「2050年までにGHG排出ネットゼロ」を掲げている。EUの目標は海運に限ったものではなく、あくまでEU全体の目標ではあるが、脱炭素経済の実現を強力に推進するEUの政策は国際海運の動向にも影響を及ぼしている。そして、これらのGHG排出削減目標、すなわちGHG排出ネットゼロを国際海運において実現するためには、船舶の燃費改善だけでなく、従来燃料油よりもGHG排出の少ない、いわゆる「代替燃料」の利用が不可欠となる。一方で、代替燃料の価格は従来燃料油の価格よりも総じて高く、両者の価格差が埋まらない限りは代替燃料の利用は進まない。そこで、IMOやEUは、代替燃料の利用を促進する規制、言い換えると、従来燃料油の需要を減退させるような規制を導入することになる。いわゆるカーボンプライシングであり、GHG排出のコスト化である。IMOとEUの規制導入のスケジュールは図1の通りである。IMOは2027年の規制導入を目指しており（中期対策）、EUは2024年にすでにそのような規制を導入し（海運EU-ETS）、2025年には新たな規制を導入する（FuelEU Maritime）。この通り、GHG排出のコスト化は待ったなしの状況である。

* 企画本部 グリーントランスフォーメーションセンター

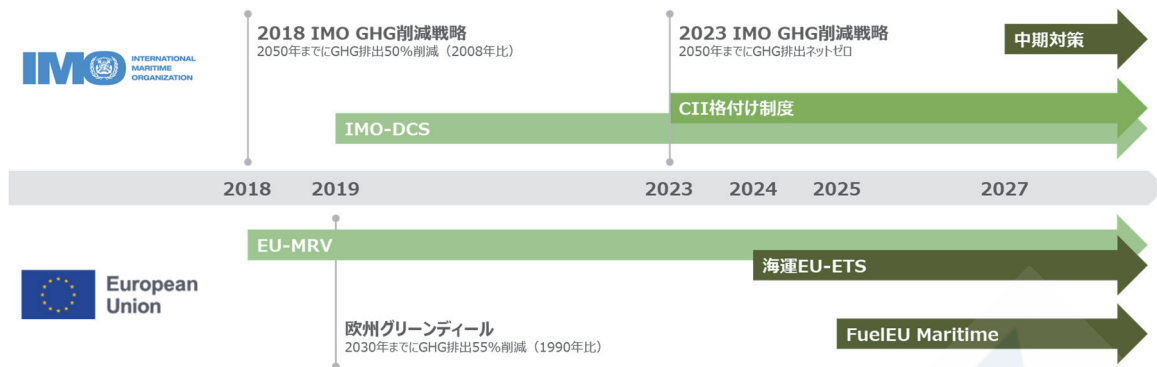


図1 GHG関連規制の導入スケジュール

2.2 IMO 中期対策

IMOのGHG排出削減目標には、2050年という一つの大きな時間的制約に加えて、2030年および2040年という時間軸がある。IMOはGHG排出削減を実現するための規制をこの時間軸に基づいて導入する。2030年という「短期的な」スパンでのGHG排出削減を目指して導入されてきたこれまでの規制は「短期対策」と呼ばれている。短期対策では主に船舶の燃費改善に焦点が当てられていた。一方で、2040年という「中期的な」スパンでのGHG排出削減を目指して今後導入される規制は「中期対策」と呼ばれている。中期対策では、上述の通り、代替燃料の利用促進に焦点が当てられている。

代替燃料の利用を促進する規制の手法、すなわち、GHG排出のコスト化という市場メカニズムに基づいて従来燃料油からの転換を図る規制の手法には主に2つの手法がある。1つ目の手法は、GHG排出に対する単純な課金である（課金制度）。課金制度においては課金によるコストは燃料種類を問わずGHG排出量に応じて等しく発生することになるため、課金制度はゼロエミッション燃料以外の全ての燃料がそのコスト負担の対象となり得る点に特徴がある。一方で、2つ目の手法は、燃料のエネルギー当たりのGHG排出量、すなわち燃料のGHG強度を規制する手法である（燃料のGHG強度規制）。なぜエネルギー当たりなのかと言うと、船舶を1マイル動かすために必要となる燃料の量（重量ton）は燃料種類によって異なるが、その際に取り出されたエネルギー量は全ての燃料において等しい。従って、「燃料の燃焼によってエネルギーを取り出した際に一体どの程度のGHGが排出されたのか」を示す指標を用いることで、各燃料のGHG排出量を等しく比較することが可能となるのである。GHG強度の単位としては $\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$ などがある。 CO_2eq とは CO_2 相当を意味しており（eqはequivalentの略である）、これは、温室効果がそれぞれ異なるGHGである二酸化炭素（ CO_2 ）、メタン（ CH_4 ）、亜酸化窒素（ N_2O ）などの排出量を全て CO_2 に換算して計上していることを表している。もちろん、 CO_2 のみを計上する場合でも便宜的に CO_2eq が使用されることもある。MJはエネルギーの単位であり、megajoule（メガジュール）の略である（メガは100万）。規制の話に戻ると、GHG強度に対する規制とは、GHG強度に一定の閾値を設けることで閾値を上回るGHG強度である燃料の使用を制限しようというものである。もちろん、閾値を上回る燃料の使用を完全に禁止するという運用も可能ではあるが、現実的には、閾値を上回る燃料の使用に対して罰金の支払いを求めることでその燃料の継続使用を認めるという運用がなされることになる。このような運用の場合、GHG強度規制とは、実質的には閾値を上回る過度なGHG排出に対する課金制度とも言える。なお、閾値の設定によっては、GHG強度の低い特定の燃料を使用した場合には罰金を回避することが可能となるため、燃料のGHG強度規制はゼロエミッション燃料だけでなく低排出燃料にとっても規制上の競争力がある点に特徴がある。閾値をいつの時点でどの程度の水準に設定するのかによって各燃料のGHG排出コストの大小が決定されるため、そこが政策的な論点となる。

IMOでは、2027年以降の導入に向けて、上述の2つの手法を軸に中期対策の内容についての議論が進められている。議論の争点は、規制の手法の選択および規制によりIMOに集まることになる課金収入・罰金収入の使途である。なお、課金収入・罰金収入の使途の候補としては、高コストである代替燃料を使用した船舶への燃料費の還付や途上国への支援などが挙げられている。

2.3 欧州地域規制

EUでは、IMOに先行して、代替燃料の利用を促進する規制の導入が開始されている。2024年には、EUですでに実施されている排出量取引制度（EU-ETS）が海運セクターへ拡大された（海運EU-ETS）。排出量取引制度とは、あらかじめ設定された排出枠に対する実際の排出量の過不足を取引する制度であるが、海運EU-ETS

の大きな特徴は、そのあらかじめ設定された排出枠がないということである。すなわち、海運EU-ETSでは、対象となる実際の排出量がそのまま排出枠の不足と見なされる。この点で、海運EU-ETSは実質的にはGHG排出に対する課金制度と言える。そして、海運EU-ETSに続いて2025年からの導入が決定している新たな規制がFuelEU Maritimeである。FuelEU Maritimeは上述のGHG強度規制であり、GHG強度の閾値を上回る燃料の使用に対して罰金を科す内容となっている。

海運EU-ETSおよびFuelEU Maritimeは、あくまでEUの地域規制でありながらも、規制の対象をEUの内航船に限定せず、EUの港湾に出入港する船舶を規制の対象としている点に特徴があり、国際海運に影響を及ぼそうとするEUの意図が透けて見える政策となっている。EU関連航海に従事する船舶においては、これらのEUの規制の内容を正確に理解した上で燃料選択を行うことが戦略上重要となる。本会では、EUの規制の概要や規制対応のための必要な準備・手順の解説等をQ&A方式でまとめたFAQを発行しているため、ぜひ参照してほしい。

2.4 GHG排出コストの増加

ここまで、IMOとEUの新たな規制の大枠について解説したが、それでは、これらのGHG排出規制によるコスト負担はどの程度が想定されるのか。図2は、燃料消費量が多いとされるコンテナ船の中でも特に14,000TEUのコンテナ船を例に、規制コスト負担の増加イメージを示したものである。なお、IMOの中期対策の内容は未確定であるため、ここではFuelEU Maritimeと同様の内容の規制が中期対策で採用された場合を想定している。もちろん、IMOの規制はEU関連航海だけでなく、全航海からのGHG排出が対象となるため、そのコスト負担はEU関連規制によるコスト負担と比較して大きなものとなる。参考として、従来燃料油の価格をUSD522.6/ton（USD13.0/GJ）と想定した上で14,000TEUのコンテナ船の平均的な年間燃料消費量（23,000ton）を基に算出した燃料コストを掲載しているが、ご覧の通り、IMOの中期対策の内容次第では、規制コストは燃料コストをはるかに上回る水準に達する可能性がある。IMOやEUによる新たなGHG排出規制は代替燃料の利用促進すなわち従来燃料油からの転換を図ることがその目的であるため、規制コストの水準が「価格の高い代替燃料」と「価格の低い従来燃料油」の価格差を埋めるような水準に設定されるのは当然と言えば当然である。

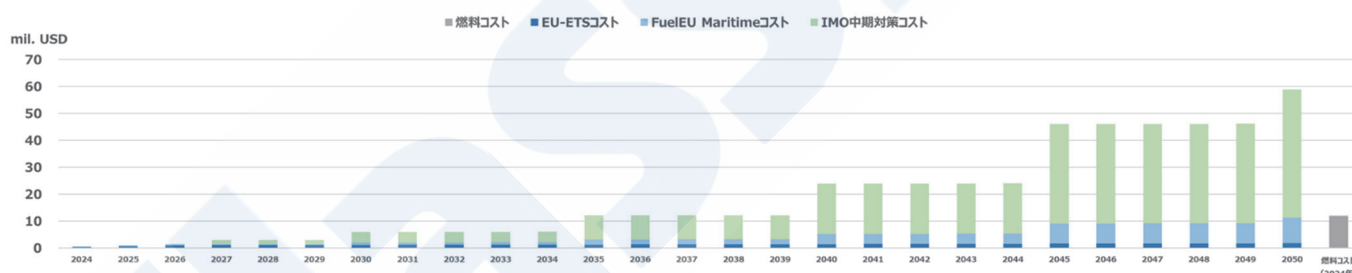


図2 GHG排出コストの増加イメージ

3. トレンドを知る

3.1 代替燃料船の採用動向

GHG排出規制を理解した次のステップは、代替燃料のトレンドを把握することである。代替燃料の需要サイドの動向は燃料供給サイドの動向に影響を与え、両者の動向は代替燃料の調達可能性や調達価格に影響を与える。

将来の規制対応を見据えて、国際海運では代替燃料を使用可能な船舶（以下、代替燃料船）の採用が徐々に拡大している。本節以降では、代替燃料船の採用動向について紹介する。なお、紹介する内容はいずれも2024年6月末時点での情報に基づくものである。船舶の集計対象は、IMOやEUの今後のGHG排出規制で対象船となる総トン数5,000トン以上の船舶を対象としている。総トン数5,000トン以上に限定することで、規制対象船の動向を正確に把握し、規制がこれらの対象船に及ぼす影響を正確に把握しようという意図がある。また、代替燃料船の集計結果には、将来的に代替燃料を使用するための設計もしくは部分的な設備の搭載を実施済の船舶である、いわゆる代替燃料Ready船は含めていない。代替燃料Ready船には、代替燃料を使用するための設計のみを実施済の船舶から部分的な設備の搭載を実施済の船舶まで、実に様々な船舶が混在している。これらの船舶の将来の代替燃料船への転換可能性を正確に把握するのは困難なため、代替燃料船のトレンドを見誤らないためにも、代替燃料Ready船は集計結果には含めていない。さらに、代替燃料船の一つであるLNG燃料船の

集計結果には、LNG運搬船を含めていない。これは、LNG運搬船ではその貨物であるLNGを燃料として使用することが一般的となっており、代替燃料化が十分に進展しているためである。LNG運搬船を集計対象からあえて除外することで、LNG運搬船以外の船舶における代替燃料の採用動向の把握に努めている。

3.2 代替燃料船の竣工状況・就航状況

本節では、代替燃料船のこれまでの竣工状況および就航状況について紹介する。代替燃料船の竣工は2021年より急速に増加しており（図3）、2021年の竣工隻数62隻に対して、2023年には167隻の竣工があった。燃料別に見ると、過半数はLNG燃料船である。LNG燃料は、インフラ整備や燃料の調達可能性、調達価格などの観点で他の代替燃料よりも優位に立っている。一方で、2024年以降に竣工予定の船舶ではメタノール燃料船も一定のシェアを占めている。コンテナ船社によるメタノール燃料船の発注を契機として、常温常圧で液体であることにより船舶での取り扱いが比較的容易なメタノール燃料に注目が集まっている。なお、造船所の船台がほぼ確定している2026年竣工予定までの代替燃料船を集計すると、2026年時点では1,250隻の代替燃料船が就航している見込みである（図4）。

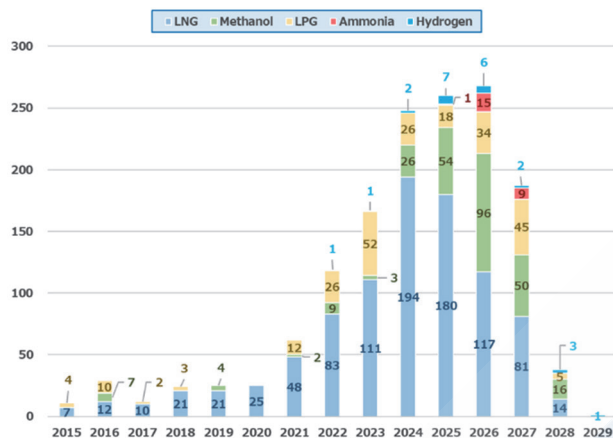


図3 代替燃料船の竣工隻数の推移

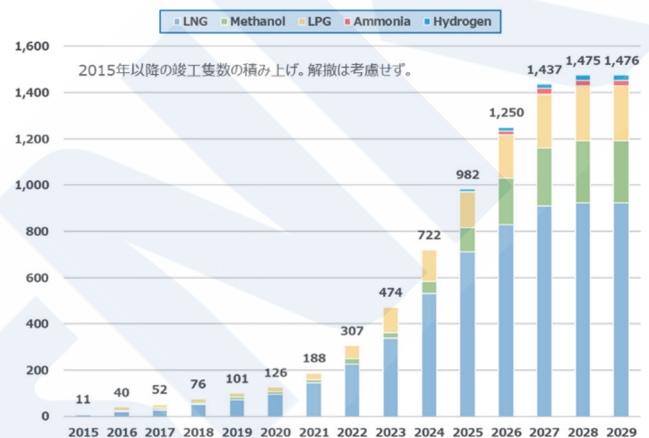


図4 代替燃料船の就航隻数の推移

3.3 代替燃料船の普及割合

継続的に増加している代替燃料船であるが、国際海運全体に占めるその普及割合はどの程度であるのか。図5は、代替燃料船の普及割合について、就航船全体に占める割合と発注残全体に占める割合をそれぞれ示している。就航船に占める代替燃料船の割合は隻数ベースで1.7%であり、発注残に占める代替燃料船の割合は隻数ベースで21.5%である。このように、代替燃料船の普及は現時点では限定的であるものの、IMOやEUによるGHG排出のコスト化を伴う新たなGHG排出規制が今後本格化すれば、従来燃料油の継続使用による規制コスト負担の増加や船舶自体の座礁資産化を回避するためにも、代替燃料船の採用が急速に拡大するものと考えられる。

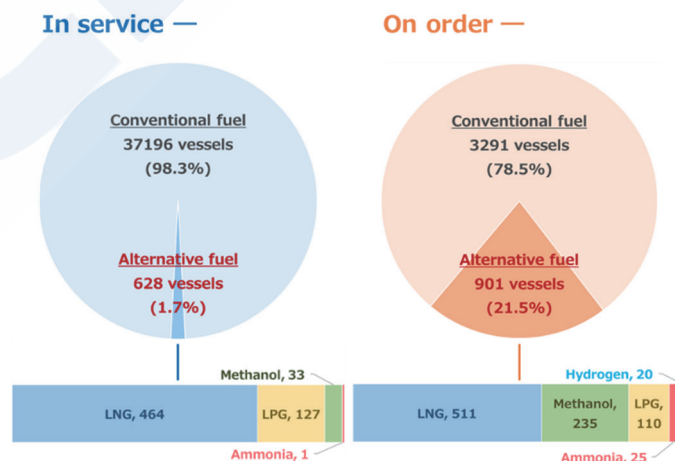


図5 代替燃料船の普及割合

3.4 代替燃料船の就航状況・発注状況（船舶の種類別）

代替燃料のトレンドを把握する上では、船舶の種類別のトレンドを把握することもまた重要である。トレンドの逆を行く燃料船の選択は、ハイリスク・ハイリターンな投資となり得る。船舶の種類別のトレンドを見てみると、LPG運搬船を除く全ての船舶でLNG燃料船が最も多く就航している（図6）。なお、LPG運搬船では、LPG燃料主機関の登場以降、LPG燃料船の採用が拡大している。また、プロダクト／ケミカルタンカーでは、メタノール燃料船の就航も一定数見られる。これは、プロダクト／ケミカルタンカーのカテゴリーには化学品としてのメタノールを運搬するメタノール運搬船が含まれているためである。メタノール運搬船の一部はメタノールを燃料として使用可能なメタノール燃料主機関を搭載していることから、メタノール燃料船である。一方で、代替燃料船の発注については、代替燃料船の就航状況と比較すると、コンテナ船を中心にばら積み貨物船や自動車運搬船においてもメタノール燃料船の発注が拡大している（図7）。また、一部の船舶ではアンモニア燃料船の発注も見られる。

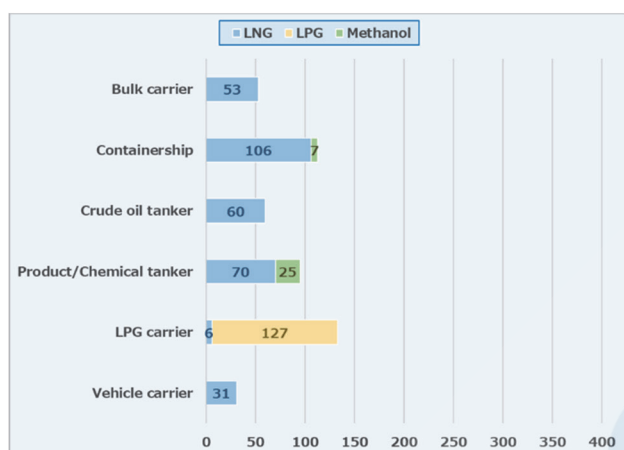


図6 代替燃料船の就航状況（船舶の種類別）

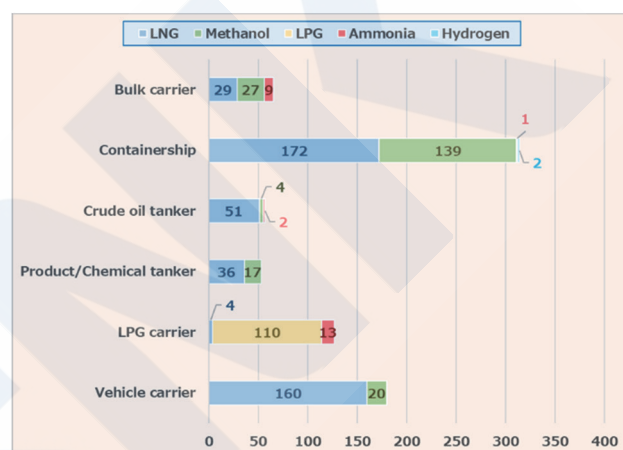


図7 代替燃料船の発注状況（船舶の種類別）

4. 代替燃料を理解する

4.1 燃料の物性

代替燃料のトレンドを把握した次のステップは、代替燃料自体について理解することである。燃料としての化学的な特徴はもちろんのこと、規制における排出係数の違いやコスト、燃料の需給動向などを理解して初めて、適切な燃料選択が可能となる。本節では、各燃料の物性について紹介する。表1は、各燃料の物性を一覧にまとめたものである。

表1 燃料の物性一覧

燃料種類	HFO	LNG (メタン)	LPG		メタノール	アンモニア	水素
			プロパン	ブタン			
TtW CO ₂ 排出量 【HFO = 1】	1	0.73	0.85	0.86	0.90	0	0
TtW GHG排出量 【HFO = 1】	1	0.82	0.85	0.86	0.92	0.04	0.01
同量のエネルギーを得るのに必要な 燃料ton 【HFO = 1】	1	0.84	0.87	0.88	2.02	2.16	0.34
液体時 燃料タンク容量 【HFO = 1】	1	1.89	1.69	1.41	2.47	3.07	4.63
燃焼性（爆発下限界）	0.7 vol%	5.0 vol%	2.1 vol%	1.8 vol%	6.0 vol%	15.0 vol%	4.0 vol%
毒性（TLV-TWA*）	-	-	-	-	200 ppm	25 ppm	-
低温・極低温（沸点）	(Liquid at normal temp.)	-161℃	-42℃	-0.5℃	(Liquid at normal temp.)	-33℃	-253℃

表1におけるCO₂排出量およびGHG排出量は、EUのFuelEU Maritime規則に記載の排出係数を基に算出したものである。TtWはTank-to-Wakeの略であり、燃料の船上での使用時（燃焼時）の排出を意味する。CO₂排出量に関して、LNG（メタン）やLPG、メタノールのCO₂削減効果は限定的である一方、CO₂の元となる炭素（C）を含まないアンモニア（NH₃）および水素（H₂）についてはCO₂の大幅な削減が期待できる。GHG排出量については、LNG（メタン）のGHG削減効果がCO₂削減効果と比較してより限定的となる。これは、LNG（メタン）の燃焼時において、CO₂の約30倍の温室効果があるとされるメタンの未燃排出（メタンスリップ）の存在が規制において認識されているためである。

重量当たりのエネルギー密度の違いにより、一部の代替燃料の必要量（ton）は従来燃料油と比較して増加する（従来燃料油は表1ではHFOとして掲載）。従来燃料油と同じエネルギーを得るためには、メタノールは従来燃料油比で2.02倍、アンモニアは同2.16倍の量（ton）の燃料が必要となる。従って、例えば燃料価格の比較時には各燃料のton当たりで単純比較してはならないことに注意が必要である。

体積当たりのエネルギー密度の違いにより、各代替燃料の燃料タンク容量は従来燃料油と比較して大きくなる。従来燃料油と同じエネルギーを得るためには、LNGは従来燃料油比で1.89倍、メタノールは同2.47倍、アンモニアは同3.07倍、水素は同4.63倍の大きさの燃料タンク容量が必要となる。設計次第ではあるが、燃料タンク容量の増加は貨物スペースの縮小に繋がる可能性があり、逆に燃料タンク容量の維持・縮小は補油回数（代替燃料の補給回数）の増加に繋がる可能性がある。

燃焼性に関しては特にアンモニアに特徴があり、アンモニアは15.0vol%以上の濃度で大気中に存在しない限り爆発には至らないという、他の代替燃料と比較して爆発しにくい性質を持つ。

毒性に関して、メタノールおよびアンモニアには毒性がある。特にアンモニアは、比較的低い濃度でも繰り返し曝露された場合には健康上の悪影響を被るとされ、極めて強い毒性がある点が懸念されている。

4.2 代替燃料の排出係数

代替燃料の導入検討に際しては、各代替燃料の排出係数を正確に把握する必要がある。排出係数はGHG排出コストに直結する。排出係数は規制毎に異なる可能性があり、留意が必要である。図8は、EUのFuelEU Maritime規則に掲載の排出係数を基に算出した、各燃料のエネルギー当たりの排出量を示したものである。上述の通り、各燃料のGHG排出量を等しく比較するためには、重量ton当たりではなくエネルギー当たりの排出量で比較する必要がある。

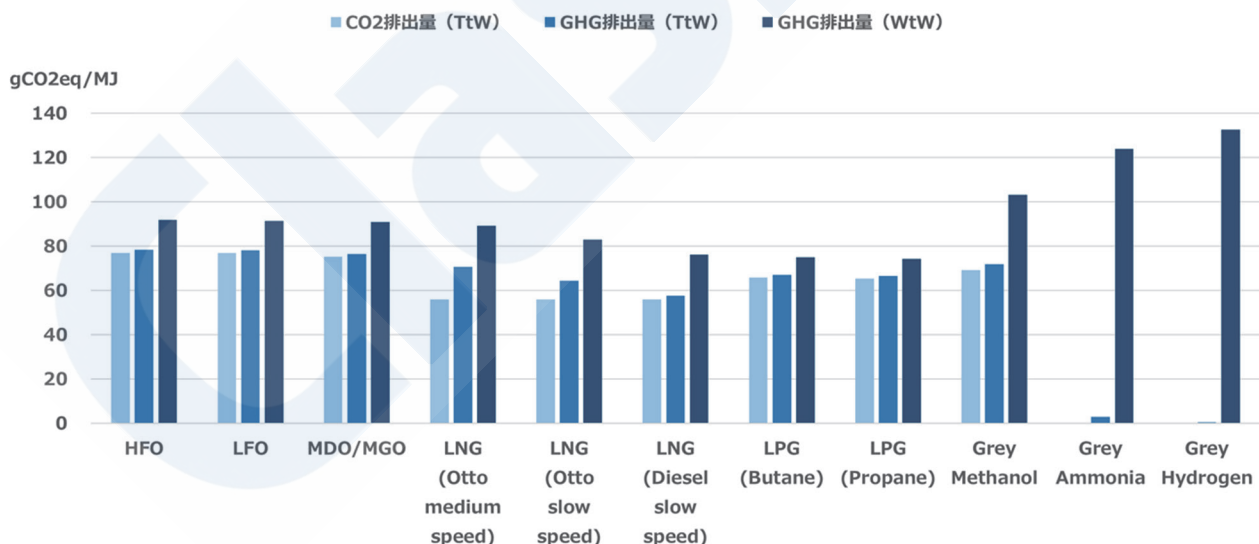


図8 燃料のエネルギー当たりの排出量

TtWはTank-to-Wakeの略であり、燃料の船上での使用時（燃焼時）の排出を意味する。WtWはWell-to-Wakeの略であり、燃料の製造から船上での使用（燃焼）までのライフサイクル全体での排出を意味する。GHG排出コストを把握するためには、各規制における排出係数の違いに加えて、各規制が対象とする排出の範囲を認識することが重要である。例えば、海運EU-ETSはTtWにおけるCO₂排出、2026年以降はTtWにおけるGHG排出を対象としており、FuelEU MaritimeはWtWにおけるGHG排出を対象としている。IMOの中期

対策における排出のスコープについてはWtWにおけるGHG排出となる可能性が高いものの、現時点では未確定であり、規制において使用する排出係数についてもIMOでの議論が続いている。排出のスコープによって各燃料の規制上の有利・不利は大きく異なるため、代替燃料船の発注検討時には、このような排出係数の違いも考慮しながら、どの燃料をどのタイミングで導入するのかを慎重に検討する必要がある。

4.3 代替燃料のコスト

代替燃料の導入検討に際しては、各代替燃料のコストについて理解することが欠かせない。図9は、2030年時点での各代替燃料のコスト見込みをその製造経路と共に示したものである。なお、最終的な調達価格については実際の需給に応じて変動することに留意が必要である。

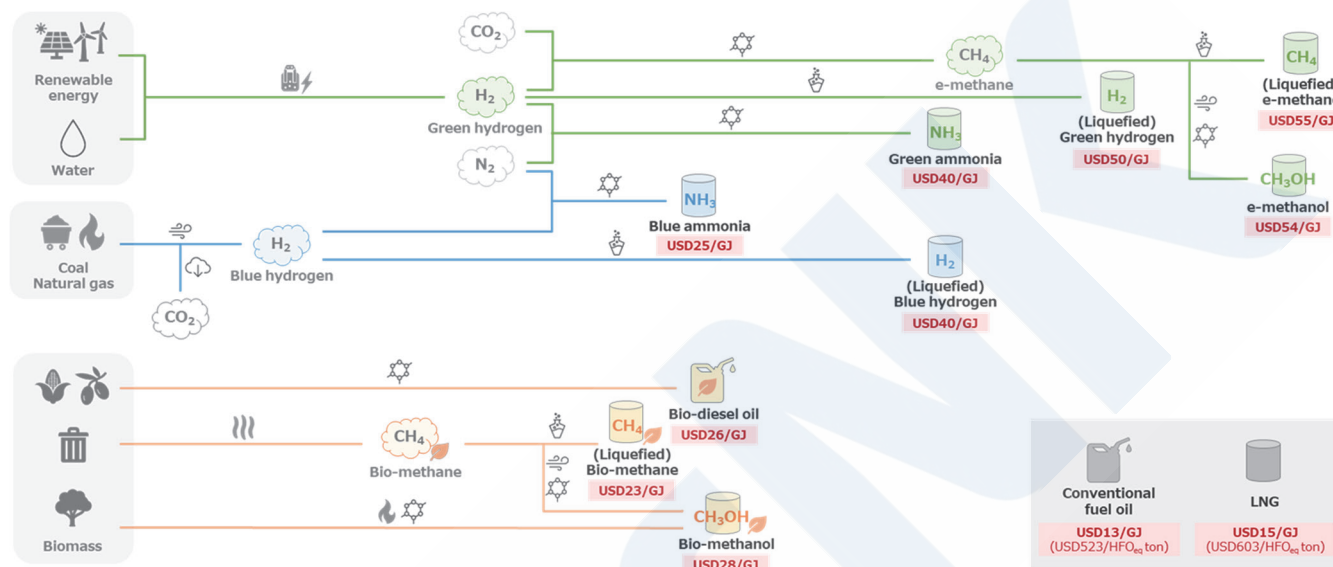


図9 代替燃料の製造経路・コスト

国際海運において利用が想定される代替燃料は、二種類以上の元素からできている化合物である（水素を除く）。従って、各代替燃料は基本的には各元素を合成して製造される。炭素を含まないアンモニア（NH₃）や水素（H₂）は燃焼してもCO₂を排出しないことから、ゼロエミッション燃料とされている。一方で、炭素原子を含むメタン（CH₄）やメタノール（CH₃OH）などについては燃焼時にはCO₂を排出する。従って、これらの燃料については、「動植物（バイオマス）によって」もしくは「人工的に（大気直接回収によって）」CO₂を含め基となる炭素を回収して製造された場合に限り、大気中のCO₂収支がゼロとなり、カーボンニュートラル燃料と見なされる。すなわち、炭素を循環させる必要がある。

代替燃料は、燃料の製造方法によって3つに大別される。1つ目は、再生可能エネルギー由来の電気を用いて水から取り出されたグリーン水素から製造される、いわゆるe-fuelである。e-fuelはelectrofuelの略である。2つ目は、化石燃料から取り出されたグレー水素から製造され、かつ、製造時に排出されたCO₂を回収・貯留した、いわゆるブルー燃料である。3つ目は、動植物（バイオマス）から取り出された炭素や水素から製造された、いわゆるバイオマス由来の燃料である。

代替燃料のコストは、水素や炭素を取り出す際のコストによって左右される。水素については、水から再生可能エネルギー由来の電気を用いて取り出す方が化石燃料から取り出すよりもコストは高い。炭素については、大気直接回収によって取り出す方がバイオマスから取り出すよりもコストは高い。結果として、グリーン水素から製造されるe-fuelが最もコストが高く、ブルー燃料やバイオマス由来の燃料のコストは相対的に低い。なお、バイオマスはその供給量自体に資源的な制約があるため、その調達可能性については留意する必要がある。

4.4 代替燃料の需要

本節では、代替燃料の需要について紹介する。代替燃料の需要サイドの動向は燃料供給サイドの動向に影響を与え、両者の動向は代替燃料の調達可能性や調達価格に影響を与える。

4.4.1 国際海運における燃料消費量

代替燃料の需要見通しを理解するためには、現在の国際海運における燃料消費量を理解することがその第一歩となる。国際海運における燃料消費量について、IMOでは燃料消費量実績の報告制度が2019年より開始され

ている。本制度の対象となる国際航海に従事する総トン数5,000トン以上の船舶は、燃料消費量等のデータを収集し、報告することが義務付けられている。IMOから公表⁹されるこれらのデータの統計値を基に本会が集計したところ、国際海運における燃料消費量（2023年）は合計で2.16億ton（Heavy Fuel Oil換算）であった（表2）。2050年GHG排出ネットゼロを目指す上では、将来的にはこの2.16億ton分のエネルギーを代替燃料等で賄う必要がある。今後の海上輸送量の増加やエネルギー効率の改善による増減はもちろんあるものの、例えば、この2.16億tonを全量メタノールに転換する場合には4.4億tonのメタノールが必要となり、全量アンモニアに転換する場合には4.7億tonのアンモニアが必要となる。

表2 国際海運における燃料消費量（単位：ton）

	Heavy Fuel Oil (HFO)	Light Fuel Oil (LFO)	Diesel/Gas Oil (MDO/MGO)	LNG	LPG (Propane)	LPG (Butane)	Methanol	Ethanol	Other	Total (HFO換算)
2021年 (28,171隻) (12.5億GT)	109,169,447	64,479,128	25,732,999	12,623,121	34,973	2,028	13,031	4,849	170,501	217,710,495
2022年 (28,834隻) (12.9億GT)	116,576,283	57,077,835	28,285,802	10,950,408	88,774	16,673	35,523	10,890	226,739	218,339,992
2023年 (28,620隻) (13.0億GT)	130,441,745	40,416,174	26,600,016	12,890,011	192,405	49,887	93,876	4,137	428,263	215,833,384

4.4.2 代替燃料の需要見通し

前項の通り、今後国際海運で必要となる代替燃料の量は膨大であるが、現実的には、代替燃料の需要増加のペースに合わせて供給も徐々に拡大することになる。その代替燃料の需要増加のペースについて、代替燃料船の発注残を基に推計した今後の見通しは図10の通りである。なお、ここではLNG運搬船によるLNG燃料の需要も含まれている。また、2024年以降に竣工する代替燃料船（二元燃料船）については代替燃料のみを使用するものと想定し、代替燃料の使用に伴うパイロット燃料（従来燃料油）の使用は想定していない。すなわち、ここでの需要見通しは国際海運における代替燃料の最大需要見通しとなる。実際の代替燃料の使用量は代替燃料と従来燃料油の価格差等を考慮しながら調整されることになる。

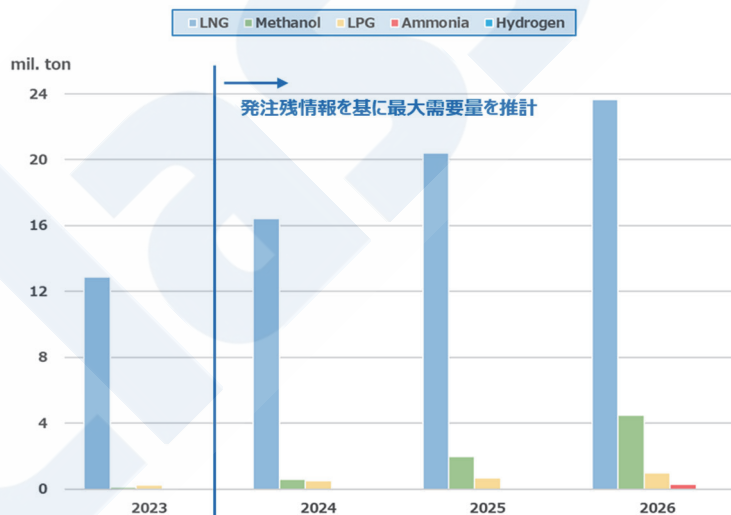


図10 代替燃料の最大需要見通し

LNG燃料については、LNG燃料船の大量竣工により2026年時点で最大で2,400万tonの需要が見込まれている。メタノール燃料については、コンテナ船を中心にメタノール燃料船の竣工が相次ぐ結果、2026年時点で最大で450万tonの需要が見込まれている。LPG燃料については、利用を想定する船舶の種類が現時点でLPG運搬船のみのため、2026年時点で想定される最大需要は100万tonに留まる。アンモニア燃料および水素燃料については、現時点で想定される需要は限定的ではあるが、アンモニア燃料船および水素燃料船の開発完了に伴い、今後の需要拡大が期待される。

4.5 代替燃料の供給

国際海運からのGHG排出削減には代替燃料の安定的な供給が不可欠である。本節では、グリーン水素、グ

リーアンモニア、グリーンメタノール、およびグリーンメタンに焦点を当てて、2023年10月時点で公表されている世界の製造プロジェクト情報²⁾を基に集計した今後の各燃料の製造能力の見込みについて紹介する。なお、グリーン水素は、再生可能エネルギー由来の電気で水を電気分解することで製造され、製造から船上での使用（燃焼）までのライフサイクル全体でのGHG排出の極めて少ない燃料である。グリーン水素から製造されるグリーンアンモニア、グリーンメタノール、およびグリーンメタンについても同様に、ライフサイクル全体でのGHG排出は極めて少ないもしくはカーボンニュートラルとされる。IMOおよびEUの今後の規制において、このようなグリーン水素由来の燃料は規制コスト競争力があり、今後の需要増加が見込まれている。なお、今回集計した製造プロジェクトにおける燃料の供給先は海運セクターに限定されたものではないため、国際海運への供給見込みについては不透明であることを先に断っておく。

4.5.1 グリーン水素の製造能力見込み

グリーン水素の製造能力見込みは、公表されているプロジェクトのうち稼働開始年の最も遅いプロジェクトまで含まれる2040年時点で、合計で年産約4,900万tonである（図11）。なお、プロジェクトの大半は現時点でConcept段階あるいはFeasibility study段階にあるため、プロジェクトの実現可能性は不透明である。2040年時点での国・地域別でのグリーン水素の製造能力見込みは図12の通りである。欧州の他、再生可能エネルギーが豊富でグリーン水素の製造適地とされている南米や豪州でも一定数のプロジェクトが計画されている。

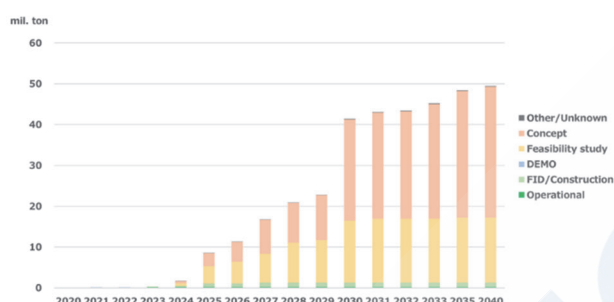


図11 グリーン水素の製造能力（年別）

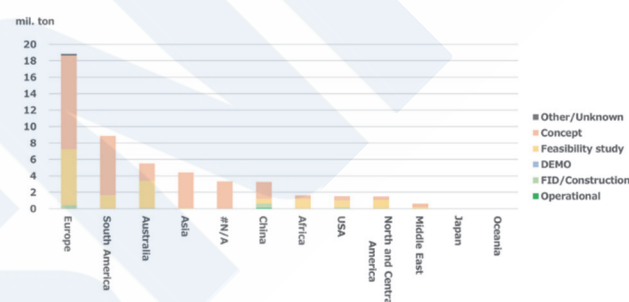


図12 グリーン水素の製造能力（国・地域別）

4.5.2 グリーンアンモニアの製造能力見込み

グリーンアンモニアの製造能力見込みは、公表されているプロジェクトのうち稼働開始年の最も遅いプロジェクトまで含まれる2043年時点で、合計で年産約2.2億tonである（図13）。石炭火力発電における石炭の代替燃料や水素キャリアとしての役割が期待されるアンモニアは比較的多くの需要が見込まれており、それに伴って多くの製造プロジェクトが立ち上がっている。なお、プロジェクトの大半は現時点でConcept段階あるいはFeasibility study段階にあるため、プロジェクトの実現可能性は不透明である。2043年時点での国・地域別でのグリーンアンモニアの製造能力見込みは図14の通りである。プロジェクトの多くは豪州やアフリカなどに所在している。

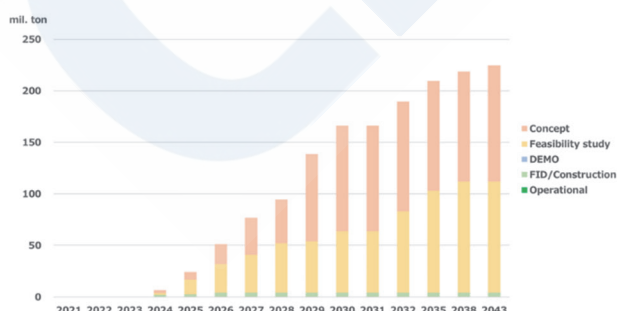


図13 グリーンアンモニアの製造能力（年別）

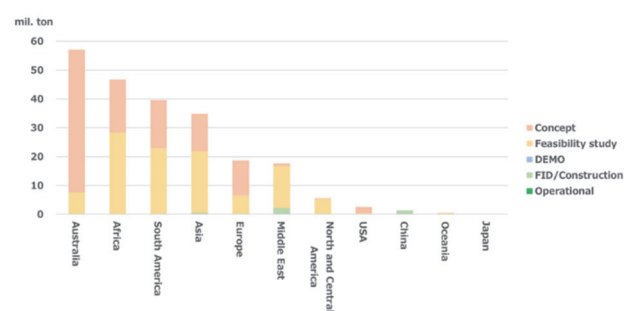


図14 グリーンアンモニアの製造能力（国・地域別）

4.5.3 グリーンメタノールの製造能力見込み

グリーンメタノールの製造能力見込みは、公表されているプロジェクトのうち稼働開始年の最も遅いプロジェクトまで含まれる2030年時点で、合計で年産約500万tonである（図15）。なお、プロジェクトの大半は現

時点でConcept段階あるいはFeasibility study段階にあるため、プロジェクトの実現可能性は不透明である。2030年時点での国・地域別でのグリーンメタノールの製造能力見込みは図16の通りである。プロジェクトの多くは欧州や米国に所在している。

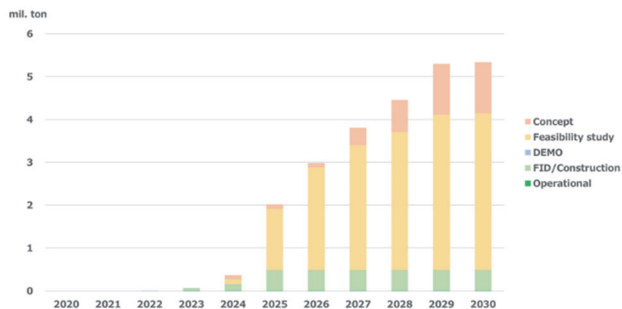


図15 グリーンメタノールの製造能力（年別）

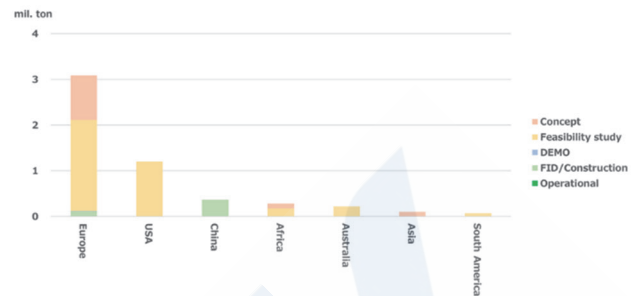


図16 グリーンメタノールの製造能力（国・地域別）

4.5.4 グリーンメタンの製造能力見込み

グリーンメタンの製造能力見込みは、公表されているプロジェクトのうち稼働開始年の最も遅いプロジェクトまで含まれる2030年時点で、合計で年産約90万トンである（図17）。なお、プロジェクトの大半は現時点でConcept段階あるいはFeasibility study段階にあるため、プロジェクトの実現可能性は不透明である。2030年時点での国・地域別でのグリーンメタンの製造能力見込みは図18の通りである。プロジェクトの多くは欧州や米国に所在している。

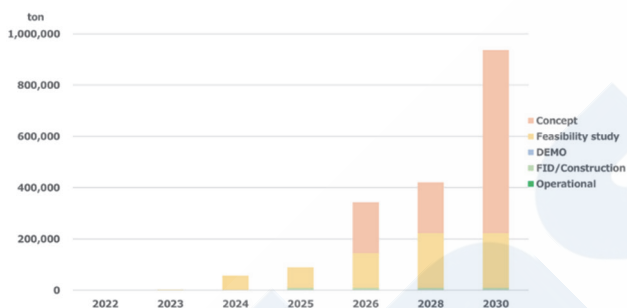


図17 グリーンメタンの製造能力（年別）

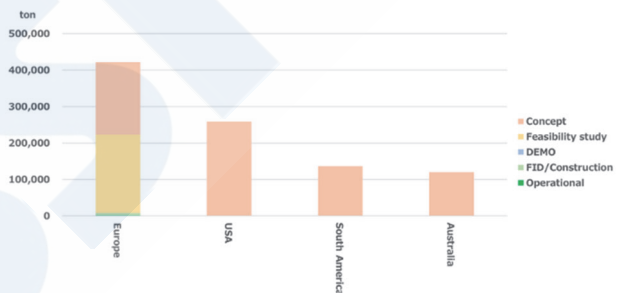


図18 グリーンメタンの製造能力（国・地域別）

5. コストを把握する

5.1 コストシミュレーション

最後のステップは、代替燃料導入に際してのトータルコストを把握することである。船舶に関するコストは様々あるが、その中でも特に代替燃料の導入によって影響を受けるコストは「建造コスト」「燃料コスト」「規制コスト」である。今後の規制コストを構成するのは、上述の通り、EUの海運EU-ETSおよびFuelEU Maritime、そしてIMOの中期対策である。

代替燃料の導入によって、建造コストおよび燃料コストは増加する一方、規制コストは減少する。代替燃料の導入に際しては、ステークホルダー間でこれらのコスト構造の変化を十分に議論・共有した上で、従来燃料油からの転換のタイミングを図っていく必要がある。

5.2 コストシミュレーションの実施例

本会は、燃料選択のサポートを目的として、従来燃料船から代替燃料船へ転換する場合のコストシミュレーションを実施している。本節では、コストシミュレーションの一例として、64,000DWTのばら積み貨物船において「従来燃料船を採用した場合」と「アンモニア燃料船を採用した場合」のシミュレーション結果を紹介する。

図19は、「従来燃料船を採用した場合」（左側の縦棒グラフ）と「アンモニア燃料船を採用した場合」（右側の縦棒グラフ）の各年のトータルコストの比較結果を示したものである。なお、ここでのコストは「建造コスト」

「燃料コスト」「規制コスト」のみとしている。規制コストに関して、IMOの中期対策の内容は未確定であるため、ここではFuelEU Maritimeと同様の内容の規制が中期対策で採用された場合を想定している。船舶の竣工は2031年、寿命は2050年までの20年間と想定しており、建造コストはその20年間で按分する。燃料価格について、従来燃料船についてはHeavy Fuel Oil (HFO)のみを使用することを想定し、その価格は20年間にわたりUSD522.6/ton (USD13.0/GJ) で一定としている。一方で、アンモニア燃料船については二元燃料船としてHFOおよびe-ammoniaを使用可能とし、e-ammoniaの価格は2030年のUSD723.8/ton (USD38.9/GJ) から2050年のUSD366.2/ton (USD19.7/GJ) に向かって直線的に減少することを前提としている。すなわち、アンモニア燃料船については、「HFOの使用による規制コスト（継続的に増加）」と「e-ammoniaの使用による燃料コスト（継続的に減少）」の大小を考慮しながら、毎年のトータルコストが最小となるように燃料を選択することになる。以上のような前提を置いた場合、図19が示す通り、アンモニア燃料船においては2039年まではHFOの使用を継続した方が毎年のトータルコストが削減される。すなわち、価格の高いe-ammoniaを使用するよりも、規制コストを負担してでもHFOを使用した方が良いということである。そして、2040年からは、燃料コストが十分に下がったe-ammoniaを選択した方がHFOを選択するよりも毎年のトータルコストが削減される。

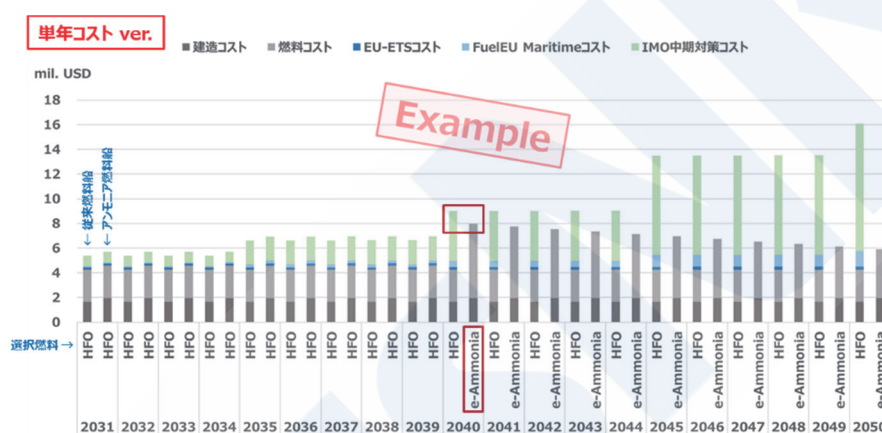


図19 コストシミュレーション結果（単年コスト）

図20は、上述のシミュレーション結果に関して、各年のトータルコストを2050年まで累積させて表したものである。累積コストで表した場合には、従来燃料船の採用による累積コストとアンモニア燃料船の採用による累積コストがいつの時点で逆転するのか、そのタイミングを把握することが可能となる。もちろん、生涯のトータルコストの差額も把握可能であり、この例では、従来燃料船を採用した場合とアンモニア燃料船を採用した場合との間で、20年間で約50 million USDのコスト差が付くということが分かる。これは、このサイズのばら積み貨物船を更にもう1隻購入してもお釣りが得られる程のコスト差である。IMOの中期対策の内容や様々な前提条件の設定次第ではあるが、このシミュレーション結果は、今後の規制コスト負担がいかに重たいものとなり得るのかを示す一例と言える。

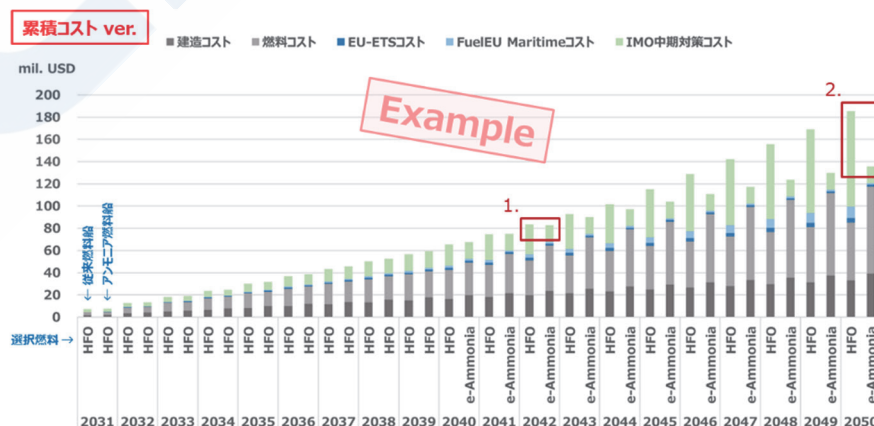


図20 コストシミュレーション結果（累積コスト）

6. まとめ

本稿では、本会が発行している「ClassNK 代替燃料インサイト」の内容理解を助けることを目的として、IMOおよびEUにおける今後の規制対応においてその利用拡大が不可欠となる代替燃料の動向について紹介した。現状では、国際海運における代替燃料の需要量に対して想定される供給量は大きく不足している。代替燃料の生産をより一層拡大するためには、明確な需要シグナルを供給サイドへ送ることが欠かせない。そのためには、規制を通じた代替燃料の利用促進はもちろんのこと、海運セクターに限らず様々なステークホルダーが連携しての需要創出も求められることになる。本稿が海運業界における代替燃料の利用拡大へ向けた取り組み検討の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption Database in GISIS (Reporting year: 2023)
- 2) IEA (2023), Hydrogen Production Projects Database

IMO船用燃料ライフサイクルGHG強度ガイドライン

三宅 竜二*

1. はじめに

国際海事機関（IMO）はGHG削減に関する取り組みとして、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、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、その短期対策として、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。2018年のGHG削減戦略では、図1に示すように、Tank-to-Wakeと呼ばれる、船上からのGHG排出のみに焦点が当てられていたが、2023年の改定戦略では、Well-to-Wakeと呼ばれる、船舶で使用する燃料のライフサイクル全体におけるGHG排出を考慮することが盛り込まれた。船上から排出されるGHGは国際海運に割り当てられるが、船用燃料の製造や流通過程において陸上で排出されたGHGはその国に割り当てられる。そのため、IMOにおけるEEDI/EEXI、DCSやCII格付け等のGHG排出規制においては、これまで船上から排出されたCO₂にのみ焦点が当てられてきた。一方、アンモニアや水素などの次世代燃料であっても、例えば化石燃料から発電された電気を使って製造された水素の場合、発電時に大量のGHGが排出されるため、ライフサイクル全体では、図2に示す通り、重油よりもGHG排出量が多くなる。このため、GHG削減戦略の改定においても、削減目標が船上排出からライフサイクル全体での排出削減に変更された。このライフサイクル全体における評価については、欧州連合（EU）においても、地域規制として、「FuelEU Maritime」と呼ばれる「船用燃料ライフサイクルGHG強度規制」が2025年に開始される予定である。さらに、国際民間航空機関（ICAO）においても、第41回ICAO総会において、2050年までにライフサイクル全体でカーボンニュートラルを目指す脱炭素化長期目標が採択されている。IMOにおいて、GHG削減目標が船上排出からライフサイクル全体における排出に変更されたことにより、例えば、化石由来のLNG燃料については、船上排出では重油比で約18-26%改善するが、ライフサイクル全体では液化による影響により重油比で約10-17%の改善に留まり、改善効果が大幅に目減りする。また、ライフサイクル全体でネットゼロ排出を達成するためには、全ての船舶でブルーもしくはグリーン燃料を使用する必要があるため、ブルー／グリーン燃料の供給状況に大きく左右される。

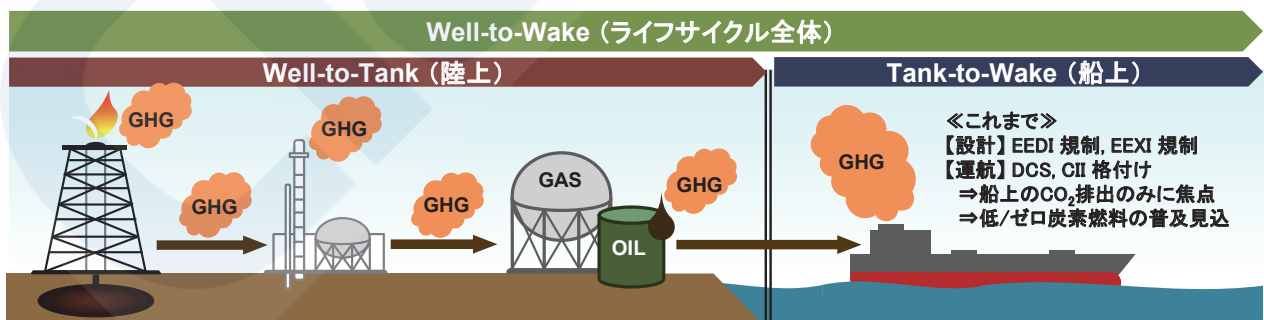


図1 船用燃料のライフサイクルにおけるGHG排出のイメージ図

2023年のGHG削減戦略において、削減目標が船上排出からライフサイクル全体でのGHG排出を考慮することが盛り込まれたことから、MEPC 80（2023年7月）において、「船用燃料ライフサイクルGHG強度ガイドライン」¹⁾も併せて採択された。一方、多くの課題があったため船用燃料LCA通信部会が設置され、通信部会において、GHG強度のデフォルト値開発のためのデータ収集用テンプレートの見直しをはじめ、デフォルト値の検

* 開発本部 技術研究所

討、土地利用変化に伴う炭素、メタン漏出、合成燃料の原料としての回収炭素、及び船上CCSの回収炭素の取り扱い等について議論された。MEPC 81（2024年3月）において、通信部会による改正案²⁾を含む「2024年版船用燃料ライフサイクルGHG強度ガイドライン」³⁾（以下「LCAガイドライン」）が採択され、バイオ燃料の生産に関する排出量算定方法の詳細化及びパラメータの数値化、生産に使用する電力のGHG排出強度及び実際の船上でのGHG排出量に関する算定方法が追加された。本稿では、LCAガイドラインについて、最新情報を交えて解説する。

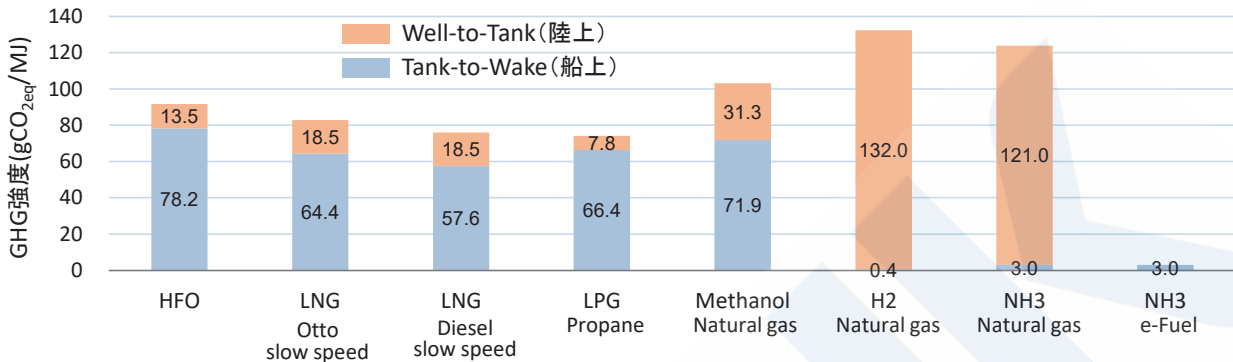


図2 船用燃料におけるGHG強度の例⁴⁾

2. 船用燃料ライフサイクルGHG強度ガイドライン

LCAガイドラインは、大きく分けて、① 船用燃料の製造、輸送、船上での使用に至るライフサイクル全体でのGHG排出量の評価手法、② 持続可能な船用燃料のテーマ／側面（持続可能性基準）、③ 検証及び認証の三つで構成されている。

LCA（ライフサイクルアセスメント）とは、一般的には、ある製品又はサービスのライフサイクル全体における環境負荷を定量的に評価する手法で、国際標準化機構（ISO）においても、その評価手法が規格化されている。詳細は以下の通り。

- ◇ LCAとは、製品又はサービスに係る原料の調達から製造、流通、使用、廃棄・リサイクルに至るライフサイクル全体を対象として、各段階の資源又はエネルギーの投入量と様々な排出物の量を定量的に把握し（インベントリ分析）、これらによる様々な環境影響又は資源・エネルギーの枯渇への影響等を客観的に可能な限り定量化し（影響評価）、これらの分析・評価に基づいて環境改善等に向けた意思決定を支援するための科学的・客観的な根拠を与える手法である。
- ◇ ISOでは、ライフサイクル評価の実施事例の増加に伴い、その共通基盤を確立することが望ましいと判断し、評価手法を規格化し、ISO 14040:2006にはLCAの原則と枠組み、ISO 14044:2006にはLCAの技術的要求事項や指針が記述されており、この2つの基準によってLCAの実施方法を規定している。

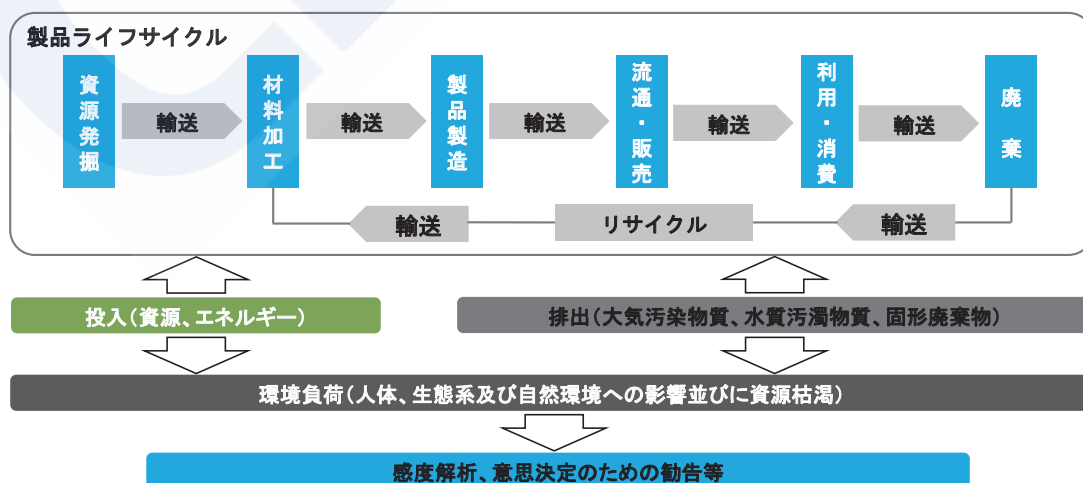


図3 LCA（ライフサイクルアセスメント）の概念⁵⁾

2.1 船用燃料のライフサイクルにおけるGHG排出量の評価

LCAガイドラインでは、図4に示すように、原料の採掘から加工、燃料製造、輸送及びバンカリングまでをWell-to-Tank、船上排出をTank-to-Wakeとし、ライフサイクル全体をWell-to-Wakeとして定義している。各工程で排出されるGHGを足し合わせることで、ライフサイクル全体でのGHG排出量を評価し、メタンスリップやN₂Oも考慮する。さらに、回収CO₂の輸送や貯蔵等、その経路に応じて評価範囲（システム境界）を設定し、(1)式に示す通り、GHG排出量の評価には、GHG強度、すなわち、単位エネルギーあたりのGHG排出量を用いる。

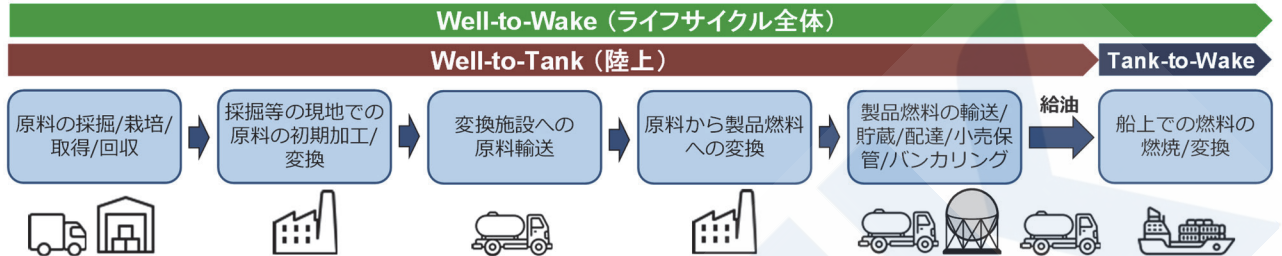


図4 船用燃料のライフサイクルサプライチェーンの例

$$GHG_{WTW} = GHG_{WTT} + GHG_{TTW} \quad (1)$$

GHG_{WTW}	gCO _{2eq} /MJ(LCV)	燃料の製造、輸送、船上での使用に至るライフサイクル全体での単位エネルギーあたりのGHG排出量
GHG_{WTT}	gCO _{2eq} /MJ(LCV)	燃料のライフサイクルの上流（原料の採掘、加工、輸送等）での単位エネルギーあたりのGHG排出量
GHG_{TTW}	gCO _{2eq} /MJ(LCV)	燃料のライフサイクルの下流（船上での使用）での単位エネルギーあたりのGHG排出量

2.2 GHG強度の計算方法

LCAガイドラインでは、Well-to-Tank、すなわち陸上におけるGHG強度は(2)式を用いて計算され、原料の採掘から製造、輸送及びバンカリングまでに排出されたGHGを計算するが、土地利用変化や土壌改善に係る排出量については、計算方法が確立されるまではゼロとすることになっており、現状、これらは考慮できない。一方、陸上におけるCO₂回収・貯留（CCS）については、考慮できる計算式となっているため、CCSを用いたブルー燃料は考慮できる。さらに、Tank-to-Wake、すなわち船上におけるGHG強度は(3)式を用いて計算される。(3)式は燃料の燃焼時に排出されるメタンやN₂Oをはじめ、燃料タンクからエンジンまでの間で漏れたメタンも考慮できる計算式となっているが、燃料タンクからエンジンまでの間で漏れたメタンについては、更なる技術的作業で適切な係数が決定されるまではゼロとすることになっており、現状、考慮できない。さらに、船上排出において、バイオ燃料のGHG削減量は考慮できるが、合成燃料や船上CCSについては、その取り扱いが確立されるまでは、その削減量はゼロとすることになっており、現状、考慮できない。

$$GHG_{WTT} = e_{fecu} + e_l + e_p + e_{td} - e_{sca} - e_{ccs} \quad (2)$$

e_{fecu}	原料の採掘／栽培／取得／回収に関連するGHG排出量
e_l	直接的な土地利用の変化による炭素ストックの変化から生じるGHG排出量（20年間）を年率換算したもの ※このパラメータの方法論がさらに改良されるまでこの値はゼロ。
e_p	採掘等の現地における原料の加工及び／又は変換に関連するGHG排出量と、発電を含む原料から最終燃料製品への変換に関連するGHG排出量
e_{td}	変換工場までの原料輸送に関連するGHG排出量、及び完成燃料の輸送・貯蔵、現地配送、小売店での貯蔵、バンカリングに関連するGHG排出量
e_{sca}	改善された農業管理による土壌炭素蓄積によるGHG排出削減量（20年間）の年換算値 ※このパラメータの方法論がさらに改良されるまでこの値はゼロ。

e_{ccs}	炭素回収・貯留(e_{ccs})による排出権のうち、 e_p にまだ計上されていないもの。これは燃料の採掘、輸送、加工、流通に関連し、排出されたCO ₂ を回収・貯留することによって回避されたCO ₂ 排出量を適切に計上するもの。 上記の排出権から、CO ₂ の回収・輸送から最終的な貯留に至る過程に起因する全てのCO ₂ 排出量（圧入等に関連する排出量を含む）を差し引く必要がある。この要素は以下の式で計算される。 $e_{ccs} = C_{sc} - e_{cc} - e_t - e_{st} - e_x$	
	C_{sc}	回収・貯留した正味のCO ₂ に相当する排出権（長期：100年）
	e_{cc}	CO ₂ の回収、圧縮、冷却、一時貯蔵に関連するGHG排出量
	e_t	長期保管場所への輸送に関連するGHG排出量
	e_{st}	回収CO ₂ の貯留（長期：100年）に関連するCO ₂ 排出量（長期貯留中や貯留地へのCO ₂ 圧入中に発生する可能性のある漏出を含む）
	e_x	CCSに関連する追加のGHG排出量

$$GHG_{TtW} = \frac{1}{LCV} \left\{ \left(1 - \frac{1}{100} (C_{slip_ship} + C_{fug}) \right) \times (C_{fCO_2} \times GWP_{CO_2} + C_{fCH_4} \times GWP_{CH_4} + C_{fN_2O} \times GWP_{N_2O}) \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{100} (C_{slip_ship} + C_{fug}) \times C_{sfx} \times GWP_{fuelx} \right) - S_{Fc} \times e_c - [S_{Fccu} \times e_{ccu}] - [e_{occs}] \right\} \quad (3)$$

C_{slip_ship}	酸化されずにエネルギー変換器から漏れた燃料の割合（船舶に供給された燃料の質量に対する割合）（燃焼室／酸化プロセス及びクランクケースから排出される燃料を含む） $C_{slip_ship} = C_{slip} * (1 - C_{fug}/100)$	
C_{slip}	酸化されずにエネルギー変換器から漏れた燃料の割合（エネルギー変換器内の消費燃料に対する割合）（燃焼室／酸化プロセス及びクランクケースから排出される燃料を含む）	
C_{fug}	燃料タンクとエネルギー変換器までの間で漏れた燃料（システム内の漏出、排出、あるいは消失した燃料）の割合（船舶に供給された燃料の質量に対する割合） ※更なる技術的作業で適切な係数が決定されるまでこの値はゼロ。	
C_{sfx}	燃料に含まれる温室効果ガスの割合を示す係数（単位：g GHG/g 燃料）。例：LNGの場合は1	
C_{fCO2}	燃料の燃焼及び／又は酸化過程による排出のCO ₂ 排出換算係数（g CO ₂ /g 完全燃焼した燃料）	
C_{fCH4}	燃料の燃焼及び／又は酸化過程による排出のCH ₄ 排出換算係数（g CH ₄ /g 船舶に供給された燃料） LNG/CNG燃料では、 C_{slip_engine} が C_{fCH4} の役割を担っているため、これらの燃料では C_{fCH4} はゼロとする。	
C_{fN2O}	燃料の燃焼及び／又は酸化過程による排出のN ₂ O排出換算係数（g N ₂ O/g 船舶に供給される燃料）	
GWP_{CH4}	CH ₄ の100年間の地球温暖化係数（IPCC 第5次評価報告書に基づく）：28	
GWP_{N2O}	N ₂ Oの100年間の地球温暖化係数（IPCC 第5次評価報告書に基づく）：265	
GWP_{fuelx}	燃料に含まれる温室効果ガスの100年間の地球温暖化係数（IPCC 第5次評価報告書に基づく）	
LCV	低位発熱量（指定された燃料の完全燃焼によって放出される熱量）	
S_{Fc}	バイオマスの生育により発生する排出権が、TtW値の算出において考慮されるかどうかを決定するための炭素源係数。0又は1とする。	
e_c	バイオマスの生育による排出権	
S_{Fccu}	燃料製造工程で合成燃料を製造するための炭素ストックとして回収された使用済みCO ₂ からの排出権が、TtW値の計算に考慮されるかどうかを決定するための炭素源係数。0又は1とする。	
e_{ccu}	燃料製造工程及び利用において回収したCO ₂ を合成燃料を製造するための炭素ストックとして使用することによる排出権（ e_{fch4} 及び e_p では計上されなかったもの） ※更なる方法論が開発されるまで $[S_{Fccu} \times e_{ccu}]$ の値はゼロ。	
e_{occs}	船上でCO ₂ を回収する炭素回収貯留(e_{occs})による排出権。CCSが船上で行われる場合、排出されたCO ₂ の回収・貯留によって回避された排出量を適切に算定する必要がある。排出されたCO ₂ の回収・貯留によって回避された排出量を適切に計上しなければならない。 上記の排出権から、CO ₂ を回収(e_{cc})し、最終貯留まで輸送(e_t)する過程から生じる全ての排出（注入などに関する排出を含む）を差し引く必要がある。この要素は以下の式で計算される。 ※更なる方法論が開発されるまでこの値はゼロ。 $e_{occs} = C_{sc} - e_{cc} - e_t - e_{st} - e_x$	
	C_{sc}	回収・貯留したCO ₂ に相当する排出権（長期：100年）
	e_{cc}	CO ₂ の回収、圧縮、船上での一時貯蔵に関連するGHG排出量
	e_t	長期保管場所への輸送に関連するGHG排出量
	e_{st}	回収CO ₂ の貯留（長期：100年）に関連するGHG排出量（長期貯留中や貯留地へのCO ₂ 圧入中に発生する可能性のある漏出を含む）
	e_x	CCSに関連する追加のGHG排出量

2.3 Fuel Lifecycle Label (FLL)

LCAガイドラインには、Fuel Lifecycle Labelと呼ばれる技術ツールが規定されている。これは船舶で使用された燃料やバッテリー等のエネルギーキャリアのライフサイクルアセスメントに関する情報を収集・伝達する

ための技術ツールで、ライフサイクルにおけるGHG排出量の評価に使用される。Fuel Lifecycle Labelは表1に示すように、Part AからPart Eまでの5つの主要部分から構成されている。Part Aは燃料種類、燃料経路、発熱量、燃料のブレンド比及び上流のGHG強度を、Part Bはバイオ燃料や合成燃料による削減量を、Part Cはバイオ燃料や合成燃料の削減量を考慮した場合としない場合の船上排出によるGHG強度及びエンジンの種類を、Part Dはライフサイクル全体でのGHG強度を、Part Eは持続可能性の認証に関する情報を記載する。

表1 Fuel Lifecycle Label (FLL)

Part A-1	Part A-2	Part A-3	Part A-4	Part A-5
Fuel type (blend)	Fuel Pathway code	Lower Calorific Value (LCV, MJ/g)	Share in fuel blend (%MJ _(LCV) /MJ _(LCV))	WtT GHG emission factor (GWP100, gCO _{2eq} /MJ _(LCV))
Part B-1		Part B-2		
Emissions credits related to biogenic carbon source (e _c , in gCO ₂ / g fuel based on GWP100)		Emissions credits related to source of captured carbon (e _{ccu} , in gCO ₂ / g fuel based on GWP100)		
Part C-1		Part C-2		Part C-3
TtW GHG intensity Value 1 (carbon source NOT taken into account): TtW GHG emission factor (GWP100, gCO _{2eq} /MJ _(LCV))		TtW GHG intensity Value 2 (carbon source taken into account): TtW GHG emission factor (GWP100, gCO _{2eq} /MJ _(LCV))		Energy Converter
Part D			Part E	
WtW GHG emission factor (GWP100, gCO _{2eq} /MJ _(LCV)) Note: Part D = Part A-5 + Part C-2			Sustainability (Certification)	

2.4 Fuel list with fuel pathway codes

LCAガイドラインでは、原料の種類、起源、製造方法及び使用するエネルギーに応じて、燃料経路を分類しており、合計128種類の燃料経路が規定されている。128種類の燃料リストから代表的な燃料として、重油、LPG、LNG、メタノール、水素、アンモニア、電力及び風力を表2に示す。

表2 Fuel list with fuel pathway codes 例

Order	Group	Fuel type	Feedstock structure		Conversion/Production process		Fuel Pathway Code
			Feedstock Type	Nature/Carbon Source	Process Type	Energy used in the process	
1	HFO (VLSFO)	Heavy Fuel Oil (ISO 8217 Grades RME, RMG and RMK, 0.10 < S ≤ 0.50%)	Crude Oil	Fossil	Standard refinery process	Grid mix electricity	HFO(VLSFO)_f_SR_gm
11	LPG	Liquefied Petroleum Gas (Propane)	Crude Oil	Fossil	Standard refinery process and liquefaction	Grid mix electricity	LPG(Propane)_f_SR_gm
31	LNG	Liquefied Natural Gas (Methane)	Natural Gas	Fossil	Standard LNG production including liquefaction	Grid mix electricity	LNG_f_SLP_gm
35	LNG	Liquefied Natural Gas (Methane)	CO ₂ + H ₂	CO ₂ : Fossil Point Source Carbon Capture H ₂ : Fossil Steam Methane Reformation	Methanation and liquefaction	Grid mix electricity	LNG_fCO2_fH2_M_gm
90	Methanol	Methanol	2 nd and 3 rd Gen. feedstock	Biogenic	Gasification of Biomass and Methanol Synthesis	Grid mix electricity	MeOH_b_G_MS_gm
110	Hydrogen	Hydrogen	Water + Electricity	Renewable	Dedicated Photovoltaic and/or Wind and/or other Electrolysis and liquefaction	Renewable electricity	LH2_EL_r_Liquefied
120	Ammonia	Ammonia	N ₂ + H ₂	N ₂ : separated with renewable electricity H ₂ : produced from renewable electricity	Haber Bosch process	Grid mix electricity	NH3_rN2_rH2_HB_gm
126	Electricity	Electricity		Fossil/Renewable	-	Grid mix electricity	Electricity_gm
128	Wind propulsion						

表3 Initial default emission factors per fuel pathway code

Order	Fuel type	Fuel Pathway Code	WtT GHG intensity (gCO _{2eq} /MJ)	LCV (MJ/g)	Energy Converter	C _f CO ₂ (gCO ₂ /g fuel)	C _f CH ₄ (gCH ₄ /g fuel)	C _f N ₂ O (gN ₂ O/g fuel)	C _{allp} /C _{fuel} (mass %)	e _c (gCO _{2eq} /g fuel)	TtW GHG intensity (gCO _{2eq} /MJ)	NOTE
1	Heavy Fuel Oil (ISO 8217 Grades RME, RMG and RMK, 0.10 < S ≤ 0.50%)	HFO(VLSFO)_f_SR_gm (Fossil)	16.8	0.0402	ALL Internal Combustion Engines (ICEs)	3.114	0.00005	0.00018				Resolution MEPC.364(79) Fourth IMO GHG study
2	Heavy Fuel Oil (ISO 8217 Grades RME, RMG and RMK exceeding 0.50% S)	HFO(HSHFO)_f_SR_gm (Fossil)	14.1	0.0402	ALL ICEs	3.114	0.00005	0.00018				Resolution MEPC.364(79) Fourth IMO GHG study
3	Light Fuel Oil (ISO 8217 Grades RMA, RMB and RMD maximum 0.10% S)	LFO(ULSFO)_f_SR_gm (Fossil)		0.0412	ALL ICEs	3.151	0.00005	0.00018				Resolution MEPC.364(79) Fourth IMO GHG study
4	Light Fuel Oil (ISO 8217 Grades RMA, RMB and RMD, 0.10 < S ≤ 0.50%)	LFO(VLSFO)_f_SR_gm (Fossil)		0.0412	ALL ICEs	3.151	0.00005	0.00018				Resolution MEPC.364(79) Fourth IMO GHG study
5	Marine Diesel/Gas Oil (ISO 8217 Grades DMX, DMA, DMZ and DMB maximum 0.10 % S)	MDO/MGO(ULSFO)_f_SR_gm (Fossil)	17.7	0.0427	ALL ICEs	3.206	0.00005	0.00018				Resolution MEPC.364(79) Fourth IMO GHG study
6	Marine Diesel/Gas Oil (ISO 8217 Grades DMX, DMA, DMZ and DMB, 0.10 < S ≤ 0.50%)	MDO/MGO(VLSFO)_f_SR_gm (Fossil)		0.0427	ALL ICEs	3.206	0.00005	0.00018				Resolution MEPC.364(79) Fourth IMO GHG study
11	LPG (Propane)	LPG(Propane)_f_SR_gm (Fossil)		0.0463	ALL ICEs	3.000	0.00005	0.00018				Resolution MEPC.364(79) Fourth IMO GHG study
21	LPG (Butane)	LPG(Butane)_f_SR_gm (Fossil)		0.0457	ALL ICEs	3.030	0.00005	0.00018				Resolution MEPC.364(79) Fourth IMO GHG study
31	LNG (Methane)	LNG_f_SLP_gm (Fossil)	0.0480		LNG Otto (dual fuel medium speed)	2.750	0	0.00011	3.5/-			Resolution MEPC.364(79) Fourth IMO GHG study
					LNG Otto (dual fuel slow speed)				1.7/-			
					LNG Diesel (dual fuel slow speed)				0.15/-			
					LBSI (Lean-Burn Spark-Ignited)				2.6/-			
					Steam Turbines and boilers				0.01/-			
33	LNG (Methane)	LNG_b_AD_gm (Biogenic)			LNG Otto (dual fuel medium speed)	2.750						
					LNG Otto (dual fuel slow speed)							
					LNG Diesel (dual fuel slow speed)							
					LBSI (Lean-Burn Spark-Ignited)							
					Steam Turbines and boilers							
62	Diesel (FAME)	FAME_b_TRE_gm_2ndgen (2 nd Gen. feedstock)	20.8	0.0372	ALL ICEs							
77	Renewable Diesel (HVO)	HVO_b_HD_gm_2ndgen (2 nd Gen. feedstock)	14.9	0.0440	ALL ICEs							
105	Hydrogen	H2_f_SMR_CCS_gm (Fossil)		0.1200	ALL ICEs Fuel cell	0						
121	Ammonia	NH3_rN2_fH2_HB_gm (Renewal, Fossil)		0.0186	ALL ICEs Fuel cell	0						

2.5 デフォルト値と実際の値に関する規定

GHG強度や各種係数を実際に計算/計測するには、かなりの時間と労力を要するため、LCAガイドラインではデフォルト値の使用が認められており、デフォルト値は代表的かつ保守的な仮定を基に設定される。デフォルト値を設定するには、少なくとも3つの異なる代表的な排出源において、各排出源でGHG強度や各種係数を

求め、その中の上限値（保守的な値）がデフォルト値として採用される。デフォルト値よりも優れた値を使用したい場合は、第三者認証を条件にLCAガイドラインに規定された方法論に従い求められた、実際の値を使用することができる。一方、純粋な化石由来燃料の場合は、GHG強度の実際の値の使用は認められていないため、デフォルト値のみを使用することになっている。LCAガイドラインには128種類の燃料経路（Fuel Pathway）が設定されているが、燃料経路がLCAガイドラインに設定されていない燃料の場合は、経路の詳細情報を提出し、第三者認証を受ければ、実際の値を使用することができる。デフォルト値については、まだほとんど設定されておらず、Well-to-Tank、すなわち上流のGHG強度のデフォルト値を表3に赤字で示す通り、化石由来の重油とバイオ燃料のFAME及びHVOの合計5種類しか設定されていない。さらに、メタンスリップに関するデフォルト値については、表3に示す通り、LNGエンジンのオットーサイクルや高圧式などの種類に応じて設定されているが、漏出メタンやアンモニアエンジンのN₂Oに関するデフォルト値はまだ設定されていない。一方、排ガス後処理システムについては、処理能力が様々なため、デフォルト値は設定せずに、第三者による検証及び認証を条件に実際の排出係数を使用することが規定されている。

2.6 船用燃料の持続可能性基準（Sustainability Criteria）

船用燃料についても、持続可能性を考慮する必要があるため、LCAガイドラインでは、以下に示す10種類の環境テーマや側面が設定されている。しかしながら、具体的な認証基準は規定されていないため、今後、検討される予定である。また、持続可能な船用燃料として、LCAガイドラインでは、ライフサイクルベースで従来の船用燃料よりもGHG排出量が少ないことを規定しているが、国際航空のICAO CORSIAでは基準燃料に対してGHG強度が10%減を、EU再生可能エネルギー指令（RED III）では70%減（非生物由来の再生可能燃料及びリサイクル炭素燃料）を要求していることから、今後、より厳しくなる虞がある。

1. GHG：持続可能な船用燃料は、ライフサイクルベースで従来の船用燃料（DCSデータ3年分の液体石油製品のエネルギーベース加重平均）よりもGHG排出量が少ない。
2. 炭素源：持続可能な船用燃料は、化石エネルギー源の使用によるGHG強度を増加させず、回収・貯留された炭素の永続性を確保すると同時に、経済部門間のダブルカウントを回避する。
3. 電力／エネルギー源：Well-to-Tankで大量の電力投入を必要とする持続可能な船用燃料や、船舶に直接供給される電力は、再生可能、原子力、生物由来の電力・エネルギーを使用することで生産される。これらは、現在又は長年の需要レベルに追加されるか、オフピーク時に余剰電力を使用することで生産される。
4. 直接的土地利用変化：持続可能な船用燃料は、炭素蓄積量の多い土地から得られるバイオマスから作られるものではない。持続可能な船用燃料の生産は、直接的な土地利用の変化に起因する排出を最小化する。
5. 間接的土地利用変化：持続可能な船用燃料の原料の栽培は、評価される製品システムの外で発生する土地の使用や管理に否定的な変化を引き起こすことを最小限に抑える。
6. 水：持続可能な船用燃料の生産は、水質と利用可能性を維持又は向上させる。
7. 空気：持続可能な船用燃料の生産は、空気の質への悪影響を最小限に抑える。
8. 土壌：持続可能な船用燃料の生産は、土壌の健全性を維持又は向上させる。
9. 廃棄物と化学物質：持続可能な船用燃料の生産は、廃棄物の責任ある管理と化学物質の使用を維持又は強化する。
10. 環境保全：持続可能な船用燃料の生産は、生物多様性と生態系、あるいは保全サービスを維持又は強化する。

2.7 検証及び認証

Fuel Lifecycle Label（FLL）は、今後、IMOが開発するガイダンスに従って、以下の通り、第三者による検証及び認証を受けることがLCAガイドラインに規定されている。

- ◇ FLLのPart A、Part B、Part C及びPart Eは異なる認証機関により検証及び認証を受けられるが、Part DはPart A、Part B及びPart Cの検証結果を基に検証及び認証を受けること。
- ◇ FLLのPart A-1からPart A-4及びPart C-3が検証されている場合、LCAガイドラインに含まれるデフォルト値は追加検証せずに適用できる。
- ◇ デフォルト値よりも優れた実際の値を使用するには、今後、IMOが開発するガイダンスに従って、第三者による検証及び認証を受けること。

一方、FLLの検証及び認証には、関連する認証スキーム／規格を使用することや、使用する認証スキーム／規格はIMOが策定したガイダンスを考慮してMEPCが承認し、承認された認証スキーム／規格のリストは、一

般に公開され、常に見直されることが規定されている。さらに、認証スキーム／規格を承認するための提案は、今後開発される基準による評価結果と共に、検討のためにMEPCに提出することや、IMOの枠組み全体の品質、信頼性及び堅牢性を保証し、認証スキーム間の公平性を確保するために、認証スキームの承認に繋がる枠組み、基準及び手続きは、統一的に実施されることが規定されている。しかしながら、LCAガイドラインには、詳細が規定されていないため、今後、認証スキーム及び第三者認証に関するガイダンスを開発する必要がある。

3. 船用燃料ライフサイクルGHG強度に関するGESAMP作業部会の付託事項

上述の通り、LCAガイドラインには、デフォルト値や認証方法など、未だ多くの課題があり、課題解決には専門知識が必要なため、MEPC 81（2024年3月）において、GESAMP（海洋環境保護の科学的側面に関する合同専門家グループ）に船用燃料ライフサイクルGHG強度に関する作業部会（GESAMP-LCA WG）を新設することが合意され、作業に向けた付託事項が作成された。GESAMP-LCA WGは、LCAガイドラインの実施に関連する問題について、科学的・技術的に最良の評価を行う専門家グループであり、付託事項は以下の通り。

- LCAガイドラインにおける排出量算定方法の改良
 - ✓ LCA手法の科学的レビュー
 - ✓ 燃料生産経路と技術のGHG強度（WtT）のデフォルト値の科学的レビュー
 - ✓ 燃料使用と船上技術のGHG強度（TtW）のデフォルト値の科学的レビュー（船上CCSの境界の明確化を含む）
 - ✓ LCAに関するサンプル計算と、その結果を既存のFLL（Fuel Lifecycle Label）に反映させる
- 持続可能性に関するテーマ／側面
 - ✓ LCAガイドラインの持続可能性テーマ／側面の下での指標と測定基準の精緻化と更なる探求
 - ✓ 間接的土地利用変化に関するリスク分類へのアプローチ
- 認証に関するLCAガイドラインの方法論的要件
 - ✓ WtT及びTtWの実際の値を含む、燃料経路認証のための可能な要求事項の開発及び／又は識別のための外部経験及び更なる情報を提供する

注：GESAMP（Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection）は、1969年に国連が海洋環境保護のための第三者機関として設立した合同専門家グループで、現在、海洋環境に関心又は権限を持つ10の国連機関が共催し、IMOが事務局を務めている。現在、GESAMPには9つの作業部会があり、個人の資格で独立した専門家として参加している。GESAMPの作業部会には、例えば、船舶が運搬する有害物質の評価に関するGESAMP WG 1や、バラスト水管理システムに使用する「活性物質」の申請審査に関する作業部会（WG 34）などがある。独立性を確保するために、GESAMPが性別や地理的なバランスに最大限注意を払いつつ、当面の課題に最適な専門家を選出する。MEPC 80（2023年7月）に設置された船用燃料LCA通信部会において、著者はEC／ブラジルと共にコーディネータを務めており、GESAMP-LCA WGにおいても、12名の専門家のうちの一名に選出された。

4. 船用燃料LCA通信部会の新たな付託事項

船用燃料の持続可能性基準には、土地や水の使用権、地域と社会の発展、人権や労働権、食料安全保障などの「社会的・経済的持続可能性のテーマ／側面」が規定されていないため、MEPC 81（2024年3月）において、船用燃料LCA通信部会に新たな付託事項として、「船用燃料のその他の社会的・経済的持続可能性のテーマ／側面」について検討し、MEPC 83（2025年4月開催予定）に報告書を提出することが合意された。

5. 非CO₂のGHG排出及び船上CCSに関する通信部会の付託事項

MEPC 81（2024年3月）において、LCAガイドラインの改正にあたり、メタン（CH₄）及びN₂Oの船上排出や船上CCSについては、更なる検討が必要なため、GESAMP-LCA WGや船用燃料LCA通信部会とは別に、新たに「非CO₂のGHG排出及び船上CCSに関する通信部会」を設置することが合意された。通信部会の付託事項は以下の通り。

- CH₄及びN₂Oの船上排出に関して
 - ✓ 船上におけるCH₄及びN₂Oの実際の排出係数やエネルギー変換器におけるC_{slip}値に関して、測定と検証の枠組みをどのように開発するかを検討する。
 - ✓ LCAガイドラインに適用するために、認証に関する方法的枠組みをどのように開発するかを検討する。
 - ✓ 必要な規制又は推奨される規定を開発することを視野に入れ、既存の規定との差異を特定し、推奨を提案する。
- 船上CCSに関して
 - ✓ 船上CCSに関連する問題を検討し、船上で回収されたCO₂の算定に関する事項を除き、船上CCSの使用に関する規制枠組みを開発するための作業計画を策定する。
- MEPC 83（2025年4月開催予定）に報告書を提出

6. おわりに

LCAガイドラインについては、今後、GESAMP-LCA WGをはじめ、船用燃料LCA通信部会や非CO₂のGHG排出及び船上CCSに関する通信部会において、実用化に向けて更なる検討が行われる予定である。検討にあたり、著者はGESAMP-LCA WGのメンバーの一人として、引き続き、貢献できれば幸いである。とりわけ、認証の専門家として、船用燃料の認証スキーム／第三者認証に関するガイダンスの開発に貢献できれば幸甚である。

参考文献

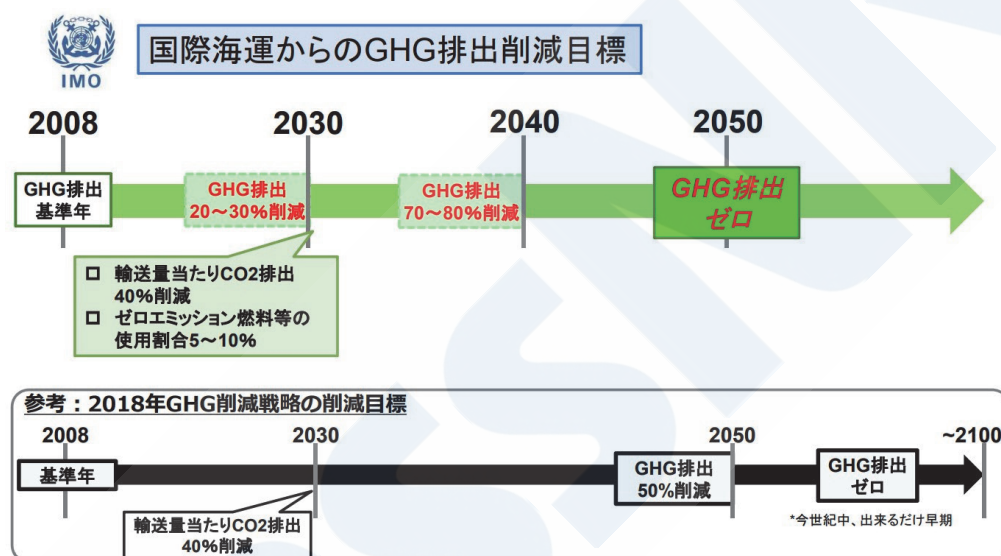
- 1) IMO : GUIDELINES ON LIFE CYCLE GHG INTENSITY OF MARINE FUELS (LCA GUIDELINES), IMO RESOLUTION MEPC.376(80)
- 2) Brazil, Japan and EC : Report of the Correspondence Group on the Further Development of the LCA Framework, IMO MEPC 81/7/4, 2024
- 3) IMO : 2024 GUIDELINES ON LIFE CYCLE GHG INTENSITY OF MARINE FUELS (2024 LCA GUIDELINES), IMO RESOLUTION MEPC.391(81)
- 4) EU : FuelEU Maritime, 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)
- 5) 環境省：水素サプライチェーンにおける温室効果ガス削減効果に関するLCAガイドライン Ver.2.1, 2020

代替燃料船の動向と本会の取り組みについて

技術本部 技術部

1. はじめに

2023年7月に開催されたMEPC80にて、IMOは新たなGHG削減目標を採択した。MEPC80以前は、2018年に採択した、燃費効率を2030年までに2008年比で40%以上の改善、GHG排出削減については、2050年までに総排出量を50%以上削減し今世紀中のできるだけ早期にGHG排出ゼロ、を目標として掲げていたところ、新たな目標では、2040年までにGHG排出量を70～80%削減し、2050年までにGHG排出ゼロを目指すことが採択された。(図1)



Source: 国土交通省

図1 国際海運からのGHG排出削減目標

このIMO戦略の達成に関して、2030年までの目標については、既存船のエネルギー効率を改善すること、及びエネルギー効率の高い新造船に更新することにより、達成することは可能であると考えられるものの、従前の目標よりも更に厳しい2040年や2050年の船舶からのGHG排出削減目標を達成するには、低炭素またはゼロ炭素の代替燃料やGHG削減技術の利用が不可欠となることが考えられる。このような背景から、低炭素またはゼロ炭素の代替燃料を導入した船舶の建造が増加するものと考えられ、実際に国内外で多くのプロジェクトが発足している。

本稿では、代替燃料船の動向と本会の取り組みについて紹介する。

2. 代替燃料に対する承認スキーム

海運での利用が既に実施されている、あるいは想定される代替燃料として、LNG、LPG、メタノール、アンモニア、水素が挙げられる。各代替燃料船及び関連する技術に対応するIMO規則・ガイドライン、本会規則・ガイドラインとの関係を表1に示す。

表1 代替燃料船及び関連技術に対応する規則・ガイドライン

代替燃料／関連技術	IMO規則／ガイドライン	本会規則／ガイドライン
LNG	<i>IGF Code</i>	鋼船規則・検査要領 GF編 低引火点燃料船
メタノール	<i>Interim Guidelines for Ships Using Methyl / Ethyl alcohol as Fuel (MSC.1/Circ.1621)</i>	代替燃料船ガイドライン (第3.0版) (メタノール／エタノール／ LPG／アンモニア／水素) 2024年8月
LPG	<i>Interim Guidelines for the Safety of Ships Using LPG Fuels (MSC.1/Circ.1666)</i>	
アンモニア	<i>Under development</i> (2024年9月CCC10で最終化，2024年12月MSC109にて採択予定)	
水素 (as fuel)	<i>Under development</i> (2025年9月CCC11で最終化予定)	
(液化水素運搬船)	<i>Interim Recommendations for Carriage of Liquefied Hydrogen in Bulk (Res.MSC.420(97))</i>	液化水素運搬船ガイドライン (第2.0版) 2023年9月
燃料電池	<i>Interim Guidelines for the Safety of Ships Using Fuel Cell Power Installations (MSC.1/Circ.1647)</i>	燃料電池搭載船ガイドライン (第2版) 2023年9月

IMOでは、LNG燃料船に対してはIGFコードが規則として発行されており、本会もIGFコードに対応した鋼船規則GF編（低引火点燃料船）を発行している。LNG以外の代替燃料船・関連技術については、メタノール、LPG、液化水素運搬船、燃料電池に関して、IMOガイドラインが発行されており、本会もこれらのガイドラインをベースにしたガイドラインを発行している。アンモニア燃料、水素燃料についてもIMOでガイドラインが審議されており、このうちアンモニア燃料のガイドラインについては2024年9月のCCC10にて最終化され、2024年12月のMSC109にて採択予定である。

これまで述べたように、IMOの規則が確立している代替燃料はLNG燃料のみで、他の燃料はIMOガイドラインが発行されているものの、規則化はされていない。このような燃料に対しても、IGF Code, IGC Code, SOLASでは代替設計が適用可能となるように規則が定められている。(図2)

■ IGF Code 2.3 “代替設計”(低引火点燃料船(LNG燃料船以外)に適用)

2.3 代替設計

低引火点燃料の装置は、**本コードの目的及び機能要件に適合し、関連各章に規定される安全性と同等を確保**できる場合、本コードに特に規定されていない燃料を使用する設計として差支えない。

■ IGC Code 16.9 “代替燃料及び代替技術”(液化ガス運搬船に適用)

16.9.1 代替燃料及び代替技術

本編に規定される**メタンに対する要件と同等の安全性を確保**することを条件に、**主管庁の承認**を得た場合、**メタン以外の貨物を燃料として使用**することができる。

■ SOLAS II-1 Part F 第55規則 “代替的な設計及び配置”

2. 総則

機関及び電気設備並びに低引火点燃料の貯蔵及び分配システムの設計及び配置は、**代替的な設計及び配置が関係要件の意図を満たし、並びにこの章と同等の水準の安全性を備える場合には、C部、D部、E部又はG部までに定める要件から逸脱**することができる。

図2 代替燃料船に対する代替設計のスキーム

IGFコードは、引火点が60℃未満の低引火点燃料を使用する、液化ガス運搬船以外の船舶に適用されるものであり、例えば、水素燃料を使用する船舶にも、このIGFコードが適用されるものの、現状、詳細な要件はLNG燃料についてのみ規定されている状態である。

このように詳細な安全要件が規定されていない水素燃料を使用する場合、IGFコードの代替設計の要件を適用して、規則に規定される安全性との同等性が確認されたうえで、主管庁に承認を受けることで、水素燃料の使用が認められる。

液化アンモニアや液化水素を運搬するガスキャリアで貨物を燃料とを使用する場合、適用されるIGCコードにおいても「代替燃料及び代替技術」の規定があり、これもメタンに対する要件と同等の安全性を確保することを条件に、主管庁の承認を得た場合、メタン以外の貨物を燃料として使用することができる。

液化ガス運搬船以外のアンモニア燃料船の場合、SOLAS II-I章 Part Fの第55規則に規定されている“代替的な設計及び配置”の規定を適用し、同じく既存船に適用される規則と同等の安全性を確認し、主管庁の承認を取得することでアンモニア燃料の使用が可能となる。

安全性に関する詳細な適用規則がない代替燃料や代替技術に対しては、代替設計の実施を認める現行規則を受け皿としつつ、既存船に適用される規則と同等の安全性を確保し、最終的に主管庁、つまり船の旗国によって承認される必要がある。

3. 各代替燃料船の動向

3.1 LNG燃料船

2024年8月末時点で本会船級船では15隻が就航中で、60隻以上の入級申請を受領し、既に各地の造船所で建造段階に入っている船舶も多い。船種はPCC、バルクキャリア、コンテナ船、ケミカルタンカーなど、多岐にわたる。

また、アンモニアReadyのLNG燃料船に対する設計基本承認（AiP）も実施している。



図3 LNG燃料船 M/V CENTURY HIGHWAY GREEN

3.2 LPG燃料船

2024年8月末時点で本会船級船では18隻が就航中で、10隻以上の入級申請を受領し、建造段階に入っている船舶もある。船種はいずれもLPG運搬船であり貨物であるLPGを燃料として使用する。

また、アンモニア輸送の需要増を見据えて、LPGに加えアンモニアも積載可能な仕様が增加傾向にあり、アンモニア貨物を燃料として使用するためのコンセプトデザインを設計時に実施し、本会のアンモニアReadyの船級符号付記を取得する仕様も増加している。



図4 LPG燃料LPG／アンモニア運搬船 M/V "POHENIX HARMONIA"

3.3 メタノール燃料船

2024年8月末時点で本会船級船では4隻が就航中で、船種はいずれもケミカルタンカーであり、貨物であるメタノールを燃料として使用する。

また、内航ケミカルタンカー、バルクキャリア及びコンテナ船の実建造プロジェクトが増加しており、リスク評価への参画、安全性の検証及び主管庁承認に係る対応を実施している。

3.4 アンモニア燃料船

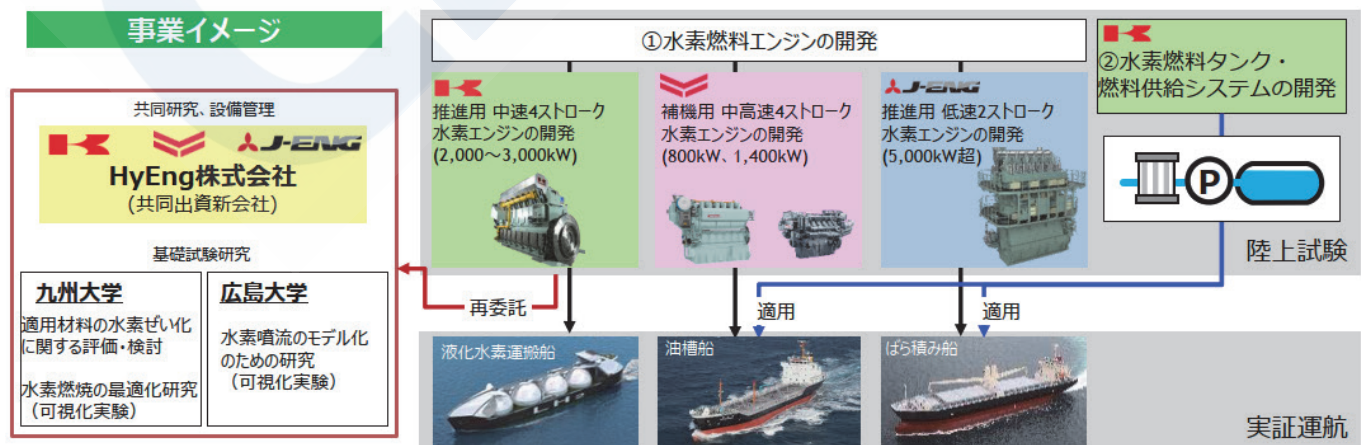
2024年8月末時点で本会船級船では1隻が船級登録されている。これは、日本郵船株式会社と株式会社IHI原動機が研究開発を行っていたタグボート「魁」をアンモニア燃料船として登録したものである。

また、アンモニア燃料焚きのバルクキャリア及び液化ガス運搬船の実建造プロジェクトが開始されている他、これまでに自動車運搬船、バルクキャリア及びVLGC等にアンモニア燃料船としての設計基本承認（AiP）の発行を行っている。

3.5 水素燃料船

貨物を燃料として利用する水素運搬船について、水素燃料の適用を目指したプロジェクトが取り組まれており、本会も参画している。また、水素を利用した燃料電池を用いる水素燃料電池船については、小型フェリー等の小型船で実用化された例がある。

一方で、水素燃料を用いるエンジンについては開発中で、国内ではエンジンメーカーと学識経験者が中心となり、推進用中速4ストロークエンジン、補機用高速4ストロークエンジン、推進用の低速2ストロークエンジンの各種水素エンジンの実現に向けて、開発事業が進められている。（図5）



出典：川崎重工業㈱，ヤンマーパワーテクノロジー㈱，㈱ジャパンエンジンコーポレーション

図5 水素燃料を用いるエンジンの開発体制

3.6 水素運搬船

2024年8月末現在、1隻が船級登録されている。これは川崎重工業株式会社建造の世界初の液化水素運搬船「すいそふろんていあ」を船級登録したものである。また、大型液化水素運搬船の貨物格納設備・貨物移送設備・二元燃料ボイラー・二元燃料エンジン等の設計基本承認（AiP）の発行を行っている。

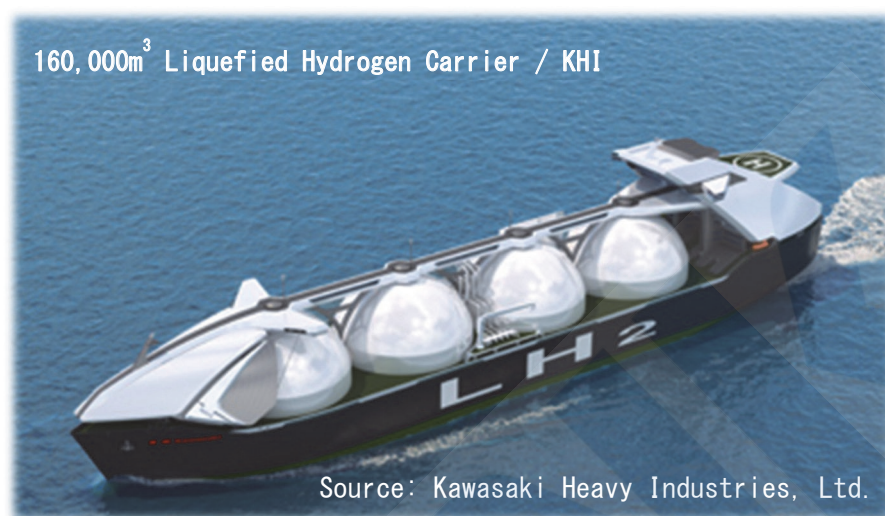


図6 液化水素運搬船

3.7 バイオ燃料に関する取り組み

バイオディーゼルの本会船級船でのトライアルは多数行われている他、家畜糞尿由来の液化バイオメタンや、バイオメタノールを使用した実績もある。バイオ燃料の使用に関して、本会はバイオ燃料使用に向けたテクニカルガイドを発行している。本テクニカルガイドではバイオ燃料の特徴、使用時に考えられるトラブル、バイオ燃料を燃料として使用する上での条約上の取り扱い及びバイオ燃料の将来的な可能性について述べている。

4. まとめ

IMOのGHG削減目標達成のため、代替燃料・ゼロエミッション導入に向けた新技術の適用が不可欠となる。

本会は業界との連携及び各プロジェクトへの参画を通じ、代替設計の安全性評価、設計承認及び旗国承認取得支援等により、業界に貢献するとともに、得られた知見を活用し、IMO等において、新技術適用船の安全に関する条約/ガイドラインの策定に貢献することを目指していく所存である。

GHG削減に向けた船舶用Dual Fuel（二元燃料）エンジンの開発動向

高崎 講二*

1. はじめに

本稿は、2023年発行のClassNK技報No.7「GHG削減に向けた船舶用エンジンと燃料開発の取り組み」の続報となる。また、IMOによる「2050年国際海運からのGHG排出ネットゼロ」の目標に向けて、本年発行されたClassNK代替燃料インサイト（以下、NKインサイト）にある代替燃料導入のための4ステップの中で、本稿はステップ3の「代替燃料を理解する」ための補足となる。

それにも記載されている通り、現時点での代替燃料の生産量はどれも圧倒的に不足している。しかしながら2050年の目標を達成するには、今後の生産規模の拡大を見据えて、それら使用可能な船用エンジンの開発を今から進めておく必要がある。本稿では前報に引き続き、ゼロエミッション（ゼロカーボン）燃料とカーボンニュートラル燃料を利用する船用エンジンの開発について、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO）による「グリーンイノベーション基金事業・次世代船舶の開発（以下、GI基金）」を含む国内の進捗状況、また欧州側の開発動向についても一部を紹介する。

本稿でのDual Fuel（二元燃料）（以下、DF）エンジンの定義は、代替燃料のどれか一つと従来重油のどちらも使えることであり、代替燃料のサプライ体制が整うまでは重油で運転することもあり得る。そのためには、船内の重油タンクは十分な容量を残しておく必要がある。また、本稿で挙げられた代替燃料はどれも重油より自己着火性に劣り、筒内での着火のため少量のパイロット重油が噴射される。代替燃料が不足の場合は重油の噴射量を積極的に増やして、いわゆる「代替燃料と重油の混焼モード」にすることも可能となっている。

2. ゼロエミッション燃料とカーボンニュートラル燃料

ゼロエミッション燃料としては、再生電力で水を電気分解して生成するグリーン水素と、原料は化石燃料でもよいが、製造時に出るCO₂を回収貯蔵しながら作ったブルー水素がある。水分を多く含むオーストラリアの褐炭から水素を作り、現地で液化して日本に輸送するプロジェクトがブルー水素利用の一例である。それらの水素と窒素を合成したアンモニア（NH₃）もゼロエミッション燃料となる。

カーボンニュートラル燃料としては以下のものがある。バイオ燃料は燃焼時にCO₂を排出するが、その前に大気中のCO₂を吸収しているためゼロカウントとなる。合成メタン・合成メタノールについては前報でも解説したが、グリーン・ブルー水素に陸上の産業から回収したCO₂（陸側はCO₂排出となる）を合成させることで、船からのCO₂はゼロカウントとなる規則の制定が期待される。これについては今後IMOで議論される。

実際に合成メタン・合成メタノールの供給がない時点では、グレーなもの（化石の天然ガスや化石燃料から作られるメタノール）でもよいから取りあえず運用を開始し、グリーンやブルーなものが出て来た時点でそちらに転換すると言う考え方もある。以下にさらに詳しく解説する。

バイオ燃料：NKインサイトによると、カーボンニュートラルなメタン・LPG・メタノールは、上記の合成による方法以外にいずれもバイオ由来で生成することもできる。ただし、ここでは現時点で試験運航も行われているバイオディーゼル油のみに言及する。

植物油にプロセスを掛けてFAME（Fatty Acid Methyl Ester）にした場合のエンジン燃焼には問題はなく、重油焚きディーゼルにドロップイン、つまりエンジン側の設定を何も変えずに使用可能である。また重油と混合してバンカリングすることができる。ただし原材料の量が課題である。食用油の燃料への直接転用には世界的に反対が多く、現時点で原料となる食廃油は航空業界と取り合いになっている。

参考に、国土交通省海事局と一般財団法人日本海事協会（以下、NK）では、バイオ燃料の取扱いについてそれぞれ以下のガイドライン等を改訂している。

* 九州大学名誉教授・国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所フェロー

- ・海事局：バイオ燃料取り扱いガイドライン^{2024年3月改訂¹⁾}
- ・NK：バイオ燃料使用に向けたテクニカルガイド^{2024年4月改訂²⁾}

合成メタン：現用される天然ガスの主成分はメタンであるため、合成メタンは既存のLNG燃料船に対してもドロップインである。現時点でLNG燃料船を建造して化石の天然ガスを使いつつ、合成メタンの出現を待って混合あるいは転換して行く考え方もある。

合成メタノール：メタノールは性状的に常温・常圧下で液体と言う取り扱い上有利な点があり、後述するようにに燃焼も良好である。MAN Energy Solutions（以下、MAN）開発の低速2ストロークのメタノールエンジンは、メタノール運搬船の主機として2016年からすでに稼働している。合成メタンも合成メタノールも前述の作り方による高コストが課題で、NKインサイトの図「代替燃料の製造経路・コスト（2030年時点での見込み）」によると、両者とも重油の4.2倍と見積もられている。

アンモニア：エンジンは、後で紹介するように低速2ストロークも中速4ストロークも現在開発中である。NKインサイトでは、グリーンアンモニアのコストは重油の3.1倍、ブルーアンモニアで重油の1.9倍と見積もられている。前述のように、最初はグレーなアンモニアでもよいからサプライチェーンの整備を急ぎたい状況がある。国土交通省海事局では、アンモニア燃料船への安全かつ円滑な燃料補給の実施に向けて、昨年度からアンモニアバンカリングガイドライン検討委員会を開催し³⁾、毒性も考慮した漏洩対策に十分な検討を行っている。

水素：水素エンジンも、後述するように低速2ストロークも中速4ストロークも開発中である。NKインサイトでは、コストは液化グリーン水素で重油の3.8倍、液化ブルー水素で3.1倍と見積もられている。アンモニアに比べて割高となっていることから、水素液化のためのコスト低減が現時点での課題である。船では液化水素の船内タンク容量等の課題もあり、GI基金による水素エンジン開発においては、当初は液化水素運搬船向けや日本・東南アジア間など近海航路向けの用途を想定している。

上記の代替燃料の中でどれが本命か？を問われることも多いが、1種類では全世界のサプライを賄えないという見方が一般的で、世界の多くの研究機関が2050年にどれも残るであろうという予想を立てている。その背景の中で、本稿ではメタノール、アンモニア、水素を燃焼させる各DFエンジンの開発について解説する。

3. メタノール (CH₃OH) DFエンジンの開発動向

低速2ストローク・メタノールエンジン

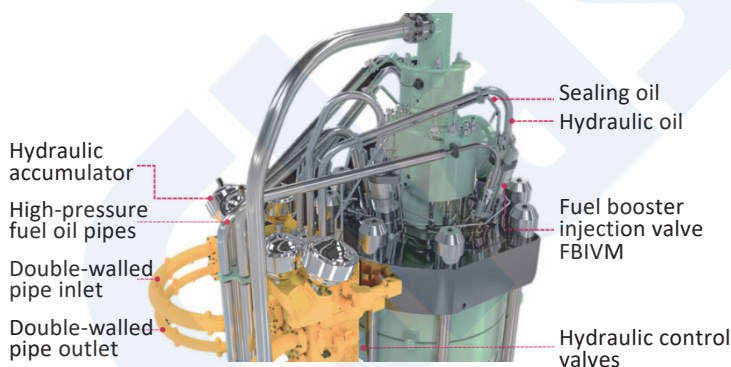


図1 MANの低速2ストローク・メタノールエンジン
G95ME-C10.5-LGIM（シリンダ径：950mm）
シリンダカバー部（MAN社提供）



図2 WinGDの低速2ストローク・メタノール
エンジン開発のための単気筒テストエンジン
SCE920（シリンダ径：920mm）（WinGD社提供）

始めにディーゼル型のメタノールエンジンについて解説する。低速2ストローク主機に関してはMAN、WinGD社ともこのタイプを開発している。メタノールの性状とディーゼル噴霧燃焼については前報に解説している。性状として常圧での沸点が65℃であり、ライン圧力（株式会社三井E&S（以下、三井E&S）の発表⁴⁾で1.3MPa）を掛けてエンジンに液体で送り込み、筒内には通常の高圧ディーゼル噴射が可能である。ただし体積当たり発熱量が重油の約4割であるため、同じ出力を得るには2.5倍の体積を噴射するシステムを必要とする。

メタノールの引火点は9℃と低い、着火点（自己着火温度）は440℃と高く、筒内で着火させるため重油等

のパイロット噴射を必要とする。ただし、一旦着火すると軽油よりも良好な燃焼を示す。上述のように、低速2ストロークエンジンはすでに就航して技術的には完成の域にあり、最近は特に大型コンテナ船向けで多くのオーダーがある。図1はその大型主機のシリンダカバー部で、DFの特徴からメタノール噴射ノズルと重油噴射ノズルがペアで3対装備されている。また黄色の部分、低引火点と毒性に備えた漏洩対策として用意される二重管部を示す⁵⁾。

WinGDも、2015年よりアルコール燃料（エタノール・メタノール）主機関向けに燃焼試験、リグテスト及び4気筒テストエンジン（シリンダ径：500mm）にて開発に取り組んでいる。さらにシリンダ径：920mmの単気筒テストエンジン（図2）でも検証を実施しており、同口径の大形コンテナ船向け10X92DF-Mエンジンの工場出荷試験を2025年1Qに予定している⁶⁾。

中速4ストローク・メタノールエンジン

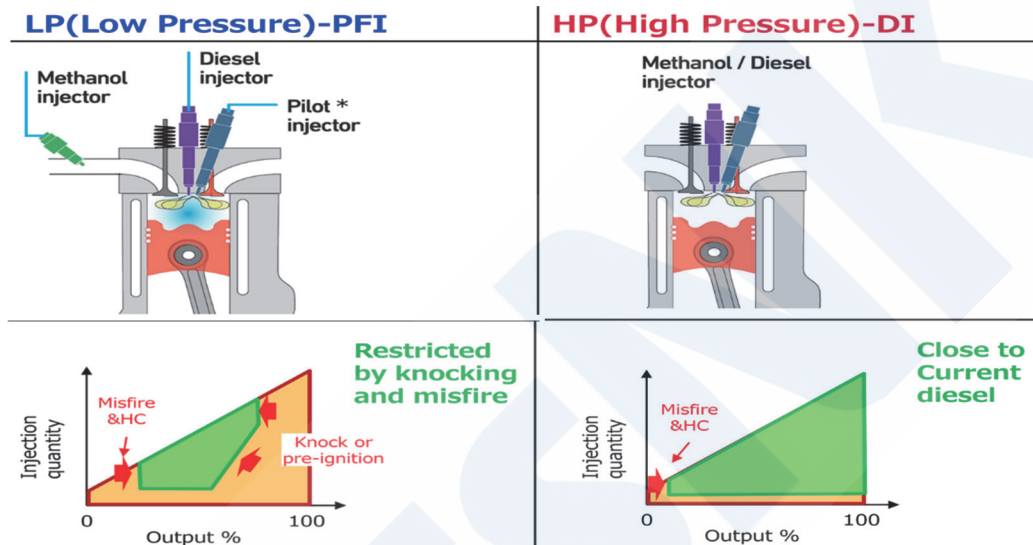


図3 中速4ストローク・メタノールエンジンの燃焼パターン2種類⁷⁾

船内発電機あるいは中小型船舶の主機として、中速4ストロークのメタノールエンジンの開発も行われている。ここでは、図3を使ってディーゼル型のほかオットーサイクル型の燃焼パターンを紹介する。

- ・ディーゼル型の燃焼（図3右：HP(High-Pressure)-DI(Direct Injection)）では、ピストンによって圧縮された高温・高圧の空気中に、さらに高圧の液体メタノールをディーゼル噴射して噴霧燃焼をさせる。これまでの重油（この図ではディーゼル油）の噴射系に加えて大型のメタノール噴射系が必要で、そのシステムが高価になる可能性がある。オットー型に対する長所としては、ディーゼル型では原理的にノッキング等の異常燃焼は起こらないため、高出力・高Pme（Pme：正味平均有効圧力）・高効率を狙うことができる。
- ・オットーサイクル型燃焼（図3左：LP(Low-Pressure)-PFI(Port Fuel Injection)）では、メタノールを吸気管に噴射し、気化したメタノールと空気の混合気を作ってピストンで圧縮した後、パイロット噴射により着火して火炎伝播を実現させる。吸気管に噴射する低圧噴射系は、ディーゼル型の高圧噴射系よりもシンプルでレトロフィットにも適している。ただしノッキング等が起こり得るため、図3の左下に示すようにメタノール混焼率やメタノールによる出力範囲が制限される傾向にある（図中の緑色部がメタノール、茶色部がディーゼル油使用範囲）。

国内のヤンマーパワーテクノロジー株式会社（以下、ヤンマーPT）とダイハツディーゼル株式会社（以下、ダイハツディーゼル）では、テストエンジンを使って両燃焼パターンの比較を行い発表している^{7) 8)}。また両社とも、メタノール燃料に対応したエンジンを2026年に発売する予定と発表している。阪神内燃機工業株式会社では、シリンダ径280mmの低速4ストロークエンジンLA28Mをすでに開発している。こちらはディーゼル型を採用し、またDFでなくメタノール専焼とされている。ただしメタノールを使わない場合でも、パイロット用のA重油を増量して船級が求める船速で航行できる冗長性を確保している⁹⁾。国内では、株式会社赤阪鐵工所も、コモンレール式の電子制御システムを組み込んだディーゼル型の低速4ストロークメタノールDFエンジンを、2026年に開発完了予定である¹⁰⁾。

欧州側におけるMANの4ストロークエンジンの例を挙げると、発電機仕様のL21/31DF-M型（シリンダ径：210mm）とL27/38DF-M型（270mm）はアウトーサイクル型で開発されている。また在来の大型4ストローク機種に対しても、メタノールDFへ改造するレトロフィット・パッケージの提供を始めると発表している¹¹⁾。

またこの分野で先鞭を付けたWärtsilä社では、すでにW32型（シリンダ径：320mm）メタノールエンジンがディーゼル型で開発されリリースされている。さらに、従来燃料の船舶をメタノール燃料に転換する方法についても発表している¹²⁾。

4ストロークのディーゼル型では、燃料噴射ノズルをシリンダヘッドの中央に配置するため、1本のノズルにメタノール用と重油用の複数のニードル弁を仕込むような燃料噴射ノズルも開発されている。

4. アンモニア (NH₃) DFエンジンの開発動向

低速2ストローク・アンモニアエンジン

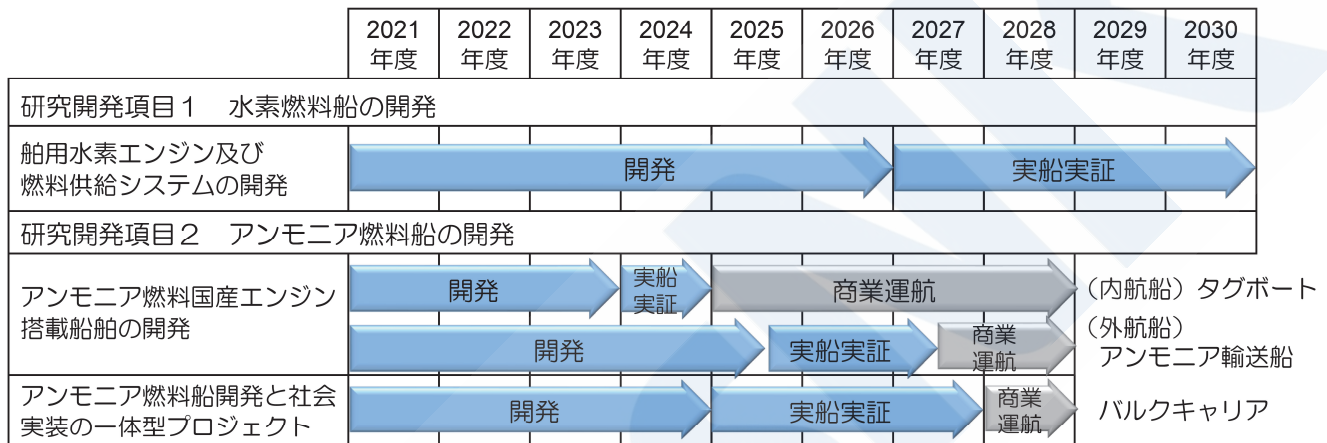


図4 GI基金「次世代船舶の開発」プロジェクト実施スケジュール（一部）¹³⁾

低速2ストローク主機は、MAN, WinGD, 株式会社ジャパンエンジンコーポレーション (J-ENG) (以下、ジャパンエンジン) のライセンサー3社で、ディーゼル噴射タイプの開発が進んでいる。アンモニアの性状として、常圧での沸点は-33℃であるため常温・常圧では気体となる。船内液体貯蔵には半冷加圧式あるいは冷却式タンクが想定され、エンジンに送り込む際は液体をさらに加圧（三井E&Sの発表ではライン圧力は8.3MPa）する⁴⁾。

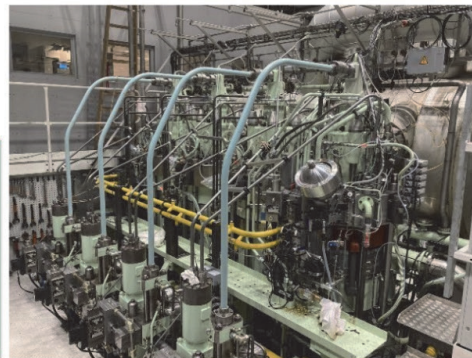
ここで、前述のGI基金・次世代船舶の開発スケジュールについて図4を使って解説する¹³⁾。アンモニア燃料船の開発の項の「アンモニア燃料船開発と社会実装の一体型プロジェクト」で建造予定のバルカーの主機は、MANが開発し三井E&Sで製造される低速2ストロークのアンモニアエンジン7S60-LGIA型（7気筒・シリンダ径：600mm）となる。MANではテストエンジン（図5：シリンダ径：500mm）の1気筒でのテストを終え、さらに全4気筒でアンモニアを燃焼させるテストを開始する予定である。

◆ MAN-ES 1cylinder test

- 1cylinder of the test engine (4T50ME-X) was modified to be ammonia specification.
- Combustion test has started in Jul. 2023

Intermediate results of 1cylinder test

Pilot oil consumption : Similar to other LGI engines
 NOx : Similar or lower than reference diesel operation on MGO
 NH₃ : plan to balance NH₃ to the NOx emissions and remove both by SCR technology
 N₂O : Very low



As of March 2024, 1cylinder test continues

* Quoted from MAN Facebook dated July 6th
 Test engine (4T50ME-X)

図5 MAN社の1気筒アンモニア運転テスト結果⁴⁾

アンモニア燃焼では、これまでCO₂の約300倍の温暖化ガスであるN₂Oの排出が懸念された。現時点（2024年8月）では上記3社とも確定したGHG排出量、環境性能を開示していないが、MANから1気筒テストの定性的データ（図5）が提供されている⁴⁾。これによるとN₂Oの排出はVery lowとなっている。ただし未燃アンモニアの排出が予想より多く、対策としてSCR内でNO_xと反応させて低減する計画とされている。

次に、図4中の「アンモニア燃料国産エンジン搭載船舶の開発」について解説する。日本郵船株式会社・ジャパンエンジン・株式会社IHI原動機（以下、IHI原動機）・日本シッパード株式会社は、国産エンジンを搭載したアンモニア燃料アンモニア輸送船（図6）の建造に関わる一連の契約を締結した（2023年12月）¹⁴⁾。4社はGI基金事業への採択以降にNKとともにコンソーシアムを組んでおり、「アンモニア燃料国産エンジン搭載船舶の開発」に向けて世界をリードする取り組みが本格化する。

背景・目標として以下の項目がある。

- (1) 国際海運ネットゼロエミッション達成への貢献
- (2) アンモニアバリューチェーンの構築
- (3) 日本の海事産業の強化
- (4) アンモニアの船用利用に関わる国際ルール化



図6 アンモニア燃料アンモニア輸送船
AFMGC: Ammonia-Fueled Medium Gas Carrier¹⁴⁾



図7 ジャパンエンジン社の単気筒アンモニアテストエンジン（左）とアンモニア供給設備（右）¹⁵⁾

図7に、ジャパンエンジンでテスト中の単気筒エンジンとそのアンモニア供給設備を示す¹⁵⁾。同社では、低速2ストロークエンジンでは世界初のアンモニア混焼試験運転を実施した。

WinGD社でも、図8に示すテストエンジンを使って低速2ストロークのアンモニアエンジンを開発中で¹⁶⁾、韓国で建造予定のLPG/アンモニア輸送船主機として、シリンダ径520mmの6X52DF-Aエンジンの出荷を2025年2Qに予定している。

それに関連して、三菱造船株式会社がアンモニア燃料供給装置およびアンモニア処理装置を開発しており、2024年4月にNKから基本設計承認（AiP）が発行された¹⁷⁾。



図8 WinGDの低速2ストローク単気筒
テストエンジン（シリンダ径：520mm）
（WinGD社提供）

中速4ストローク・アンモニアエンジン

図9 A-Tug さきがけ（主機出力1618kW x 2台）¹⁹⁾図10 A-Tug用中速4ストローク28ADF型エンジン
（出力：1618kW/台・D/S：280/390mm・6気筒・
回転数：750rpm・Pme：1.8MPa）¹⁸⁾

図4の「アンモニア燃料国産エンジン搭載船舶の開発」中のタグボートについて解説する。IHI原動機では、アンモニア燃料タグボート（図9：A-Tug：魁（さきがけ））の主機向けに開発、陸上試験を進めていた4ストロークアンモニアDFエンジンが完成し、NKは世界初となるアンモニア燃料船用エンジンの船級型式承認を発行した（2024年4月）¹⁸⁾。本エンジンは現在A-Tugに装備され、A-Tugは東京湾での曳船業務に従事して3カ月間の実証航海が行われる予定である¹⁹⁾。

本エンジンの外観を図10に示す。このエンジンはアンモニアのオットーサイクル型であり、同タイプのメタノールエンジンと同様に、アンモニアは吸気管に投入し空気との混合気を作ってピストンで圧縮、上死点付近でパイロット重油により着火する。陸上試験ではアンモニアの混焼割合95%（熱量で5%がパイロット重油）を達成した。懸案のN₂Oについては後処理装置によって低減され、GHG削減率としても重油比較で最大90%以上を達成できている。その他、タグボートに必要な負荷変動への追従性能および、運転中と停止後の実機からのアンモニア漏洩ゼロを確認している。さらに同社は、前述のアンモニア燃料アンモニア輸送船AFMGCの発電機向けエンジン（シリンダ径：250mm）も開発中である。

GI基金のほか、ヤンマーPTとダイハツディーゼルが単気筒エンジンでアンモニア燃焼試験を行っている^{7) 8)}。また、水素を混焼してアンモニアの燃焼を改善する研究も行われている。ただしこれは、船上でアンモニアの一部を水素に改質できる装置との組み合わせが必須になる。

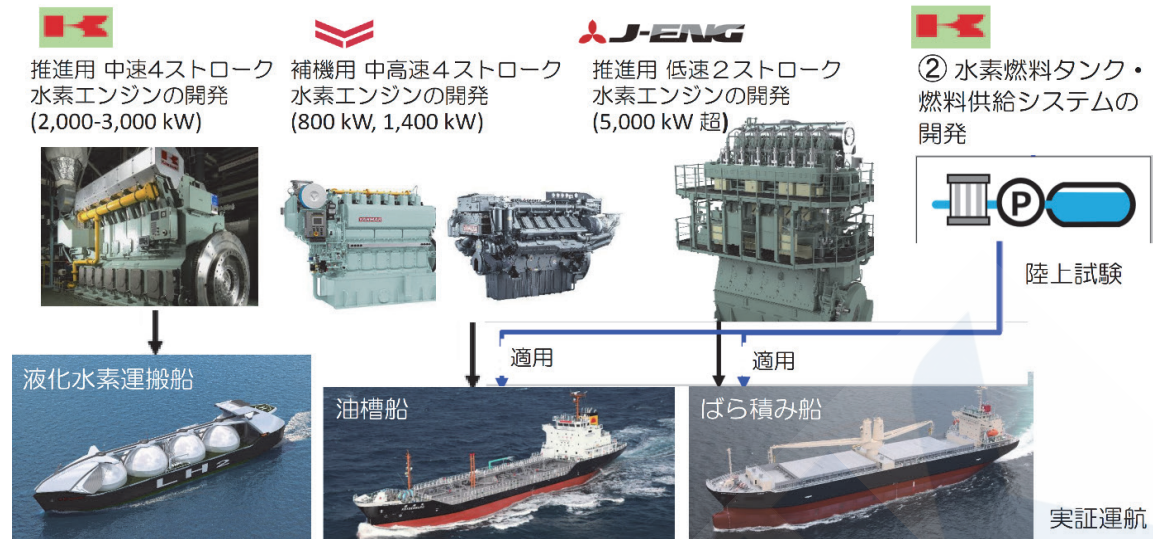
また欧州においても、Wärtsilä社はW25型（シリンダ径：250mm）アンモニアエンジン（オットーサイクル）を開発してリリースを開始した。一例として、PSV（Platform Supply Vessel）改造のために、W25エンジンのほかアンモニア燃料ガス供給から排ガス処理システムまでのパッケージの提供について発表されている²⁰⁾。

5. 水素DFエンジンの開発動向

図4のNEDOによるGI基金事業・次世代船舶の開発スケジュールの中の、研究開発項目1 船用水素エンジン及び燃料供給システムの開発について解説する。

図11は、前報でも紹介した船用水素エンジン及びMHFS（Marine Hydrogen Fuel System）の開発の概要である。川崎重工業株式会社（以下、川崎重工業）の中速4ストローク水素DFエンジン（拡大図12）は、すでに2022年11月にNKから基本設計承認（AiP）が発行されており²¹⁾、推進用主機としての開発を目指して、同社で建造される大型液化水素運搬船の発電機にて長期実証を行う予定である。このプロジェクトの水素4ストロークエンジンでは、水素が吸気管に低圧で供給されて空気との混合気を作るオットーサイクル型が採用されている。川崎重工業のエンジンでは、オットーサイクル特有の異常燃焼の抑制技術として排気再循環を採用し、すでに水素混焼率は95%（熱量5%はパイロット重油）に達している。8気筒の8L30KG-HDFタイプ（シリンダ径：300mm）水素モードでの出力は2.4MWと発表されている²²⁾。

図11中の補機用4ストローク水素エンジンはヤンマーPTによる開発で、単筒機による水素混焼実証を通して、ディーゼルマイクロパイロット着火による水素燃焼方式を確立して目標を達成している。またGI基金のほかに、水素燃料対応のハイブリッド電気推進式内航タンカー向け高速4ストローク水素エンジンも開発中である²³⁾。



事業期間：2021年度～2030年度

出典：川崎重工業，ヤンマーPT，ジャパンエンジン

図11 船用水素エンジン及びMHFS (Marine Hydrogen Fuel System) の開発 (NEDOホームページ)

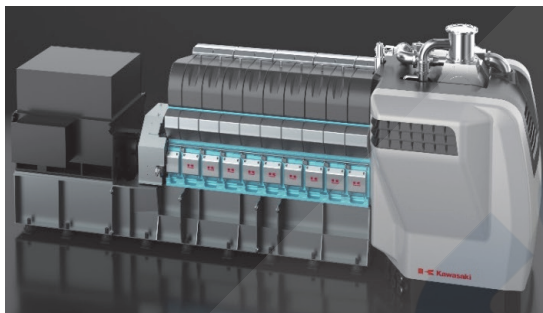


図12 水素焚きDF発電機エンジン
(提供：川崎重工業)²²⁾



図13 水素燃料多目的船 (1万7500重量トン型)
(完成予想図)²⁴⁾

図11右のジャパンエンジンの低速2ストローク水素エンジンの開発に関連したこととして、株式会社商船三井、商船三井ドライバルク株式会社、尾道造船株式会社、川崎重工業、ジャパンエンジン計5社による水素燃料多目的船（図13）の区画配置コンセプトに対し、2023年10月にNKからAiPが発行されている²⁴⁾。このエンジンではディーゼルサイクル型が採用され、水素はピストンで圧縮された空気に高圧（30MPaのオーダー）で噴射される。そのため、液相でポンプ昇圧した水素を高圧下で気化させて、より少ない動力で高圧水素（気体）を得るMHFSを開発（川崎重工業）して本船に搭載する。プロジェクトの中で、現時点ではジャパンエンジンの水素高圧噴射系の単体試験が進んでいるほか、エンジン材料の水素脆化についても研究機関と共同でデータを収集している¹³⁾。

ダイハツディーゼルと三井E&Sは、水素燃料使用の外航船舶の推進システムに必要な技術開発として、国土交通省の「海事産業集約連携促進技術開発支援事業」（2021～2023年度）に参画した。ダイハツディーゼルでは、水素供給設備と単気筒エンジン（オットーサイクル型，シリンダ径：230mm）を使った試験を行った。その結果、96%のGHG低減（ディーゼルとの比較）と天然ガスエンジン相当の高出力運転を達成した²⁵⁾。

三井E&SとライセンサーのMANでは、三井E&Sの低速2ストロークテストエンジン（シリンダ径：500mm，4気筒，出力：7MW/117rpm）の1気筒を改造して水素燃焼のテストを行った²⁶⁾。これは天然ガスエンジンME-GI機関をベースとしたディーゼルサイクル型で、100%負荷運転において当該気筒の95%相当の熱量を水素燃料で賄い（5%はパイロットA重油），A重油で運転する他の3シリンダと同等の安定した燃焼圧力波形が得られること，またエンジンが必要とする高圧水素を水素供給設備から安定供給できることを確認した。

欧州の4ストロークエンジンではWärtsilä社の開発が進んでおり，LNGからクラッキングにより水素を製造する技術にも取り組んでいる。

アントワープ・ブルージュ港では、Anglo Belgian CorporationとCMB.TECH社が開発した中速の水素・軽油DFエンジン（2000kW/台）2基を搭載したタグボートが稼働している。タグボートには液化水素でなく圧縮水素が搭載されている。さらに舶用水素専焼（Mono-fuel）エンジンも開発されている²⁷⁾。日本のジャパンハイドロ株式会社が手掛ける水素燃料船にも上記の会社のエンジンが採用される²⁸⁾。

6. まとめ

昨年の前報では、各代替燃料をエンジンで使用する場合の燃焼上の課題と解決策について述べた。本稿では、船舶用Dual Fuel（二元燃料）エンジンが課題を解決して開発されつつある状況を紹介した。このように、エンジン開発は国内外において技術的には十分勢いがあると言える。最初に述べたように、各代替燃料の生産規模、サプライチェーンの可能性、コストの課題等が残るが、それらが解決した際にすぐに対応できるよう、安全面も含めた技術の完成とそれを生かす人材の育成が望まれる。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ（2024年3月）：船舶におけるバイオ燃料取り扱いガイドラインを策定
- 2) ClassNKガイドライン：バイオ燃料使用に向けたテクニカルガイド（第1.1版）（2024年4月）
- 3) 国土交通省ホームページ（2024年1月）：アンモニアバンカリングガイドライン検討委員会の開催について
- 4) 三井E&S発表資料, 2024.
- 5) MAN Energy Solutions社資料・CIMAC 2023 Paper No.523.
- 6) WinGD社資料・Future Fuel Technology Update, Sept. 2024
- 7) ヤンマーPT発表資料, 2024
- 8) ダイハツディーゼル発表資料, 2024
- 9) 阪神内燃機工業ホームページ：最新ニュース 2024年7月4日
- 10) 赤阪鐵工所ホームページ：ニュースリリース 2024年6月24日
- 11) MAN Energy Solution社ホームページ：26. Jul. 2024.
- 12) Wärtsiläホームページ：Wärtsilä Marine Methanol Conversion.
- 13) NEDOホームページ：次世代船舶の開発 NEDOグリーンイノベーション基金
- 14) NKプレスリリース 2024年1月25日
- 15) ジャパンエンジン発表資料, 2024
- 16) WinGD社ホームページ：Technical Information Note 035
- 17) NKプレスリリース 2024年4月11日
- 18) NKプレスリリース 2024年4月8日
- 19) NKプレスリリース 2024年8月23日
- 20) Wärtsiläホームページ：Wärtsilä 25 Ammonia (wartsila.com) & Press release 26 Aug. 2024.
- 21) NKプレスリリース 2022年11月30日
- 22) 川崎重工業発表資料, 2024
- 23) NKプレスリリース 2024年6月19日
- 24) NKプレスリリース 2023年10月19日
- 25) ダイハツディーゼルホームページ：2024年4月8日
- 26) 三井E&Sホームページ：2024年3月7日
- 27) CIMAC 2023 Paper No.203.
- 28) CMB.TECH | JPNH₂YDRO opens Hydrogen Engine R&D Centre in Japan

船舶サイバーセキュリティ規制の最新動向

― IACS UR E26/E27と本会の取り組み ―

技術本部 機関部, 認証本部 認証・海技部

1. はじめに

近年、船舶のデジタル化が急速に進み、サイバー攻撃のリスクが高まっている。海事業界でのランサムウェアによる被害額の急増や、実際に船舶へのサイバー攻撃が行われたという報告がされている。そのような背景から船舶のサイバーセキュリティが注目され、国際船級協会連合（以下、IACS）はIACS統一規則（以下、UR）E26及びE27を策定し、2024年7月1日建造契約船から適用が開始された。本稿ではUR E26とE27を中心に、船舶のサイバーセキュリティ規制の背景や動向、そして本会の取り組みについて概説する。

1.1 船舶を取り巻くサイバーセキュリティ上の脅威

従来、船舶の航海設備、機関制御装置、貨物監視装置などのシステムは物理的な接続や制御に依存しており、サイバー攻撃等の脅威は想定されていなかった。しかし、運航効率化や安全性強化のためにIoT技術が導入され、近年では米国SpaceX社が提供するStarlinkなどの比較的安価かつ大容量な洋上インターネットサービスも開始されたこと、さらには開発が進められている自動運航技術の採用などから、船用システムがコンピュータやインターネットを介して相互接続されるケースが増加している。これに伴い、船用システムはサイバー空間に晒される機会が増え、サイバー攻撃のリスクが顕在化している。

米国にある海事分野に特化したサイバーセキュリティ情報共有・分析機関であるMTS-ISAC^{*1}の統計によると、2024年6月の海事分野に対するサイバー攻撃のうち、船舶への攻撃は全体の15%を占めている。これは、船舶へのサイバー攻撃が確実に発生しており、その件数が増加傾向にあることを明確に示している。

このような状況から、海事業界ではサイバーセキュリティへの関心が高まっており、船舶に対しても対策が求められている。

具体的なサイバー攻撃手法としては、ランサムウェアによる船舶管理システムの乗っ取り、GPSスプーフィングによる位置情報の偽装、フィッシング詐欺による乗組員の個人情報の窃取などが報告されている。表1に主な攻撃事例を示す。

表1 サイバー攻撃の事例

2017年6月、海運大手Maersk（マースク）社がNotPetyaと呼ばれるランサムウェアによるサイバー攻撃を受け、世界中の事業拠点が影響を受けた。この攻撃により、同社のコンテナ輸送業務が混乱し、数億ドル規模の損失が発生したとされている。
2017年6月、黒海において、少なくとも20隻の船舶のGPS受信機が、実際には海上にいるにも関わらず、約32km内陸の位置を示すという異常が発生した。この現象は、GPSスプーフィング ^{*2} 攻撃によるものと強く疑われている。
2019年5月、米国沿岸警備隊（USCG）が発行したMarine Safety Information Bulletinによると、PSC当局を装ったメールアドレスから船舶へメールを送信し、到着通知に含まれる機密情報を抜き取ろうとする事例が報告されている。
2023年1月、DNV社の提供する船舶管理用ソフトウェアのサーバーがランサムウェア攻撃を受け、オンライン機能へのアクセスが制限された。

^{*1} 海事交通システム情報共有分析センター（Maritime Transportation System Information Sharing and Analysis Center）の略称である。海事分野におけるサイバーセキュリティに関する情報共有や分析を行う組織である。

^{*2} 偽のGPS信号を発信することで、GPS受信機の位置情報を誤認させるサイバー攻撃の一種。船舶の航路を狂わせたり、衝突事故を引き起こしたりする危険性がある。

これまでの報告事例から、船舶のITシステム*3がランサムウェアやマルウェアなどのサイバー攻撃の標的となっていることは明かである。一方、OTシステム*4（船用システム）へのサイバー攻撃の影響については、具体的な被害状況や攻撃手法などの詳細が公開されるケースが少なく、依然として不明な点が多いのが現状である。その原因としては、サイバーセキュリティ対策が不十分な場合、攻撃を受けたこと自体に気付くのが難しいことが挙げられる。また、攻撃の詳細情報を公表すると、企業の評判低下や取引先からの信頼低下につながる可能性や、更なるサイバー攻撃を誘発するなどのリスクがあることも、情報公開をためらわせる背景となっているようである。

1.2 国際的なサイバーセキュリティ対策の動向

船舶のサイバーセキュリティリスクの高まりを受け、国際海事機関（以下、IMO）やIACSは、船舶のサイバーセキュリティ対策の強化に取り組んでいる。

1.2.1 IMOの取り組み

IMOは、船舶のサイバーセキュリティに関する取り組みを段階的に強化している。

- ISPSコード

2004年に採択されたISPSコード（国際船舶・港湾施設保安コード）は、船舶や港湾施設の物理的なセキュリティ対策に重点を置いている。直接的にサイバーセキュリティ対策を求めるものではないが、船舶保安評価（SSA）及び船舶保安計画（SSP）において、コンピュータシステムやネットワークの脆弱性への対処、ならびに電子形式の機密情報の保護に関する手順の確立を求めている。これらは、サイバーセキュリティ対策の基礎となるものである。ISPSコードは、SOLAS条約（海上人命安全条約）の締約国に対して強制力を持つ。

- 決議MSC.428(98)

2017年に採択された決議MSC.428(98)は、船舶の安全管理システム（SMS）にサイバーリスク管理を組み込むことを推奨している。これは、サイバーリスクを船舶の運航における他のリスクと同様に評価し、適切な対策を講じることを求めるものである。この決議は推奨事項だが、多くの旗国が強制化している。

- GUIDELINES ON MARITIME CYBER RISK MANAGEMENT (MSC-FAL.1/Circ.3)

決議MSC.428(98)の実施を支援するため、2017年に承認*5されたガイドラインである。船舶の運航者や船主がサイバーリスク管理を実施する際に役立つ、船会社の役割、活動、対策に関する具体的な推奨事項が記載されている。また、IACS、バルチック国際海運協議会（以下、BIMCO）、米国国立標準技術研究所（以下、NIST）*6などが発行するサイバーセキュリティに関するガイドラインや規格を参照している。このガイドライン自体は強制力を持たないものの、船舶の運航者や船主が効果的なサイバーリスク管理体制を構築・運用するための参考となる。

1.2.2 IACSの取り組み

IACSは、2016年にサイバーシステムパネルを設置し、各船級協会の専門家が集まり、最新のサイバーセキュリティ技術や脅威に関する情報共有、及び統一規則の策定に向けた議論を行ってきた。

- 12のIACS Recommendations（以下、Rec.）

2018年11月までに12のRec.を公表している。これらの勧告は、船舶のサイバーセキュリティ対策に関する具体的な指針を示しており、ソフトウェアの保守手順、機器の手動/機側制御、緊急時対応計画、ネットワーク構造、データの保証、物理的セキュリティ、ネットワークセキュリティ、船舶システムデザイン、インベントリリスト、インテグレーション、遠隔アップデート/アクセス、通信及びインターフェースといった広範な領域をカバーしている。

- Rec. No. 166

UR E26とE27の策定に先立ち、上記の12のRec.を一つに統合する作業を実施し、2020年5月にサイバー

*3 情報技術（Information Technology）システムの略称である。データの収集、処理、保管、伝達などを行うシステムである。船舶では、事務作業用のPCなどが該当する。

*4 運用技術（Operational Technology）システムの略称である。物理的なプロセスや設備の監視、制御を行うシステムである。船舶では、船舶の航海設備、機関制御装置、貨物監視装置などのシステムも該当する。

*5 定期的に更新が行われており、2022年にはMSC-FAL.1/Circ.3/Rev.2が承認されている。

*6 技術、測定、標準に関する研究開発を行う米国政府機関である。サイバーセキュリティ分野でも様々なガイドラインやフレームワークを策定している。

レジリエンスに関する推奨事項としてRec. No. 166を発行した。これは、新造船の建造と運航において推奨されるサイバーセキュリティ対策をまとめたものである。船舶の設計・建造・運航の各段階で考慮すべき事項を包括的に示しており、具体的には、リスク評価に基づいた対策、ネットワークの分離、アクセス制御、システムの更新、乗組員の教育などが含まれる。

・ UR E26とE27

IACSは、それまでの取り組みで得られた成果を基に、2022年4月、サイバーセキュリティに関する要件を定めたUR E26とE27の2つのURを新たに策定した。これらは、サイバー攻撃を受けるという前提に立ち、サイバー攻撃等によるサイバーインシデントの発生を低減し、影響を軽減し、障害等が発生した場合でも早期に復旧する機能（以下、サイバーレジリエンス）に関する要件である。主に、UR E26では船舶全体のサイバーレジリエンスの枠組みを、UR E27では船舶に搭載されるシステム及び機器のセキュリティ要件を規定している。これらのURの目的は、サイバーレジリエンスを最低限確保した船舶を実現することにある。

当初、UR E26及びE27については2024年1月1日から施行される予定であったが、適用対象船舶の限定、検査要件の明確化、そして業界からのフィードバックを踏まえ、IACSはUR E27を2023年9月に、UR E26を同年11月にそれぞれ改訂した。そして、これらの改訂版は、2024年7月1日以降に建造契約を締結する船舶から適用が開始されている。^{*7}

2. UR E26とE27の要件の目的と概要

本章では、UR E26とE27の要件の目的と概要を解説する。なお、要件の詳細については、3章で紹介するガイドラインで解説しているので、そちらを参照してほしい。

2.1 UR E26とE27の関係

UR E26は船舶全体のサイバーレジリエンス確保のための包括的な枠組みを規定し、UR E27はUR E26の適用範囲内の個々のシステム・機器に対する具体的な技術的要求事項を規定している。また、UR E26は関係者の連携と責任分担を明確化し、UR E27は機器供給者の責任においてコンピュータシステムのセキュリティ確保を要求している（図1）。

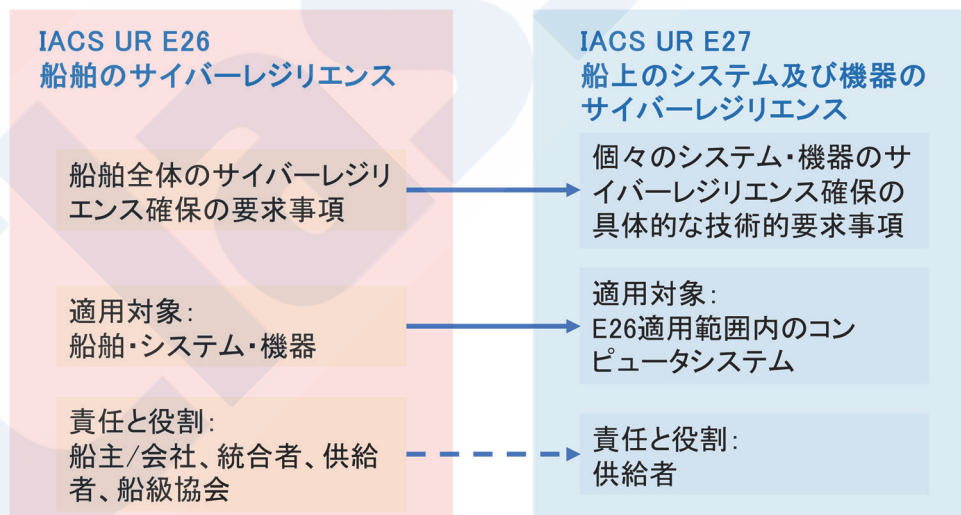


図1 UR E26とE27の関係

2.2 UR E26の要件の目的と概要

UR E26は船舶全体を対象とする規則であり、主に造船所（統合者）と船主が関わる要件を規定している。具体的には、船舶の設計、建造、試運転、運航といった各段階を通じて、運用技術（OT）システムや情報技術（IT）システムを船舶のネットワークに安全に統合することを目的として、「識別」「防御」「検知」「対応」「復旧」といった要件を規定している。

^{*7} 当初のバージョンは適用開始前に取り下げられた。

2.2.1 UR E26の目的とNISTサイバーセキュリティフレームワーク

UR E26の要件は、Rec. No. 166、各船級協会のガイドライン、BIMCOガイドライン、NIST SP 800-53などを参考に、NISTサイバーセキュリティフレームワークの5つの機能要素（図2）で整理・規定している。そして、船舶の特性に合わせて、それぞれの目的を以下のように整理している。

- ・識別（Identify）…船舶のシステムやそこに携わる人、データ、機器などを把握し、サイバーセキュリティ上のリスクを洗い出し、組織として理解を深める。
- ・防御（Protect）…サイバーインシデントから船舶を守るための対策を講じ、万が一攻撃を受けたとしても、船の運航を継続できるようにする。
- ・検知（Detect）…サイバーインシデントの兆候をいち早く捉え、特定するための仕組みを構築する。
- ・対応（Respond）…サイバーインシデントを検知した場合、被害を最小限に抑えるための対応策を実施する。
- ・復旧（Recover）…サイバーインシデントによって船舶の機能が損なわれた場合、速やかに復旧するための手段を確保し、通常運航に戻す。



図2 NISTサイバーセキュリティフレームワークの5つの機能要素

2.2.2 UR E26の適用対象船舶

以下の船舶等に適用される。

- ・国際航海に従事する旅客船（旅客船に該当する高速船を含む）
- ・国際航海に従事する総トン数500トン以上の貨物船
- ・国際航海に従事する総トン数500トン以上の高速船
- ・総トン数500トン以上の海底資源掘削船
- ・建設に従事する自航式海洋構造物

内航船や総トン数500トン未満の貨物船への適用は非強制である。

2.2.3 UR E26の適用対象システム

サイバーインシデントの影響により、人の安全、船舶の安全、または環境に危険を及ぼしうる、以下の機能を持つ船上のOTシステムに適用される。

- 推進
- 操舵
- 投錨及び係留
- 発電及び分電
- 火災探知及び消火システム
- ビルジ及びバラストシステム、積付計算機
- 水密性及び浸水検知
- 照明（例えば、非常灯、低位置照明、航海灯等）
- 要求される安全システムであって、当該システムの途絶又は機能障害が船舶の運用にリスクをもたらすもの（例えば、緊急停止システム、荷役安全システム、圧力容器の安全システム、ガス検知システム等）
- 条約により要求される航海設備
- 船級規則又は条約により要求される船内及び船外通信システム

また、UR E26では、これらのOTシステムと接続するすべてのIPベースの通信インターフェースも適用範囲に含まれると規定しており、上記OTシステム以外のシステムや機器についても適用対象となる場合がある。

2.2.4 UR E26のリスク評価と適用除外

UR E26では、統合者が、システムが4つの基準を満たし、かつ3つの追加基準を考慮した上で、当該システムをUR E26の要求事項の適用から除外することが適切であると船級協会に説明し、船級協会がそれを承認した場合、そのシステムをUR E26の適用対象から除外できると規定している。

2.3 UR E27の要件の概要と目的

UR E27はシステム及び機器を対象とした規則であり、主に船用機器メーカー（機器供給者）に関わる要件を規定している。具体的には、機器供給者がサイバーレジリエンスの高い機器を開発・製造し、船舶に搭載できるように、システム及び機器のサイバーレジリエンスの要件、船上のユーザーとコンピュータシステムとのインターフェース、そして新規製品の製品開発要件などを規定している。

2.3.1 UR E27の適用対象

UR E27では、UR E26に規定される適用対象船舶において、UR E26に規定されるコンピュータシステムに適用されることが規定されている。

2.3.2 UR E27のセキュリティ機能の要件

UR E27では、システムに実装すべきセキュリティ機能に関する要件を具体的に規定している。それらの要件は、産業用オートメーション及び制御システムのセキュリティに関する国際規格であるIEC 62443-3-3をベースとしており、その一部が採用されている。具体的には、30の「要求されるセキュリティ機能」と、信頼できないネットワークと接続されたコンピュータシステムに要求される11の「追加で要求されるセキュリティ機能」が規定されている。これらのセキュリティ機能は、コンピュータシステムが備えるべき具体的な対策技術であり、例えば、「認証」「アクセス制御」「暗号化」「マルウェア対策」などが挙げられる。これらの要件を満たすことで、サイバー攻撃によるリスクを低減し、システムの安全性を確保することができる。

2.3.3 UR E27のセキュア開発ライフサイクル（SDLC）要件

セキュアな製品の開発及び保守を目的としたライフサイクルに関する要件を規定し、システムや機器の開発において、セキュリティを考慮した開発プロセスを導入することを求めている。具体的には、「秘密鍵の管理」「セキュリティアップデートの文書」「依存コンポーネント又はオペレーティングシステムのセキュリティアップデート文書」「セキュリティアップデートの配信」「製品の多層防御」「環境において期待される多層防御策」「セキュリティ強化指針」といった7の要件が規定されている。これにより、開発段階からセキュリティ上の脆弱性を排除し、より安全なシステムを構築することができる。

3. UR E26とE27に関する本会の取り組みとサポート

サイバーセキュリティ対策が新造船の強制要件として取り入れられることは、UR E26とE27の要件が初めてであり、影響も大きいことから、本会は迅速な規則化や情報発信に努めてきた。要件への対応が必要となる船用機器メーカー、造船所、船主向けにURの要件を解説するNK独自のガイドライン発行、要件への適合のための具体例を挙げたインタラクティブなワークショップの開催、解説動画などの情報提供をしている。

3.1 本会規則へのUR E26とE27の取り入れ

本会では、UR E26及びE27の発行を受けて、これらの要件を本会規則に取り入れた。2つのURを鋼船規則X編並びにB編及び船用材料・機器等の承認及び認定要領に取り入れるために、有識者からなる専門委員会（2023年12月）、技術委員会（2024年1月）の審議を経て、2024年6月27日に改正版を発行した。

図3は、2つのURの要件を主に規定している鋼船規則X編の構成である。

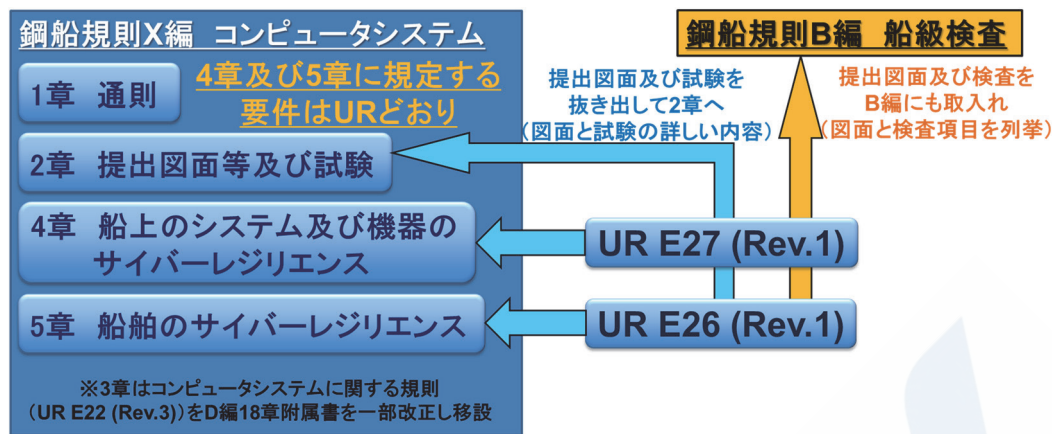


図3 UR E26とE27の本会規則への取り入れ（鋼船規則X編の構成）

船用材料・機器等の承認及び認定要領では、第7編10章にサイバーレジリエンスに関する対策が講じられる機器等の使用承認^{*8}のための規定を新設した。これにより、船用機器メーカーが、船舶への搭載準備をする前に、サイバーセキュリティ要件を満たした機器等が規定に適合していることを証明する使用承認証書を事前に取得できるようにしている。

3.2 UR E26とE27の要件を解説するガイドライン

まずは、サイバーセキュリティ要件を満たした機器等がマーケットに出揃うことが必要と考え、機器等の要件を規定するUR E27を解説するNK独自のガイドライン「船上のシステム及び機器のサイバーレジリエンスに関するガイドライン」を2023年11月に発行した。

さらに、2024年7月にはUR E26の要件を解説するNK独自のガイドライン「船舶のサイバーレジリエンスに関するガイドライン」を発行した。図4は各ガイドラインとその構成である。

船上のシステム及び機器のサイバーレジリエンスに関するガイドライン 鋼船規則X編4章 (IACS UR E27)

- ・適用対象の例示
- ・承認プロセスの解説
- ・提出資料の解説
- ・立会検査の解説
- ・セキュリティ要件の解説
- ・セキュア開発ライフサイクルに関する要件の解説



船舶のサイバーレジリエンスに関するガイドライン 鋼船規則X編5章 (IACS UR E26)

- ・適用対象の例示
- ・ネットワーク構成の例示
- ・各要件の解説
- ・提出資料の解説
- ・立会検査の解説



図4 UR E26とE27の要件を解説するガイドラインとその構成

特に2つのNK独自のガイドラインについては、URには記載のない例示を多くすることで解説本としての「分かりやすさ」を目指した。例えば、サイバーセキュリティの要件が適用になる機器は機関制御装置、操舵システム制御装置、固定式炭酸ガス消火装置、航海用レーダー、などと具体的に例示している。図5に例示の一部を示す。

^{*8} 船舶への搭載準備をする前に、その使用に関してあらかじめ本会の承認を得ることが規則等で定められている船用機器等について、あらかじめ代表的な個品に対して承認要領に規定された審査、試験及び検査を行い、当該機器が当該規定に適合していることを承認する。



推進

機関制御装置

主ボイラ制御装置

電気推進制御装置

機関警報監視装置（データロガー含む）

機関遠隔制御装置

CPP 制御装置

燃料供給システム制御装置

（例: FGSS 制御装置）

ウォータジェット推進制御装置



発電及び分電

発電機制御装置（パワーマネージメントを含む）

バッテリーマネージメントシステム（リチウムイオン電

池により構成される総容量 20kWh 以上のもの）

電力変換装置（電気推進船等）

図5 ガイドラインにおける適用対象システムの例示

3.3 ポータルページ

本会ホームページでは、解説動画やFAQ（適宜アップデート）を提供している。これらはすべてホームページ上のUR E26/E27に関する情報や資料を集約したポータルページで閲覧することが可能となっている。
(<https://www.classnk.or.jp/hp/ja/activities/cybersecurity/ur-e26e27.html>)

ポータルページでは以下の情報や資料を提供しており、随時更新中である。

- ・関連規則
- ・使用承認申請書
- ・ガイドライン
- ・FAQ
- ・解説動画

3.4 ClassNKアカデミー

より専門的に理解を深めたいというご希望のある方々を対象に、ClassNKアカデミーに船用機器の開発者及び設計者を対象とした船上のシステム及び機器のサイバーレジリエンスのコースも新設した。本コースでは、UR E27のベースになっている産業機器のサイバーセキュリティに関する国際規格IEC62443の認証業務に従事されている、技術研究組合制御システムセキュリティセンター（CSSC）より講師を招き、同IEC規格の基本的な考え方から、UR E27で要求されているセキュリティ機能及びセキュア製品開発ライフサイクルについて解説いただいている。

4. まとめと今後の展望

本稿では、船舶のサイバーセキュリティ規制UR E26/E27と本会の取り組みを紹介した。船舶を取り巻くサイバーセキュリティ環境は日々変化しており、特に自動運航船のような新技術導入は更なる対策を必要とすることが予想される。

今後の船舶運航はデジタル化・自律化が加速し、サイバー空間の活用が進むだろう。URやIMOガイドラインへの対応に加え、自動化・自律化への対応、脅威情報の収集と共有、セキュリティ人材育成、新技術活用など多角的なセキュリティ強化が必須である。

本会は、安全かつ持続可能な海運の実現を使命とし、船舶のサイバーレジリエンス向上もその重要な要素として捉え、関係者と連携して取り組みを進める所存である。

参考文献

- 1) 中山 公平. 船舶におけるサイバーセキュリティ対策の構築に向けた現況. 日本マリンエンジニアリング学会誌. 2020;55(5):553-556.
- 2) The Maritime Executive. Mass GPS Spoofing Attack in Black Sea?, Jul 11, 2017, <https://maritime-executive.com/editorials/mass-gps-spoofing-attack-in-black-sea>.
- 3) "Maersk Line: Surviving from a Cyber Attack." Safety4Sea, 8 July 2017, <https://safety4sea.com/cm-maersk-line-surviving-from-a-cyber-attack/>.
- 4) National Institute of Standards and Technology. Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity Version 1.1, <https://www.nist.gov/cyberframework>.
- 5) Marine Safety Information Bulletin (No.04-19) (May 24, 2019) USCG
- 6) DNV AS. Cyber-attack on ShipManager servers – update. Published: 23 January 2023. Retrieved from <https://www.dnv.com/news/cyber-attack-on-shipmanager-servers-update-237931/>.
- 7) IMO. (2022). Guidelines on Maritime Cyber Risk Management (MSC-FAL.1/Circ.3/Rev.2).
- 8) IACS. IACS Recommendations, No. 166 (Apr. 2020) "Recommendation on Cyber Resilience"
- 9) IACS. IACS Unified Requirements, E26 (Rev.1) (November 2023) Cyber resilience of ships.
- 10) IACS. IACS Unified Requirements, E27 (Rev.1) (September 2023) Cyber resilience of on-board systems and equipment.
- 11) IACS. IACS adopts new requirements on cyber safety, <https://iacs.org.uk/news/iacs-adopts-new-requirements-on-cyber-safety/>
- 12) IACS. IACS UR E26 and E27 Press Release, <https://iacs.org.uk/news/iacs-ur-e26-and-e27-press-release>
- 13) 船舶におけるサイバーセキュリティデザインガイドライン (2019年2月) 日本海事協会
- 14) 船舶におけるサイバーセキュリティマネジメントシステム (2019年3月) 日本海事協会
- 15) ソフトウェアセキュリティガイドライン (2019年5月) 日本海事協会
- 16) 船舶におけるサイバーセキュリティデザインガイドライン (第2版) (2020年7月) 日本海事協会
- 17) 船上のシステム及び機器のサイバーレジリエンスに関するガイドライン (第1.0版) (2023年11月) 日本海事協会
- 18) 船舶のサイバーレジリエンスに関するガイドライン (第1.0版) (2024年7月) 日本海事協会

CFDによる波浪中垂直曲げモーメントの非線形性の検討

杉本 圭*, 吉田 優希**

1. 諸言

船体構造の設計において、波浪中の垂直曲げモーメントは重要なファクターの一つであり、当該モーメントを適切に考慮することが肝要である。船級規則においては、IACSの統一規則（UR S11及びUR S11A）及び共通構造規則（CSR）において、波浪中の垂直曲げモーメントが規定されており、船舶の設計寿命において生じる当該モーメントの最大値（ホギング最大）及び最小値（サギング最大）が定式化されている^{1) 2) 3)}。当該式においては、線形理論に基づき得られる最大期待値（例えば、超過確率 10^{-8} の値）のほか、操船による影響のほか大波高において生じる非線形影響が陽または陰に考慮されている。このうち、非線形影響について焦点を当てると、開発時期が近年であるUR S11Aの場合、非線形影響が陽に定式化されているものの、コンテナ運搬船に限定された規則であるという特徴を有し、当該規則より以前に開発されたUR S11においては当該影響が明示されていないことが確認できる。

非線形影響に関して様々な研究成果が報告されているが、当該影響につきいくつものレベルに分類すると、Computational Fluid Dynamics (CFD)は"Fully Nonlinear"の計算手法に位置付けられ^{4) 5)}、特にスラミング衝撃力や青波荷重を考慮した検討や構造連成解析によるホイッピング弾性振動評価においてその有効性が報告されている^{6) 7) 8)}。しかし、 10^{-8} 最大期待値を推定する場合、当該期待値が最悪短期海象中の 10^{-3} 最大期待値と概ね等しい⁹⁾と仮定した場合でも1000波相当の計算を行う必要があり、計算時間の観点から、特に多種多様な船舶の非線形影響を実用的な時間で検討する用途への適用は難しい。

実用面を考慮し計算コストを削減する方法として、応答に最も寄与する波のプロファイルを推定する手法が幾つか提案されており、そのうちのひとつとして設計不規則波法がいくつか提案されている^{10) 11) 12) 13)}。DietzはMost likely Response waves (MLRW)を提案し、コンテナ船の波浪中垂直曲げモーメントの最大期待値の推定に関して、超過確率に対応する直接時系列計算の結果とMLRWを用いた計算の結果が良好に一致することを示した¹²⁾。

そこで、本研究では、最新の解析技術であるCFDを用いて、また、設計不規則波MLRWによる波条件を与えることで、船体構造設計で考慮する極限海象において生じ得る波浪中の垂直曲げモーメントの非線形性につき、計55隻の船舶を対象として試算を行い、傾向等につき考察した。

2. IACS統一規則

2.1 IACS UR S11

IACS UR S11 (rev. 10, 2020)及びIACS CSR B&T (2023)では、波浪中の垂直曲げモーメント（ホギング M_{WV-Hog} 及びサギング M_{WV-Sag} ）は次式により規定される^{1) 2)}。

$$\begin{aligned} M_{WV-Hog} &= +190MCL^2BC_b \times 10^{-3} \text{ (kN} \cdot \text{m)} \\ M_{WV-Sag} &= -110MCL^2B(C_b + 0.7) \times 10^{-3} \text{ (kN} \cdot \text{m)} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 L は船の長さ、 B は船幅、 C_b は方形係数である。また、 C は船の長さに応じて定まる係数で、 M は船長方向の分布を表す係数となり、船体中央近傍では1.0である。

ホギング及びサギング間で式が異なるのは、サギングモーメントの非線形性を考慮している為である。従っ

* 開発本部 技術研究所

** 開発本部 開発部

*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38号 503-511頁の転載であり、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。著作権は公益社団法人日本船舶海洋工学会にある。

て、ホギングを仮に線形相当とすると、サギングモーメントには $110(C_b + 0.7)/(190C_b)$ の非線形影響が生じることを意味する。

2.2 IACS UR S11A

次に、IACS UR S11A (2015)に規定する当該モーメントのうち、船体中央断面については次式による³⁾。

$$\begin{aligned} M_{WV-Hog} &= +1.5f_R L^3 C C_w \left(\frac{B}{L}\right)^{0.8} f_{NL-Hog} \quad (kN \cdot m) \\ M_{WV-Sag} &= -1.5f_R L^3 C C_w \left(\frac{B}{L}\right)^{0.8} f_{NL-Sag} \quad (kN \cdot m) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} f_{NL-Hog} &= 0.3 \frac{C_b}{C_w} \sqrt{T} \\ f_{NL-Sag} &= 4.5 \frac{1+0.2f_{Bow}}{C_w \sqrt{C_b L^{0.3}}} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 C_w は水線面積係数、 f_R はoperational profileを考慮した係数で0.85としている。また、 f_{NL-Hog} 及び f_{NL-Sag} はホギング及びサギングモーメントに対する非線形影響を考慮した係数で C_b 、 C_w 、 T （喫水）等に依存するほか、サギングの場合は、船首部における受圧面積の差異による影響を考慮できるようバウフレア形状を加味した係数（ f_{Bow} ）を含む定式化がなされている。なお、 f_R 及び $f_{NL-Hog/Sag}$ を除いた式は、 10^{-8} の値に相当する。

上記に加え、船長方向分布についても規定されており、船体中央付近では式(2)に1.0を乗じた値を考慮するが、その範囲はホギングとサギングで異なるという特徴を有する。

3. 計算対象船

計算対象船は、計55隻で、ばら積貨物船、油タンカー、コンテナ運搬船を含む様々な船種を用いた。それぞれにつき、Full load condition及びBallast conditionについてモデル化（i.e. 計110モデル）を行った。図1に当該対象船の主要目を示す。同図における赤色のプロットはCSR適用船、青はコンテナ運搬船、残りはそれ以外の船舶で、_slenderは $C_b < 0.7$ 、_bluntは $C_b \geq 0.7$ を意味する。なお、同図に示す C_b 、 C_w 、 T 等のパラメータは、2章で示した規則で定義される値（構造喫水ベースの値）ではなく、計算モデル上の値としており、以降において、Full load conditionとBallast conditionで C_b 、 C_w 、 T は異なるものとする。

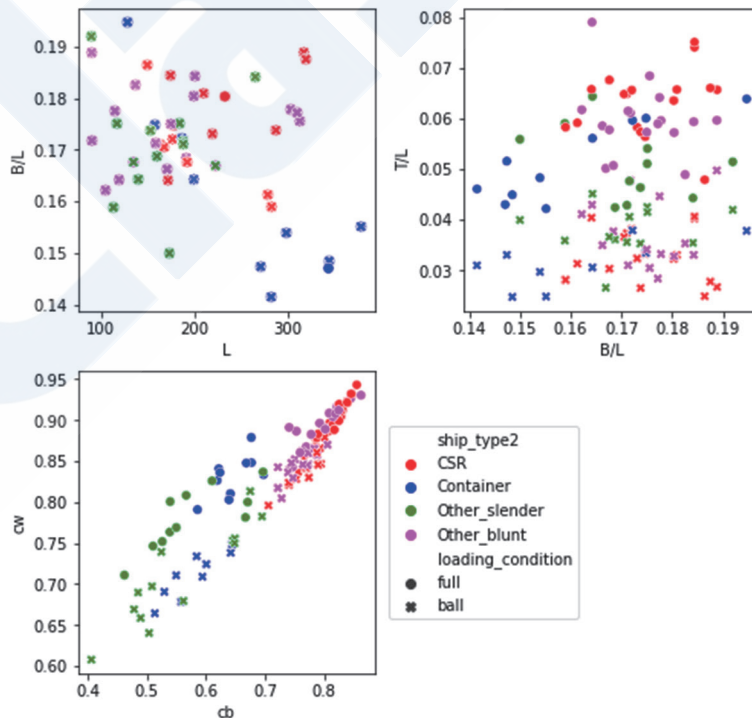


図1 Principle Particular of Target Ships (Circles: Full load condition, Crosses: Ballast condition)

4. 設計不規則波及びCFDによる数値計算

4.1 解析プログラム

後述する海象条件の同定及び設計不規則波の作成にあたって必要なデータセット（Response Amplitude Operator (RAO), 位相差）を構築するために、本会で開発した3次元グリーン関数法による線形荷重解析プログラム（3-DPM.L）¹⁴⁾を用いた。また、作成した設計不規則波MLRW中において、非線形影響を含む垂直曲げモーメントを再現するにあたり、商用のCFDプログラムであるSimcenter STAR-CCM+ 2210¹⁵⁾を用いた。

4.2 フロー

大波高における垂直曲げモーメントを計算するにあたり、図2に示すフローに従った。本研究では、2章で述べたIACS URで考慮している短期海象相当において生じる垂直曲げモーメントの再現に焦点を当てた。

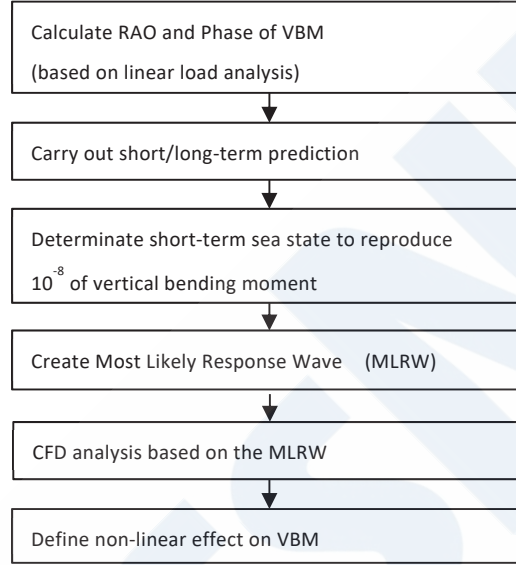


図2 Flowchart to reproduce vertical wave bending moment in extreme seas and define non-linear effect on the moment

4.3 考慮する海象条件等

海象条件として、IACS Recommendation No. 34 (2022)に規定する北大西洋の波スペクトル及びScatter diagramを用いた^{16) 17)}。当該情報及び3-DPM.Lより求めた計算対象船の垂直曲げモーメントのRAOに基づき、それぞれにつき統計予測を行い 10^{-8} の値を求め、後述の設計不規則波におけるターゲット値と定めた。

また、RAOの計算にあたっては、船速を5 knotとした。

4.4 設計不規則波

3-DPM.Lによる解析から得た垂直曲げモーメントのRAO及び位相差のデータセットから、式(4)及び式(5)に従い、波 $\zeta(t)$ と垂直曲げモーメント $\eta(t)$ を対応付ける。

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^N a_{\zeta,n}^e [V_n \cos(-\omega_{e,n}t) + W_n \sin(-\omega_{e,n}t)] \quad (4)$$

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N a_{\eta,n}^e [V_n \cos(-\omega_{e,n}t + \theta_{\eta,n}^e) + W_n \sin(-\omega_{e,n}t + \theta_{\eta,n}^e)] \quad (5)$$

ここで、 $a_{\zeta,n}^e$ は波の振幅、 $a_{\eta,n}^e$ は応答の振幅、 $\omega_{e,n}$ は周波数、 $\theta_{\eta,n}^e$ は応答の位相差であり、 V_n 及び W_n は標準正規分布に従う乱数である。添字の e は波と船の出会い状態を表す。波と応答の振幅はそれぞれのスペクトル $S(\omega_{e,n})$

を用いて $\sqrt{2S(\omega_{e,n})\Delta\omega_{e,n}}$ ($\Delta\omega_{e,n} : \omega_{e,n}$ の差分) で表される。

次に、式(6)に示す条件（時刻 $t = 0$ で応答の大きさが a_{η} 、応答が極大または極小、応答の瞬間的な周波数が ω_{η} ）を満足する応答を生じさせる波Conditional Random Response Wave (CRRW)の集合を求め、MLRWを当該集合の平均で特徴づける。

$$\zeta(t) |_{a_\eta, \omega_\eta} \equiv \hat{E} \left[\zeta(t) \mid \eta(0) = a_\eta, \dot{\eta}(0) = 0, \frac{\dot{\eta}(0)}{\eta(0)} = \omega_\eta \right] \quad (6)$$

ここで、 a_η はターゲットとする垂直曲げモーメントの大きさ、 ω_η は当該モーメントの瞬間的な周波数、 $\hat{E}[\cdot|\cdot]$ は条件付き平均値、 $\dot{\eta}(t)$ は応答の時間微分、 $\hat{\eta}(t)$ は応答のHilbert変換を意味する。 a_η は船体中央断面の値とした。 ω_η は m_1/m_0 (m_n : 応答スペクトルの n 次のモーメント) で与えた。これは m_n が波スペクトルのモーメントである場合、平均波角周波数($2\pi/T_{m01}$)に相当する量である¹⁸⁾。このように ω_η を与えた場合のCRRW及びMLRWの解析的な表現が知られている^{12) 19) 20)}。全ての対象船において、MLRWの波向きは向波(180度)に固定した。

例として、図3に $L = \text{abt. 290m}$ のばら積貨物船(以降、BC-10)(Full load condition)のホギングモーメントを対象に、対応づけた波 $\zeta(t)$ (同図上)と垂直曲げモーメント $\eta(t)$ (同図下)を示す。同図の上において、灰色線はCRRW25波を表し、緑線はその内の1波を表す。赤線は25波の平均である。同図ではCRRWの数を制限したため赤線(CRRWの平均)と青線(MLRW)が乖離しているが、波の数を十分に増やすと赤線は青線に収束する。

得られるMLRWは $t = 0$ で船体中央に波高のピークが存在するものである。そのため、MLRWの波スペクトルの素成波の各位相につき、出会い波数を用いて調整し、CFDの計算が平水状態から開始されるようにした。また、ホギング及びサギングモーメントが最大となるMLRWは波高の正負を入れ替えたものとなり、CFDではそれぞれのMLRWに対する2通りの計算を行った。

4.5 CFDにおける設定

流体は非圧縮性とし、流れの支配方程式Reynolds-averaged Navier-Stokes equation (RANS)を有限体積法により離散化した。移流項は二次精度風上差分スキームで離散化し、時間発展には後退差分スキームを使用した。離散化方程式の解法にはSemi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation (SIMPLE)アルゴリズムを用いた。

空気と海水の気液二相を考慮し、気液の界面はVolume of Fluid (VOF)法をベースとしたHigh Resolution Interface Capture (HRIC)²¹⁾を用いて求めた。

船体は剛体とし、重心における並進及び回転に関する運動方程式を解くことで船体運動量を求めた。運動自由度はheave及びpitch運動のみを考慮し、それ以外は固定した。船体運動に伴う船体周辺の流体領域の節点移動はモーフィングを用いて行い、節点の移動量はRadial basis functions (RBF)を基に決定した。

流入条件としてMLRWを与えた。計算領域の境界における波の反射影響を防ぐためにEuler overlay method (EOM)²²⁾を用いた。

多種多様な船型に対する計算を統一的行うため、計算領域の大きさ、メッシュサイズ、タイムステップ等は船の主要目(L, B, T, D (型深さ))や海象条件(H_s (有義波高), T_z (ゼロアップクロス波周期))でパラメータ付けた。

現象の対称性を仮定して、船の半幅側のみをモデル化した。総セル数は100~120万程度とした。計算は平水状態から開始し、MLRWの波高のピークが船体を通り過ぎるまでの実時間50~70秒程度行った。

当該設定は筆者らの一人が行った研究⁸⁾に基づいており、解析結果の妥当性は確認されている。

図4にBC-10 (Full load condition)のホギングモーメントの計算について、初期時刻における波高分布を船のデッキ方向から見た様子を示す。赤は波の山、青は波の谷、緑は平水であることを表す。中央の白色領域は船を表す。なお、同図は両舷対称表示したものであり、上述の通り、計算は半幅側のみに対して行った。

同様に、図5に、初期時刻におけるVolume of Fluid (VOF)値の分布を、船首近傍のセンターライン断面に関して船幅方向から見た様子をメッシュ図と共に示す。水色が海水、白色は空気を表す。

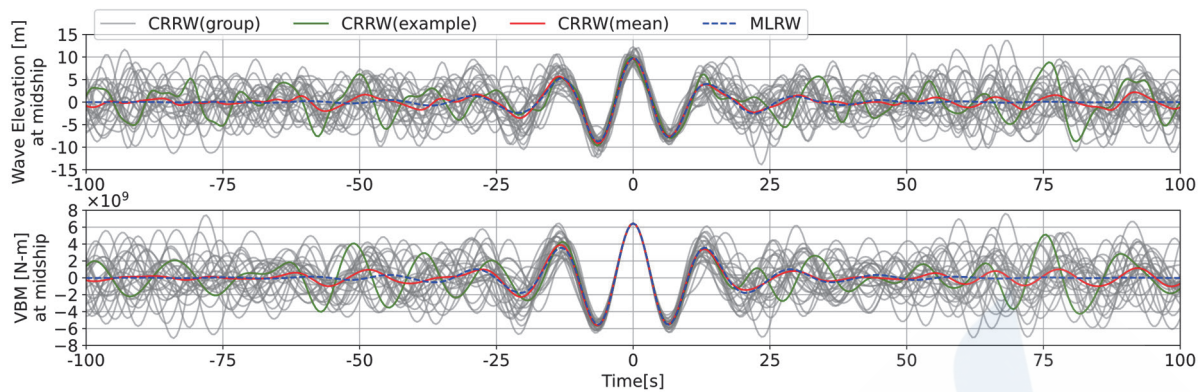


図3 An Example of wave elevation and vertical bending moment in CRRW and MLRW (Bulk carrier, BC-10, Full load condition)

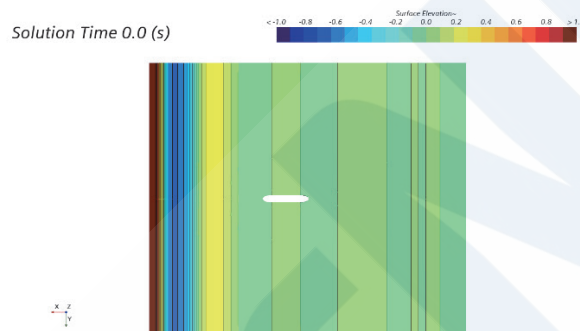


図4 Wave height distribution of BC-10 at initial condition (top view)

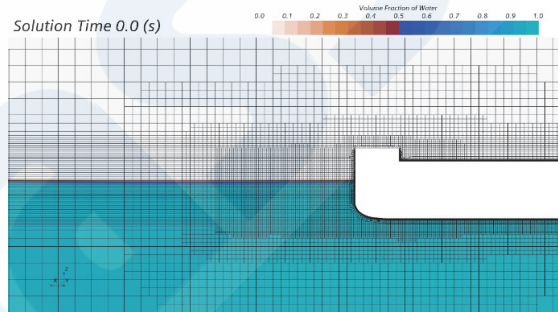


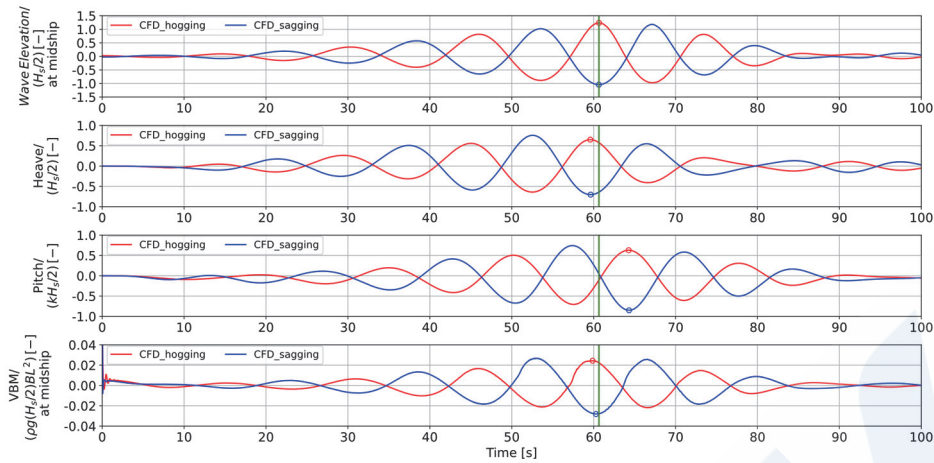
図5 VOF distribution of BC-10 with mesh diagram at initial condition (side view, near the bow)

5. 計算結果

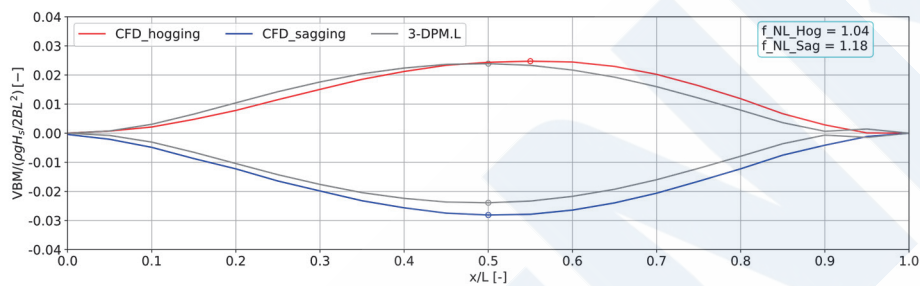
5.1 垂直曲げモーメントの時系列、分布等

CFDによる解析結果の一例として、BC-10を対象に、図6にFull load conditionにおける結果を、図7にBallast conditionにおける結果を示す。それぞれの図の(a)において、上から順に、船体中央における波高、heave運動、pitch運動、船体中央断面における垂直曲げモーメントの時系列を示す。赤色の線がホギングモーメントをターゲットとした場合で、青色の線がサギングモーメントをターゲットにした場合の解析結果を意味する。この例においては、 $t = 60$ (s)近傍において、最大または最小の垂直曲げモーメントが生じており、それぞれの時系列において、最大値（または最小値）を示した時刻を丸で囲っている。

また、同図(b)では、垂直曲げモーメントの船長方向分布をそれぞれ示している。ここで、各断面におけるモーメントの値はそれぞれの時系列における最大値（または最小値）である。また、同図中における灰色の線は、線形理論で得られる垂直曲げモーメントの分布を意味しており、これらの差が大波高中において垂直曲げモーメントに生じる非線形影響とみなすことができる。

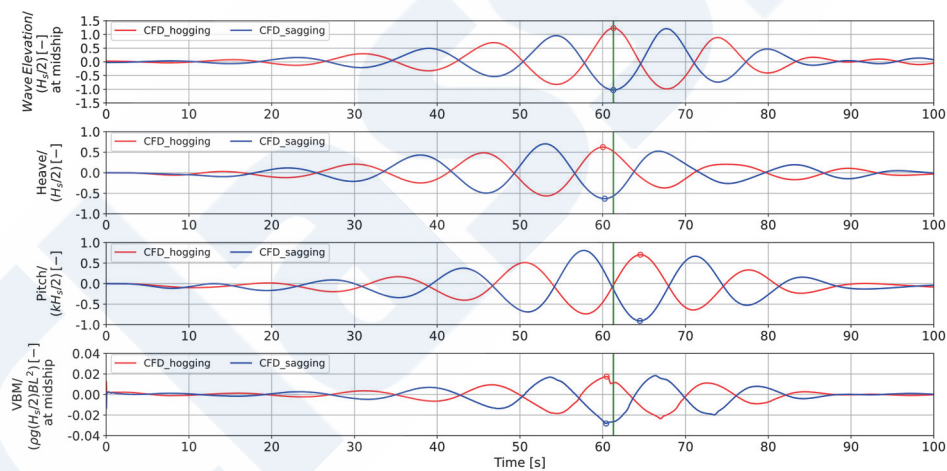


(a) CFD+MLRW, Time history of wave elevation, heave, pitch and vertical bending moment

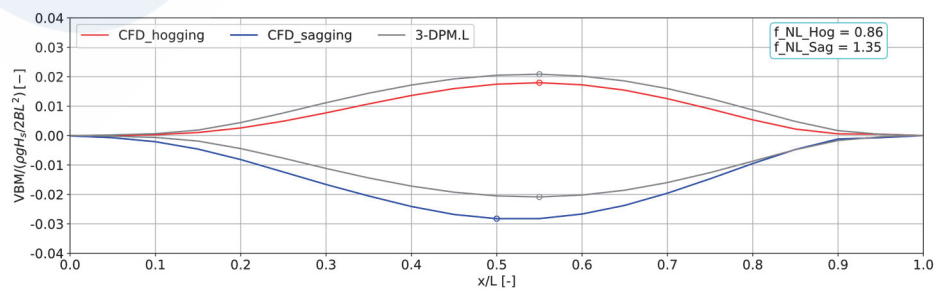


(b) CFD+MLRW, Vertical bending moment distribution along the ship length

図6 An Example of CFD analysis result (Bulk carrier, BC-10, Full load condition)



(a) CFD+MLRW, Time history of wave elevation, heave, pitch and vertical bending moment



(b) CFD+MLRW, Vertical bending moment distribution along the ship length

図7 An Example of CFD analysis result (Bulk carrier, BC-10, Ballast condition)

55隻（110モデル）のシリーズ計算結果を横並びでみたところ、同様のスペックを有する対象船であっても、サギングモーメントの傾向が著しく異なるケースが見られた。分析した結果、青波荷重による影響が疑われたことから、BC-10 (Full load condition)をベースに、図8に示す3種類のforecastleの形状を用いた感度解析を行い、垂直曲げモーメントの変化を観察した。その結果を図9に示す。また、図10に、当該解析結果における青波の状態を可視化したものを示す。

同図の灰色の線は、決定した短期海象中における、線形理論に基づく垂直曲げモーメントの値と超過確率の関係を意味する。また、赤、青、緑のプロットは、CFD及びMLRWにより得た垂直曲げモーメントの値を意味し、図8の色と対応している。このことから、青波が強く作用するモデルである程、サギングモーメントを抑制することが分かり、また、ホギングに対しては（forecastle部は暴露状態に必ず青波が作用しない為、自明ではあるが）影響を与えないことも確認できた。

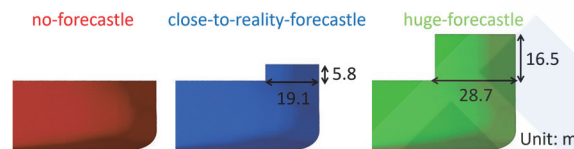


図8 Side view with assumed forecastle shape model based on BC-10

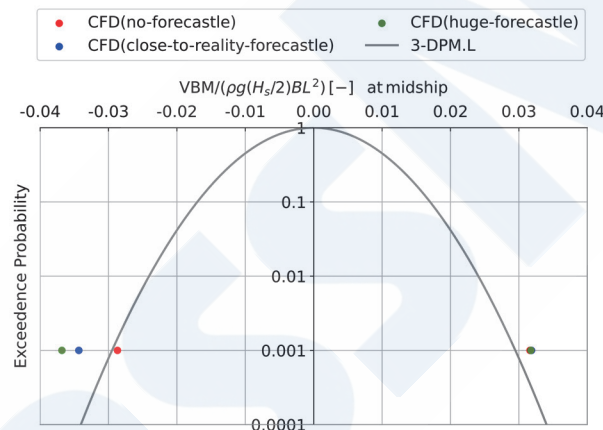


図9 The Effect of with/without forecastle on vertical wave bending moment at midship
(Bulk carrier, BC-10, Full load condition)

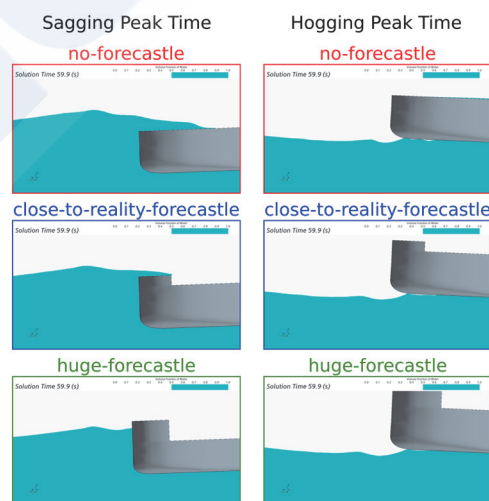


図10 Comparison of green water on deck at the time of maximum hogging and minimum sagging moment.
(Bulk carrier, BC-10, Full load condition)

この考察から、本研究では、それぞれのモデルにつき、実船に近いforecastleをモデル化した上で計算を行うことで統一した。喫水と乾舷によっては、青波が発生するケースはあったものの、その程度は小さいことが目視で確認でき、また、後述する主要目との比較検討等において、それらのケースがほかと異なる傾向を導く程のものではなかったことから、以降に示す分析においてhuge-forecastleのような仮想モデルは採用する必要は無いと判断した。

5.2 非線形影響係数と主要目に対する感度

本研究では、大波高中の垂直曲げモーメントにおける非線形影響を次式のように定義し、以降の考察を行った。

$$\begin{aligned} f_{NL-Hog} &\equiv \frac{M_{WV-Hog-max}^{CFD}}{M_{WV-Hog-max}^{linear}} = \frac{\max_{0 \leq x/L \leq 1} M_{WV-Hog}^{CFD}(x/L)}{\max_{0 \leq x/L \leq 1} M_{WV-Hog}^{linear}(x/L)} \\ f_{NL-Sag} &\equiv \frac{M_{WV-Sag-min}^{CFD}}{M_{WV-Sag-min}^{linear}} = \frac{\min_{0 \leq x/L \leq 1} M_{WV-Sag}^{CFD}(x/L)}{\min_{0 \leq x/L \leq 1} M_{WV-Sag}^{linear}(x/L)} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $M_{WV-Hog-max}^{CFD}$ はCFDにより得られた垂直曲げモーメント（ホギング）の全横断面における最大値で、 $M_{WV-Hog-max}^{linear}$ は線形理論で得られる当該モーメントの全横断面における最大値を意味する。なお、最大値を示す横断面はいずれのケースにおいても船体中央近傍ではあるものの、両者で必ずしも一致しない。また、添字がminの場合は、サギングモーメント（最小値）を意味する。

図11に、ホギングに対する非線形影響係数 f_{NL-Hog} と、船舶の主要目との関係を示す。また、図12に、サギングに対する非線形影響係数 f_{NL-Sag} と、船舶の主要目との関係を示す。これらの図より、船の長さ L 、船の幅 B に対する感度は低く、方形係数 C_b 、水線面積係数 C_w に対する傾向が高いことが示唆された。また、ホギングモーメントにおいては、喫水 T による感度を有することも認められた。IACS UR S11Aのサギングモーメントに対する非線形影響係数の中に含まれる係数 f_{Bow} （バウフレア形状を考慮した係数）については、コンテナ運搬船においては一定の傾向が認められるものの（図12の青色のプロット参照）、それ以外の船舶に対しては一定の傾向が認められなかった。

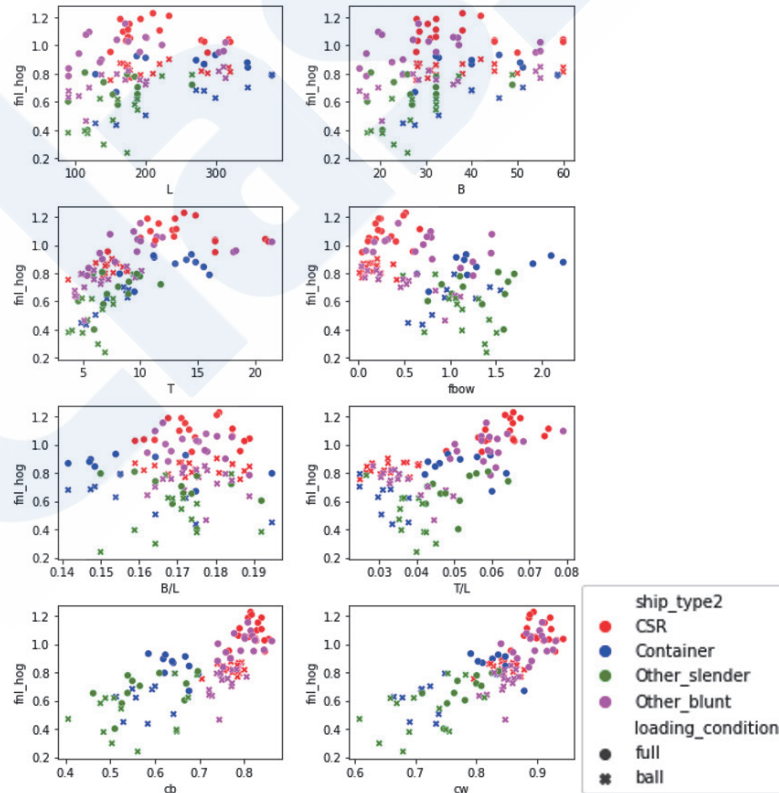


図11 Sensitivity of non-linear effect coefficient to principal particulars of ships, hogging moment

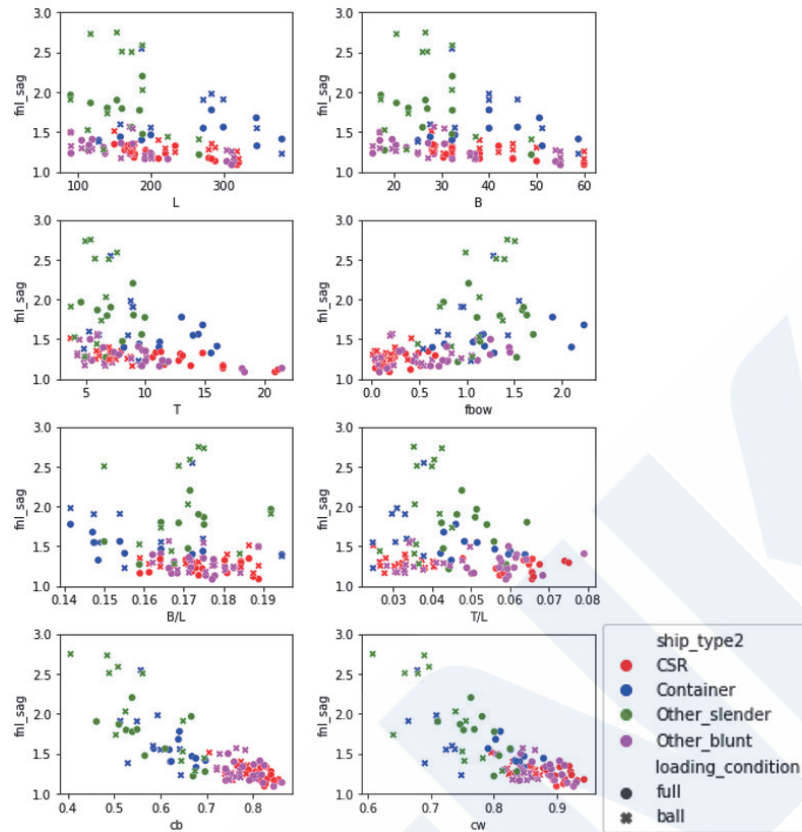


図12 Sensitivity of non-linear effect coefficient to principal particulars of ships, sagging moment

5.3 ホギングとサギング間の関係

図13に、 f_{NL-Hog} と f_{NL-Sag} の関係について示す。同図より、肥大船における非線形影響は相対的に小さく、Full load conditionの場合、ホギングにおいて1.0前後の値が、サギングにおいて1.2前後の値が得られた。また、Ballast conditionの場合、ホギングにおいて0.8前後の値を示し、サギングにおいてはFull load conditionと同程度もしくは微増となる結果を得た。また、コンテナ船を含む瘦型船においては、肥大船と比較して、ホギングにおける非線形影響は小さくなり、サギングにおける当該影響は相対的に大きくなることが確認された。

また、参考として、図14に、IACSが公開しているUR S11Aに対するTechnical background document²³⁾に記載されている非線形影響係数に関する計算結果と、本研究の結果を同じフォーマットで図示して比較したものを示す。

図14(b)に示すデータはCFDではなく、非線形性を考慮した3次元グリーン関数法等に基づくプログラムによる結果であるが、マクロの傾向は本研究結果と大差ないことがうかがえる。

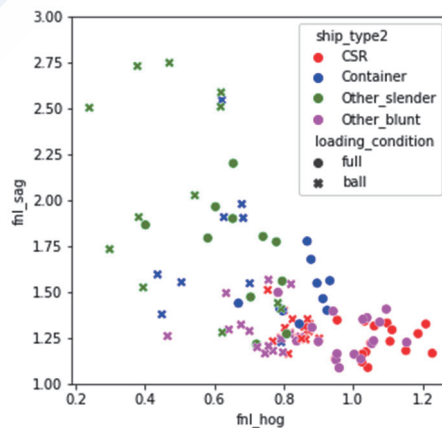
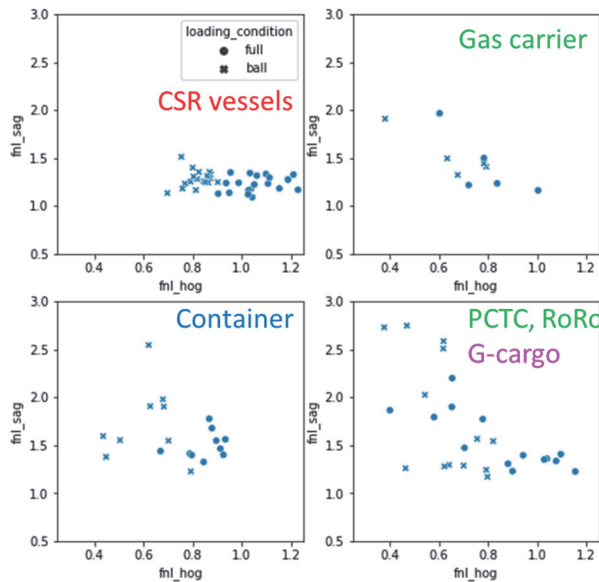
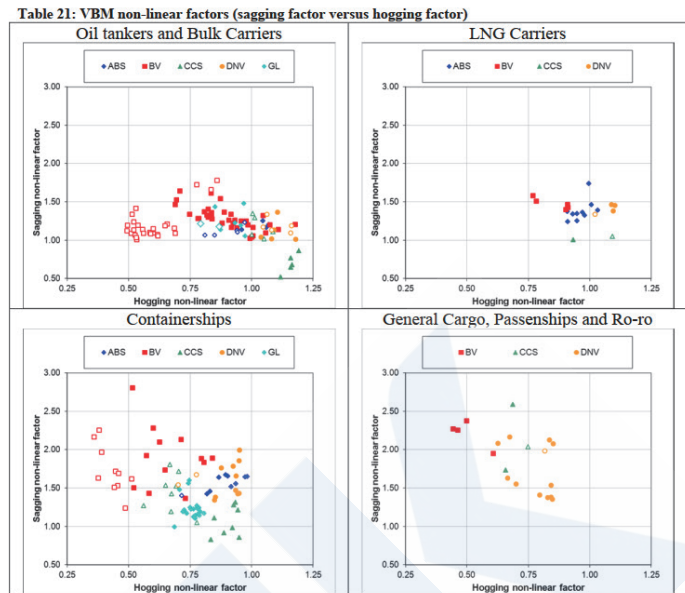


図13 Relationship between f_{NL-Hog} and f_{NL-Sag}



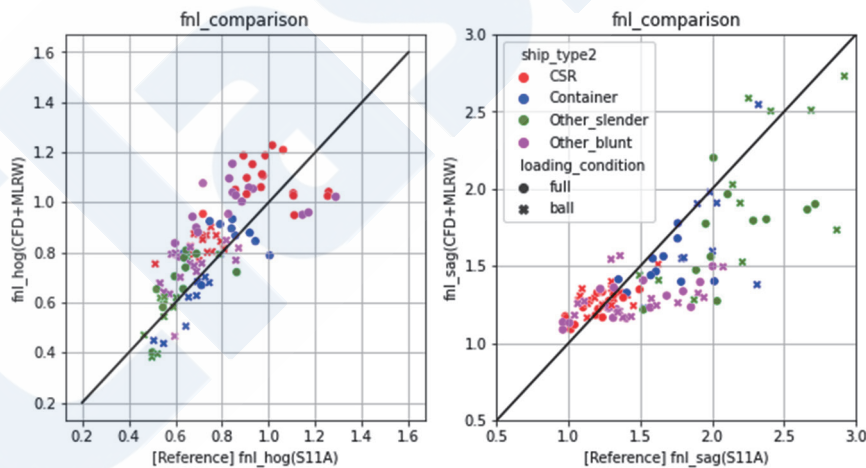
(a) Based on CFD+MLRW (same as Fig. 9)



(b) According to an IACS document

図14 Comparison with a past investigation regarding relationship between f_{NL-Hog} and f_{NL-Sag}

最後に、図15に、当該URに規定する非線形影響係数と本研究の結果に基づく非線形影響係数の関係を参考として示す。なお、3章で述べた通り、 C_b 、 C_w 、 T の値は積付状態における値を用いており、同図の横軸（つまり、URの値）も同様としている。また、当該URに定める上下限值も同図では考慮していない。従って、当該URと厳密に比較したものではないが、同図より双方は概ね良い相関を有していることがうかがえる。ストリップ法や3次元グリーン関数法等のポテンシャル理論をベースに非線形性を考慮したコードは、一般に、非線形影響に対して支配的とされているフルードクリロフ力の非線形性及び復原項の非線形性を考慮したものが多いと推測されることから、同図が示す相関は、それら2つの成分以外は、垂直曲げモーメントの非線形性に対する影響が小さいことを示唆している可能性がある。

図15 Comparison with non-linear factor specified in IACS UR S11A (as reference),
(left): hogging, (right): sagging.

6. 結言

本研究では、最新の解析技術であるCFDを用いて、また、設計不規則波による波条件を与えることで、船体構造設計で考慮する極限海象において生じ得る波浪中の垂直曲げモーメントの非線形性につき、計55隻の船舶を対象として試算を行った。

試算の過程で、青波荷重がサギングモーメントを抑制する現象が確認されたことから、実船に近いforecastle

形状に基づいたモデル化を行うことが現実の応答を試算するにあたって肝要と判断し、計算モデルをそのように統一した。

定義した非線形影響係数に基づき、ホギングとサギングモーメントそれぞれにおいて生じる非線形影響係数について分析した。肥大船及び瘦型船における傾向の差異や、船舶の主要目に対する感度を観察した。それぞれについて C_b 、 C_w に対する傾向が高いことのほか、既存規則（IACS UR S11A）に規定する係数とマクロの傾向は良い相関があること等を確認した。

なお、本研究はあくまで試算であり、垂直曲げモーメントに生じる非線形性について網羅的に分析したものではない。適切な構造設計のための非線形影響係数を定めるにあたっては、更なる検討が必要と考える。例えば、今回計算条件に用いた短期海象以外で生じる非線形影響についての検討、追波における非線形影響の考慮、MLRWのような限られた時間領域での数値計算だけでなく短期海象のFull simulation（約1000波の再現）による検証といったことが挙げられる。そのような検討の結果次第では、本研究で定義した非線形影響係数につき、異なる定義が適切となる可能性もある。また、本研究では検討対象外とした線形理論に対応する項も加味した総合的な検討も必要とされる。

参考文献

- 1) IACS: Unified Requirement S11 Longitudinal Strength Standard, 2020.
- 2) IACS: Common Structure Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, 2023.
- 3) IACS: Unified Requirements S11A Longitudinal Strength Standard for Container Ship, 2015.
- 4) ITTC: Recommended Procedures and Guidelines Verification and Validation of Linear and Weakly Nonlinear Seakeeping Computer Codes, 2017.
- 5) ISSC: Committee I.2 Loads. 18th INTERNATIONAL SHIP AND OFFSHORE STRUCTURES CONGRESS, 2012.
- 6) Kim, S. P.: CFD as a seakeeping tool for ship design. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 3(1), pp.65–71, 2011.
- 7) Gatin, I., Vladimir, N., Malenica, Š., & Jasak, H.: Green sea loads in irregular waves with Finite Volume method. Ocean Engineering, Vol. 171, 2019.
- 8) J. Parunov, T. Badalotti, Q. Feng, X. Gu, K. Iijima, N. Ma, W. Qiu, S. Wang, X. Wang, P. Yang, Y. Yoshida, Z. Zhang, & C. Guedes Soares: Benchmark on the prediction of whipping response of a warship model in regular waves. Marine Structures, Vol. 94, 2024.
- 9) H. Mano, & H. Ueno: A Simplified Estimation of Long-Term Distributions of Various Random Variables Induced by Ocean Waves, and a Study on the Influences of Operating Conditions on the Extremes. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1972(132), pp.235–247, 1972.
- 10) T. Fukasawa: On the Design Wave for Collapse Strength of a Ship, 9th Technical Exchange and Advisory Meeting, TEAM'95, pp.187-201, 1995.
- 11) Adegeest, L.J.M., Braathen, A., & Lseth, R.M.: Use of Nonlinear Sea Loads simulations in desing of Ships, Proceeding of 7th PRADS, pp.53-58, 1998.
- 12) Dietz, JS.: Application of conditional waves as critcical episodes for extreme loads on Marine Structures, Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2004.
- 13) J. Juncher Jensen: Extreme value predictions and critical wave episodes for marine structures by FORM, Ships and Offshore Structures, 3:4, pp.325-333, 2008
- 14) Sugimoto, K., Fukumoto, Y., Matsuwaki J., Akamatsu, T., Ashida, S., & Onishi, K.: Non linear effect on wave induced loads for hull structural design, bulk carrier, container carrier, vehicles carrier, Proceeding of 39the international conference on ocean, offshore and arctic Engineering, 2020.
- 15) Siemens Digital Industries Software: Simcenter Star-ccm+ user guide version 2210, 2022.
- 16) IACS: Recommendation No.34, 2022.
- 17) Håvard, A., Guillaume, H., Michael, J., & Tingyao, Z.: Update of Wave Statistics Standards for

Classification Rules, The proceeding of 9th International Conference on Marine Structures, 2023.

- 18) Det Norske Veritas: ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND ENVIRONMENTAL LOADS (Recommended Practice DNV-RP-C205), 2007.
- 19) Drummen, I., Wu, M. K., & Moan, T.: Numerical and experimental investigations into the application of response conditioned waves for long-term nonlinear analyses. Marine Structures, Vol. 22(3), pp.576–593, 2009.
- 20) Quon, E., Platt, A., Yu, Y.-H., & Lawson, M.: Application of the Most Likely Extreme Response Method for Wave Energy Converters. International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2016.
- 21) Muzaferija, S., & Peric, M.: Computation of free surface flows using interface-tracking and interface-capturing methods, Chap. 2 in O. Mahrenholtz and M. Markiewicz (eds.), Nonlinear Water Wave Interaction, Computational Mechanics Publications, WIT Press, Southampton, 1999.
- 22) J. Kim, J. O'Sullivan, & A. Read: Ringing analysis of a vertical cylinder by Euler overlay method, Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2012, Vol.4, pp.855-866, 2012.
- 23) IACS: Technical Background of Unified Requirements S11A Longitudinal Strength Standard for Container Ship, 2015.

3Dレーザースキャナを用いた実船の初期たわみ計測と分析*1

川島史也*, 辰巳晃*, 飯島一博*, 塩満大祐**, 柳本史教**, 石橋公也**

1. 緒言

板と防撓材を隅肉溶接で接合する際の熱収縮により、防撓パネルにはやせ馬形状の初期たわみが生じる。初期たわみは防撓パネル構造の座屈・最終強度に有意な影響を与える不確定要因である。この溶接初期たわみの特徴を調べるため、実船における計測が古くから行われてきた¹⁻⁴⁾。これらの計測では接触式の変位計が使用されたが、形状の計測には時間を要するため、十分な数のデータが蓄積されているとは言えない。また、板の座屈に影響を及ぼす初期たわみは防撓材を挟んで反対称な成分である。この反対称な初期たわみを分析するためには、隣接する2枚の矩形板の初期たわみが必要となるが、利用可能なデータは非常に限られている⁴⁾。

最近では3Dレーザースキャナを用いて構造物の形状計測が行われており⁵⁾、著者らの一人は3Dレーザースキャナを用いてボックスガダ試験体の初期たわみの計測を行い、その有効性を示した⁶⁾。本研究では、実船の初期たわみ計測に対して3Dレーザースキャナを適用し、その適用可能性を調べる。得られた初期たわみの計測データを分析し、隣接する2枚の矩形板の初期たわみ成分の相関を調べる。また、単一矩形板の初期たわみ形状を予測するために開発された統計モデル⁷⁻⁹⁾を、隣接パネル間の相関を考慮できるように拡張する。

2. 初期たわみの計測

2.1 計測対象

初期たわみの計測は今治造船株式会社丸亀事業本部にて2023年4月と11月に行った。対象船は64,000DWTバルクキャリアと5,800TEUコンテナ船である。64,000DWTバルクキャリアに関しては船側および船底を、5,800TEUコンテナ船に関しては船側および縦隔壁を計測した。

2.2 計測装置

計測にはFARO社製の3Dレーザースキャナ（Focus3D X130）を使用した。これは据え置き型の3Dレーザースキャナであり、周辺の対象を3次元の点群データとして計測する。仕様書上の測定誤差は±2mmである。

2.3 点群の可視化

3Dレーザースキャナで計測された点群データはFARO SCENEを用いて可視化した。可視化した64,000DWTバルクキャリアの船側の点群をFig. 1に示す。この点群から対象の矩形板を取り出して点群のばらつきを確認し、初期たわみの解析の可否を判断した。

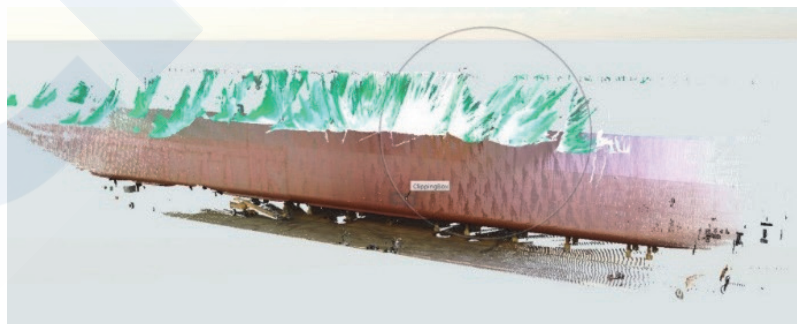


Fig. 1 Example of point cloud data of the ship side.

*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38号 659-663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り、著作権は公益社団法人日本船舶海洋工学会にあります。

* 国立大学法人大阪大学大学院工学研究科

** 開発本部 技術研究所

バルクキャリアの船底については、台座上の船体ブロックに対し、レーザースキャナを地面に設置した状態で計測した。しかし、レーザースキャナと計測対象の距離が近いため、スキャナから離れた位置ではレーザーの入射角が大きくなり、板の初期たわみ形状を正確に測定できなかった。また、コンテナ船の船側については、ドックサイドから計測したが、計測対象までの距離が遠く、点群のばらつきが大きかった。

本研究では、点群を精度よく計測できた、バルクキャリアのビルジ上部のサイドロンジで区切られる船側とコンテナ船の縦隔壁を初期たわみの分析に用いる。バルクキャリアの船側では、隣接する2枚の矩形板を21組、計42枚の矩形板を解析した。コンテナ船の縦隔壁については隣接する3枚の矩形板を4組と、隣接する2枚の矩形板を4組、計20枚の矩形板を解析した。合わせて62枚の矩形板の初期たわみの解析結果を報告する。

3. 初期たわみの解析

3.1 解析手法

3Dレーザースキャナで計測された点群データについて、文献⑥を参考に分析を行った。例としてブロック状態の64,000DWTバルクキャリアの点群データを使用して、分析の流れを説明する。まず計測された点群データについてFARO SCENEを用いて解析対象となる矩形板を取り出す。この時、座標軸は3Dレーザースキャナを置いていた方向に依存するため、直交座標系の各軸が試験体の長手方向、幅方向、面外方向と一致するように座標変換を行う。この座標変換は主成分分析を用いて行った。点群が評価面の上にばらついていることから、分散が最大となる第1主成分軸、2番目に大きくなる第2主成分軸、面外方向の第3主成分軸を決定し、座標変換を行う。座標変換を行った結果をFig. 2に示す。

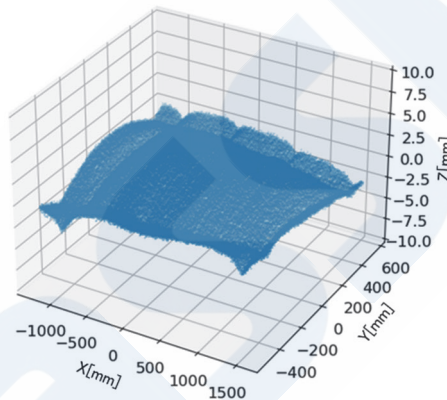


Fig. 2 Point cloud data after coordinate transformation.

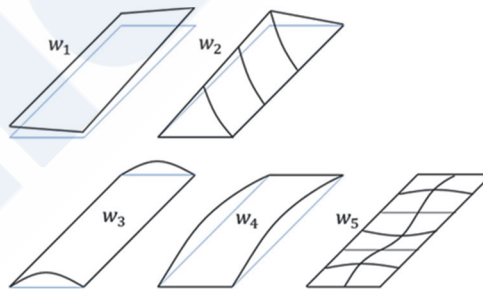


Fig. 3 Superposition of deflection modes.

点群データに対してFig. 3に示す $w_1 \sim w_5$ のたわみモードの重ね合わせ形状を当てはめることでその形状の分析を行う。 w_1 は平面の傾き、 w_2 はねじりを表すモードであり、 w_3 、 w_4 はそれぞれ長手方向と幅方向の全体たわみモードを表している。 w_5 がやせ馬たわみ形状を示す局所たわみモードであり、本研究の主な分析対象である。各モードは次式で表される。

$$w_1 = c_0 + c_1x + c_2y \quad (1)$$

$$w_2 = c_3xy \quad (2)$$

$$w_3 = \sum_{j=1}^{m_s} \left(\frac{x}{a} B_j + \frac{a-x}{a} C_j \right) \sin \frac{j\pi y}{b} \quad (3)$$

$$w_4 = \sum_{i=1}^{n_s} \left(\frac{y}{b} D_i + \frac{b-y}{b} E_i \right) \sin \frac{i\pi x}{a} \quad (4)$$

$$w_5 = \sum_{i=1}^{m_p} \sum_{j=1}^{n_p} A_{ij} \sin \frac{i\pi x}{a} \sin \frac{j\pi y}{b} \quad (5)$$

ここで a は矩形板の長さ、 b は幅である。 m_s , n_s , m_p , n_p は各たわみモードで考慮する項数である。本研究では $m_s = 1$, $n_s = 1$, $m_p = 11$, $n_p = 3$ とした。 c_0 , c_1 , c_2 , c_3 , B_j , C_j , D_i , E_i , A_{ij} は各成分の係数である。 A_{ij} は長辺方向 i 半波、短辺方向 j 半波の振幅を意味する。

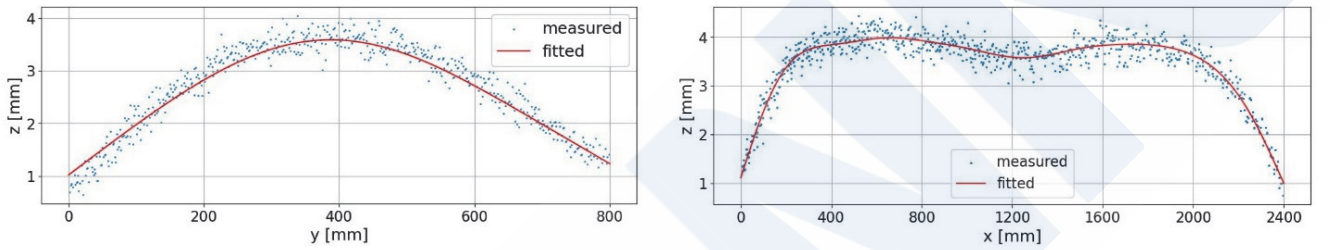


Fig. 4 Measured point cloud and fitted curves.

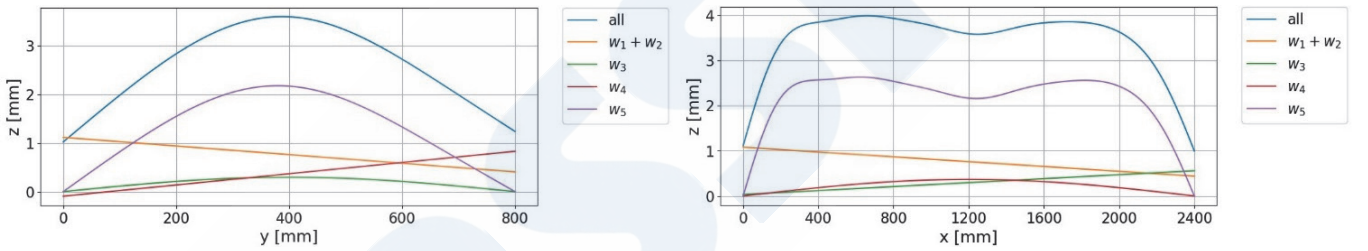


Fig. 5 Mode decomposition of initial deflection.

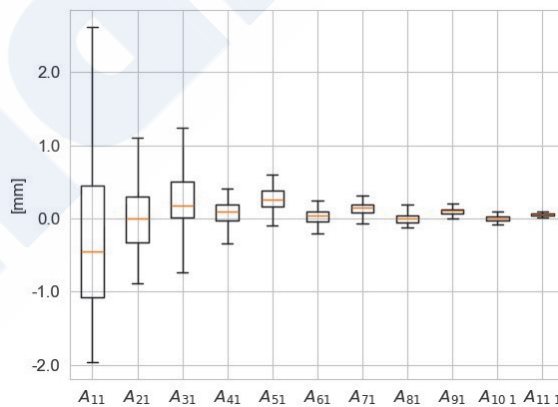


Fig. 6 Initial deflection components.

Fig. 4に計測された点群と点群に当てはめた初期たわみの曲線を示す。点群への当てはめは最小二乗法により行った。 x 方向は矩形板の長辺方向であり、 y 方向は短辺方向を表している。防撓材の立つ方向を z 方向とする。いずれも矩形板の中心線上のたわみであり、当てはめた曲線はおおむね点群の中央を通っていることが分かる。平面と捩れ変形を表す $w_1 + w_2$ 、全体たわみモードを表す w_3 , w_4 、局所たわみを表す w_5 に分離した結果をFig. 5に示す。対象の矩形板の場合、局所たわみモードである w_5 が支配的であることが分かる。以上の解析を62枚の矩形板に対して行った。

3.2 単一矩形板の解析結果

局所たわみ成分 w_5 の係数のうち、 A_{i1} 成分について $i = 1 \sim 11$ まで各成分の傾向を分析した。Fig. 6に A_{i1} の箱ひげ図を示す。局所たわみ成分のうち A_{11} 、 A_{31} 、 A_{51} といった奇数半波成分の平均値とばらつきが大きく、偶数半波成分よりも支配的であることが分かる。ただし、過去の計測結果²⁾と比較して、 A_{11} が負となる矩形板が多かった。ひずみ取りがなされた矩形板が多かった可能性があるが、さらなる調査が必要である。

次に矩形板の最大たわみ量と $\beta^2 t$ の関係をFig. 7に示す。 β は板の細長比パラメータであり、 $b/t\sqrt{\sigma_y/E}$ で表される。 b は板の幅、 t は板厚、 σ_y は降伏応力、 E はヤング率である。本研究の計測結果だけでなく、過去の計測結果^{2) 4)}も合わせて示す。丸印で示す64,000DWTバルクキャリアと5,800TEUコンテナ船が本研究の結果である。図中の直線はSmith et al.¹⁰⁾が実船の初期たわみ計測結果をもとに導いた最大初期たわみ量の基準であり、 $0.025\beta^2 t$ がSlight, $0.1\beta^2 t$ がAverage, $0.3\beta^2 t$ がSevereである。本計測の初期たわみの最大値はSlightの周辺におおむねばらついており、過去の計測結果と同じ傾向である。

3.3 隣接する矩形板の解析結果

隣接する2枚の矩形板における初期たわみの相関について分析を行った。本計測のデータに加え、過去の計測データのうち計測された矩形板の位置関係が記録されている46,000DWTバルクキャリアのデータ⁴⁾を分析した。隣接する2枚の矩形板を矩形板P、矩形板Qとする。Fig. 8に矩形板Pと矩形板Qの A_{11} の関係を示す。横軸が矩形板Pのたわみ A_{11}^P 、縦軸が矩形板Qのたわみ A_{11}^Q である。データはおおむね対角線上に集まっており、 A_{11} には正の相関があることが分かる。相関係数は0.62であった。

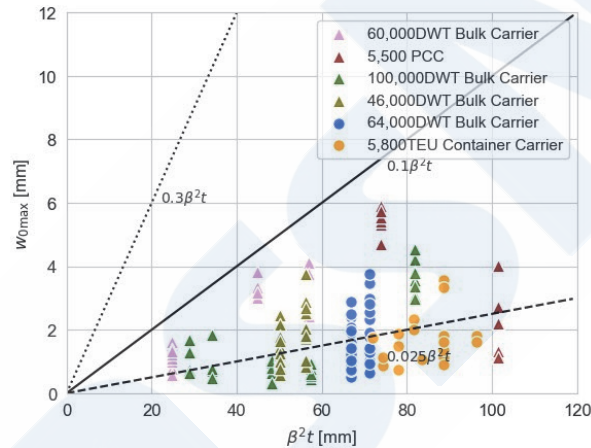


Fig. 7 Maximum values of initial deflection.

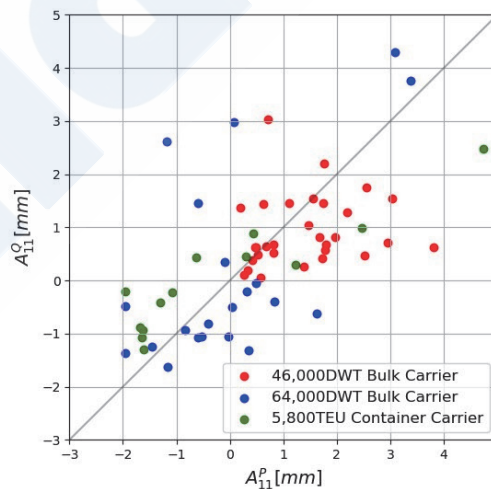


Fig. 8 Comparison of A_{11} between adjacent plates.

隣接する2枚の矩形板の A_{11} の差分 ΔA_{11} のヒストグラムをFig. 9に示す。図中の実線は正規分布に従っていると仮定してfittingを行った結果である。この時、分布の平均は0とした。推定された標準偏差の値は1.24である。なお、KS検定を行った結果、 p 値は有意水準0.05以上となり、 A_{11} の分布として正規分布は棄却されなかった。

次に、隣接する2枚の矩形板の最大たわみの大きさをそれぞれ $w_{\max}^P$, $w_{\max}^Q$ として、初期たわみの最大値の比 $\alpha = w_{\max}^Q/w_{\max}^P$ ($w_{\max}^P > w_{\max}^Q$)を計算した。初期たわみ比 α のヒストグラムをFig. 10に示す。 α の分布はおおむね一様分布のような形状となった。本計測および過去の46,000DWTバルクキャリアの計測⁴⁾から得られた α の平均値はいずれも約0.64となった。

連続防撓パネルの最終強度には防撓材を挟んで反対称な成分が影響する。その最終強度解析では初期たわみ形状を仮定することが一般的である。例えば、片方の矩形板の初期たわみの最大値についてはFig. 7の結果から推定し、隣接するもう一方の矩形板では初期たわみの最大値を0.64倍することで、隣接する2枚の矩形板の初期たわみの相関を考慮した最終強度解析が実施できる。

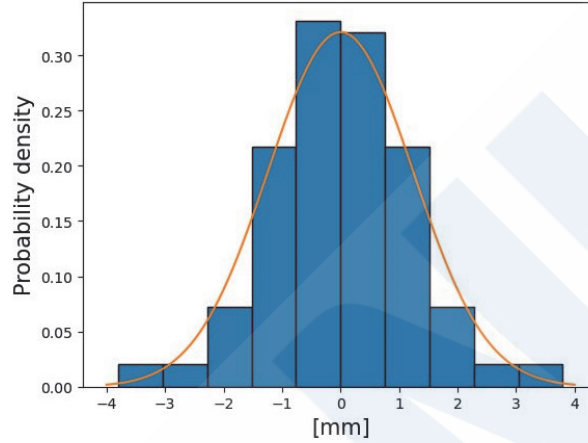


Fig. 9 Histogram of ΔA_{11} and a fitted normal distribution.

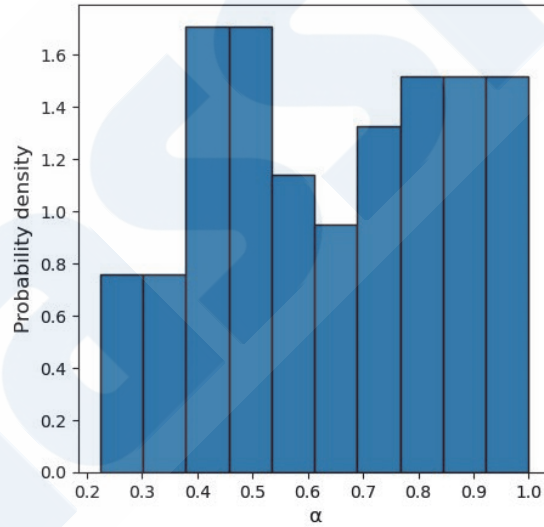


Fig. 10 Histogram of the initial deflection ratio α .

4. 隣接パネルの相関を考慮した初期たわみ形状の統計モデル

4.1 単一矩形板の統計モデル

著者らの一人は単一矩形板の初期たわみ形状を予測する統計モデル⁷⁻⁹⁾を提案している。本モデルでは、初期たわみの振幅 A の確率密度関数を

$$p(A) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{11}|\Sigma|}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(A - \mu)^T \Sigma^{-1}(A - \mu)\right\} \quad (6)$$

$$\mu = c_0 + c_1 \left(\frac{b}{t^2}\right) + c_2 \left(\frac{b}{t^2}\right)^2 \quad (7)$$

と表している。 $\mathbf{A}$ は初期たわみの振幅 $A_{i1}(i=1\sim 11)$ をまとめたベクトルである。すなわち、初期たわみの振幅が多変量正規分布に従うと仮定し、その平均 $\boldsymbol{\mu}$ が説明変数 b/t^2 の2次式で表されるとした統計モデルである。 $\boldsymbol{\Sigma}$ は 11×11 の分散共分散行列、 b は板幅、 t は板厚、 $\mathbf{c}_0, \mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2$ は回帰係数を並べた成分数が11のベクトルである。説明変数 b/t^2 に関してはビード溶接された板の角変形に関する研究¹⁰⁾を参考に導出したパラメータである。この統計モデルはベイズ統計を採用しており、パラメータ $\mathbf{c}_0, \mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \boldsymbol{\Sigma}$ の事後分布を推定している。本研究では、 $\mathbf{c}_0, \mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \boldsymbol{\Sigma}$ の事後分布の期待値（EAP推定値）を代表値として(6)、(7)式を用いることで、単一矩形板の初期たわみの各成分を確率密度関数とする。

4.2 隣接パネルの相関の考慮

隣接する2枚の矩形板PとQの初期たわみの成分を $\mathbf{A}^P = (A_{11}^P, A_{21}^P, \dots, A_{11-1}^P)$, $\mathbf{A}^Q = (A_{11}^Q, A_{21}^Q, \dots, A_{11-1}^Q)$ と表す。 $\mathbf{A}^P, \mathbf{A}^Q$ の同時確率密度分布として

$$p(\mathbf{A}^P, \mathbf{A}^Q) = p(\mathbf{A}_o^Q | A_{11}^Q) p(A_{11}^Q | A_{11}^P) p(\mathbf{A}^P) \quad (8)$$

を提案する。 $p(\mathbf{A}^P)$ は矩形板Pの初期たわみ成分の確率密度関数であり、(6)式を用いる。 $p(A_{11}^Q | A_{11}^P)$ は矩形板Pの長手方向1半波成分 A_{11}^P が与えられた状態での矩形板Qの1半波成分の確率密度関数を表す。Fig. 9の結果より、1半波成分の差分 $A_{11}^P - A_{11}^Q$ が平均ゼロ、標準偏差 σ_d の正規分布に従うと仮定すると、

$$p(A_{11}^Q | A_{11}^P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \exp\left\{-\frac{(A_{11}^Q - A_{11}^P)^2}{2\sigma_d^2}\right\} \quad (9)$$

と表すことができる。最後に、 $p(\mathbf{A}_o^Q | A_{11}^Q)$ は A_{11}^Q が与えられた状態での、その他の成分 $\mathbf{A}_o^Q = (A_{21}^Q \sim A_{11-1}^Q)$ の確率分布である。 $\mathbf{A}^Q$ は(6)式の変量正規分布に従うと仮定するので、その条件付き分布も変量正規分布となる。すなわち、

$$p(\mathbf{A}_o^Q | A_{11}^Q) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{10} |\boldsymbol{\Sigma}_{o|1}|}} \exp\left\{-\frac{(\mathbf{A}_o^Q - \boldsymbol{\mu}_{o|1})^T \boldsymbol{\Sigma}_{o|1}^{-1} (\mathbf{A}_o^Q - \boldsymbol{\mu}_{o|1})}{2}\right\} \quad (10)$$

と導かれる。ここに、 $\boldsymbol{\mu}_{o|1}, \boldsymbol{\Sigma}_{o|1}$ は

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\mu}_{o|1} &= \boldsymbol{\mu}_o + \frac{A_{11}^Q - \mu_1}{\sigma_1^2} \boldsymbol{\sigma}_{o1} \\ \boldsymbol{\Sigma}_{o|1} &= \boldsymbol{\Sigma}_{oo} - \frac{\boldsymbol{\sigma}_{o1} \boldsymbol{\sigma}_{o1}^T}{\sigma_1^2} \end{aligned} \quad (11)$$

と計算できる。 $\boldsymbol{\mu}_o$ は $\boldsymbol{\mu}$ の2～11成分を並べたベクトル、 σ_1^2 は $\boldsymbol{\Sigma}$ の1行1列成分、 $\boldsymbol{\Sigma}_{oo}$ は $\boldsymbol{\Sigma}$ の2～11行2～11列を取り出した 10×10 の行列、 $\boldsymbol{\sigma}_{o1}$ は $\boldsymbol{\Sigma}$ の1列目の2～11行を取り出したベクトルである。すなわち、

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\mu} &= \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \boldsymbol{\mu}_o \end{pmatrix} \\ \boldsymbol{\Sigma} &= \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \boldsymbol{\sigma}_{1o} \\ \boldsymbol{\sigma}_{o1} & \boldsymbol{\Sigma}_{oo} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

である。

提案する統計モデルからサンプリングした隣接する2枚の板の初期たわみ形状をFig. 11に示す。3回サンプリングを行っており、実線が矩形板P、点線が矩形板Qを表す。提案モデルと有限要素法を組み合わせることで、やせ馬初期たわみを持つ連続パネルの最終強度モンテカルロ解析が可能である。

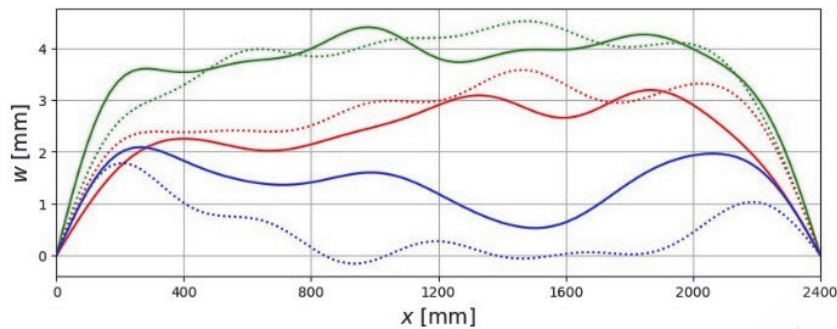


Fig. 11 Sampled initial deflections of adjacent plates.

5. 結言

本研究では3Dレーザースキャナを用いて実船の初期たわみの形状計測を行い、その適用可能性を調べた。得られた計測データを用いて矩形板の初期たわみ成分の分析を行い、連続防撓パネルの座屈・最終強度に影響する隣接パネル間の初期たわみ成分の相関を調べた。得られた知見をもとに、既存の初期たわみの統計モデルの拡張を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 3Dレーザースキャナと計測対象の位置関係が適切であれば、複数の矩形板の初期たわみを一度に計測することが可能である。
- (2) 隣接する2枚の矩形板の長辺方向1半波成分の間に正の相関がある。また、初期たわみの最大値の比 α の平均値は約0.64である。
- (3) 提案した統計モデルを用いることで、隣接パネル間の相関を考慮して初期たわみ形状をサンプリングすることができる。

3Dレーザースキャナを用いて得られた初期たわみの特徴は既存の計測データの傾向とおおむね一致するが、長辺方向1半波成分が負となる場合が多かった。この点について、ひずみ取りが行われた可能性を含め、さらなる調査が必要である。

謝辞

初期たわみの計測にあたっては、今治造船株式会社と日本シッパード株式会社にご協力いただいた。ここにお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) Ueda Y, Yao T.: The influence of complex initial deflection modes on the behaviour and ultimate strength of rectangular plates in compression. J. of Constructional Steel Research, Vol. 5, Issue 4, pp. 265-302, 1985.
- 2) Yao T, Fujikubo M.: Buckling and ultimate strength of ship and ship-like floating structures. Elsevier; 2016.
- 3) Kmiecik M, Jastrzebski T, Kuzniar J.: Statistics of ship plating distortions. Marine Structures Vol. 8, Issue 2, pp. 119-132, 1995.
- 4) 平川真一, 林田一樹: 防撓パネル構造の初期不整の調査と圧壊挙動のシミュレーション, 広島大学工学部卒業論文, 1998.
- 5) 佐野敦司, 藤久保昌彦: 部分積み時の非真球タンクの座屈強度に関する研究—第1報: 模型試験および強度推定式の開発—, 日本船舶海洋工学会論文集, 第32号, pp. 117-128, 2020.
- 6) 辰巳晃, 小森山祐輔, 田中義照, 藤久保昌彦: レーザースキャナによるボックスガーダ試験体の初期たわみ計測とその成分分析, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, Vol. 32, pp. 337-342, 2021.
- 7) 景山裕司, 辰巳晃: 平板構造の溶接初期たわみのベイズ統計モデル化とその最終強度評価, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, Vol. 32, pp.303-308, 2021.

- 8) 景山裕司, 辰巳晃: 平板構造の溶接初期たわみのベイズ統計モデル化とその最終強度評価—第2報: 初期たわみ成分間の相関の考慮—, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, Vol. 35, pp.503-505, 2022.
- 9) Tatsumi A., Kageyama Y.: Ultimate strength assessment of rectangular plates subjected to in-plane compression using a statistical model of welding initial deflection, Marine Structures, Vol. 93, No. 103523, 2024.
- 10) Smith CS, Davidson PC, Chapman JC, Dowling PJ.: Strength and stiffness of ships plating under in-plane compression and tension. Royal Institution of Naval Architects Transactions, Vol. 130, pp. 277-296 1988.
- 11) 佐藤邦彦, 寺崎俊夫: 構造用材料の溶接変形におよぼす溶接諸条件の影響, 溶接学会誌, Vol. 45, pp 302-308, 1976.

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。

第8号では、2023年7月に開催された第80回海洋環境保護委員会（MEPC 80）及び2023年6月に開催された第107回海上安全委員会（MSC 107）の審議内容を紹介した。

今号では、2024年3月18日から22日に開催された第81回海洋環境保護委員会（MEPC 81）及び2024年5月15日から24日に開催された第108回海上安全委員会（MSC 108）の主な審議結果を紹介する。

2. MEPC 81の審議結果－海洋環境保護関連－

2.1 温室効果ガス（GHG）関連

2023年7月に開催されたMEPC 80では、国際海運からのGHG排出削減目標を強化するための、2023年版IMO GHG削減戦略が採択された。今回のMEPC 81では、強化された削減目標の達成に向けて、燃料消費実績報告制度（IMO DCS, Data Collection System）、就航船のエネルギー効率指標（EEXI, Energy Efficiency Existing Ship Index）関連規制及びCII燃費実績格付け制度の見直し作業と共に、中期対策及び船舶燃料のライフサイクル評価などの議論が行われた。

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年より進められてきた。前回MEPC 80では、IMO DCSで報告すべき項目を追加するためのMARPOL条約附属書VI付録IXの改正案が承認された。

今回の会合では、前回MEPC 80で承認された改正案が採択された。本改正により、燃料を使用する機器ごとの合計燃料消費量や、航海以外での合計燃料消費量などがIMO DCSの報告項目として追加される。詳細については下記2.4.1項を参照のこと。

また、これを受けIMO DCSで新たに報告が要求される項目に関連する用語の定義や計測方法について議論され、実貨物量を基に算出する「貨物輸送量」の詳細などを含む「船舶エネルギー効率管理計画書（SEEMP, Ship Energy Efficiency Management Plan）の作成に関するガイドライン」及び「船舶燃料消費量データ及びCIIの認証に関するガイドライン」の改正が採択された。

2.1.2 EEXI規制における出力制限

今回の会合では、2023年から開始されているEEXI規制への対策として多くの船舶で採用されている軸出力制限（SHaPoLi）及びエンジン出力制限（EPL）システムの技術要件を示す「軸／エンジン出力制限システムに関するガイドライン」の見直しが行われた。

審議の結果、船舶の航行に関して危険性が想定される場合は、出力制限以上の出力を即座に使用できるよう、予め出力制限を解除してよいことを同ガイドラインに明文化するとともに、エンジンの制御系統から独立したSHaPoLiシステムに対する機能要件を新たに追加するガイドラインの改正が採択された。

2.1.3 重量物運搬船の取扱い

エネルギー効率設計指標（EEDI, Energy Efficiency Design Index）規制、EEXI規制及びCII制度の適用から除外される重量物運搬船の定義が新たに作成され、MARPOL条約附属書VI統一解釈の改正として採択された。

2.1.4 GHG排出削減のための中期対策

2023年版IMO GHG削減戦略では、国際海運におけるGHG削減目標を達成するための中期対策として、技術的手法と経済的手法を組み合わせた対策案（Basket of measures）を検討することが掲げられている。技術的手法としては船舶の年間GHG排出強度を段階的に強化していく制度（GHG Fuel Standard）等が提案されており、経済的手法としてはGHG排出量に応じた課金制度（Universal Mandatory GHG Levy）や化石燃料船への

課金で得られた収入をゼロエミッション燃料船へ還付する制度（feebate）等が提案されている。

また、中期対策の策定作業は2027年の発効を目指して表1に示すスケジュールで進めることが合意されている。

表1 中期対策の策定作業スケジュール

期間	作業内容
2023-2024	中期対策案の各組み合わせについて国際海運及び各国に及ぼす影響の評価（包括的影響評価）を実施し、具体的な中期対策案を最終化
2025	中期対策案の承認及び採択
2027	中期対策の発効

今回の会合では、これまでに提案されている中期対策案に関する意見交換が行われ、船舶の年間GHG排出強度の基準値や還付の対象などを含む論点を整理した条約改正の枠組みを示す文書（IMO net-zero framework）が合意され、同文書を用いて各国及び国際団体に対して中期対策案の最終化に向けた議論を進めていくことが要請された。

包括的影響評価については、実施者であるUNCTAD（国連貿易開発会議）などから中間報告が行われ、次回MEPC 82までに最終結果が提出されることが報告された。また、同結果への理解を深めるための場を設けるべく、専門家ワークショップをMEPC 82前に開催することが合意された。

2.1.5 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の実用化

船舶の脱炭素化に向けて今後普及が予想される水素やアンモニア、バイオマスを原料とした燃料などの低／ゼロ炭素燃料については、それら燃料の製造や流通過程において排出されるGHGにも関心が高まっている。また、メタン（CH₄）や亜酸化窒素（N₂O）といった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注目されている。

前回の会合では、船舶で使用される燃料の原料採取から製造、流通、及び船上での使用を通じたライフサイクル全体における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全般的な枠組みとして、船用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）が採択された。前回の会合にて設置された通信部会では、GHG強度のデフォルト値開発のためのデータ収集用テンプレートの見直しをはじめ、デフォルト値の検討、土地利用変化に伴う炭素及びメタン漏出、合成燃料の原料としての回収炭素、及び船上CCSの回収炭素の取扱い等について議論された。

今回の会合では、通信部会により提案されたLCAガイドラインの改正を含む2024年版LCAガイドラインが採択された。2024年版LCAガイドラインでは、バイオ燃料の生産に関する排出量算定方法の詳細化及びパラメータの数値化がなされたほか、燃料の生産に使用する電力に関するGHG排出強度及び実際の船上でのGHG排出量に関する算定方法が追加された。

また、通信部会において検討された課題については、多種多様な専門知識が必要なため、通信部会での議論には限界があることから、GESAMP（海洋環境保護の科学的側面に関する合同専門家グループ）に船用燃料ライフサイクルGHG強度に関する作業部会を新設することが合意され、作業に向けた付託事項（Terms of Reference）が作成された。

2.1.6 CO₂以外のGHGの計測及び検証並びに船上CO₂回収装置

メタンやアンモニアを燃料として使用する場合、燃焼時の漏洩（メタンスリップ）や亜酸化窒素の形成を生じる可能性があり、地球温暖化に与える影響が大きいとされている。そのため、メタン及び亜酸化窒素を含むCO₂以外のGHGの計測及び検証方法について、LCAガイドラインの更なる実用化に向けて議論されている。

また、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, Onboard Carbon Capture）技術が開発・検証され始めている。

今回の会合では、上記に関する議論を進めるべく通信部会が新たに設置され、以下について検討されることが合意された。

- ・CO₂以外のGHGの計測及び検証方法並びに条約での規制枠組み等
- ・OCC技術に関する条約での規制枠組み策定に向けた作業計画

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, Experience Building Phase）が設けられており、前回の会合において優先改正事項を含む条約レビュー計画（CRP, Convention Review Plan）が採択されている。

その後、見直されるべき条約要件の選定作業が通信部会によって実施され、今回の会合において、条約本文、BWMSコード、関連ガイドライン及びガイダンスにて改正が必要となる事項のリストが合意された。同リストには、BWMSの適切な施工及び運転を確認するため、生物殺傷能力及び活性物質排出濃度の確認を、コミッショニング試験だけでなく、中間検査時及び更新検査時にも行うことなどが含まれている。今後、同リストに基づく詳細な検討を進めるため、改めて通信部会が設置され、次の会合に向けて継続して議論されることとなった。

2.2.2 水質に問題がある海域でのバラスト水管理

バラスト水処理装置を運用するにあたり、海水が極端に濁っていて紫外線が透過せず殺菌できない場合や、塩分濃度が低すぎる場合、又は頻繁にフィルターの目詰まりが発生するなど、バラスト水処理装置の正常な連続運転が困難となるような水質（CWQ, Challenging Water Quality）の寄港地におけるバラスト水の搭載についてMEPCで審議が行われてきた。

今回の会合では、CWQに遭遇した際のBWM条約適用に関する暫定ガイダンスが採択された。本ガイダンスでは、CWQの判定基準、CWQの港湾においてBWMSをバイパスしてバラスト水を取水する手順、バイパス取水後のタンク洗浄手順等が規定されている。今後、本暫定ガイダンスの継続的な見直しが行われる見込みである。

2.2.3 処理済み汚水及びグレーウォーターの一時貯留

特定の港湾において処理済みの汚水やグレーウォーターの排出が禁止されていることから、それらの港湾においてバラストタンクに処理済み汚水やグレーウォーター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の作成について議論が行われている。

今回の会合では、処理済み汚水・グレーウォーターをバラストタンクへ一時貯留する際のガイダンスが採択された。同ガイダンスでは、一時貯留後にバラストタンクとしての利用を復旧する際のタンク洗浄に関する要件や、一連の手順のバラスト水管理計画への記載要領及びバラスト水記録簿への記録要領等が規定されている。

2.3 大気汚染防止関連

2.3.1 窒素酸化物（NOx）並びに硫黄酸化物（SOx）及び粒子状物質（PM）排出規制海域の追加

MARPOL条約附属書VIの第13規則では、船舶に搭載されているディーゼル機関からのNOxの排出量を規制している。第13.6規則では、NOx三次規制が適用される排出規制海域（ECA, Emission Control Area）として、北米沿岸、米国カリブ海海域、バルト海海域及び北海海域が指定されている。

MARPOL条約附属書VIの第14規則では、SOx及びPMの排出を抑制するために、2020年より一般海域で使用する燃料油中の硫黄分濃度が0.50%以下に制限されている。また、第14.3規則では、SOx及びPMのECAとして北米沿岸、米国カリブ海海域、バルト海海域、北海海域及び地中海海域が指定されており、これらの海域で使用する燃料油中の硫黄分濃度が0.10%以下に制限されている。

今回の会合では、新たにカナダ北極海域及びノルウェー海域をECAに指定する提案があり、両海域をECAに指定するMARPOL条約附属書VIの改正案が承認された。

次回MEPC 82において改正案が採択された場合、最短で2027年の3月より、これらの海域を航行する船舶に対し、燃料油中の硫黄分濃度を0.10%に制限する規制が適用される見込みである。また、同海域を航行する表2に示す船舶にNOx三次規制が適用される予定となっている。

表2 NOx三次規制の適用予定

カナダ北極海ECA	・ 2025年1月1日以降に起工又は同等の建造段階にある船舶
ノルウェー海ECA	・ 2026年3月1日以降に建造契約が行われる船舶 ・ 建造契約がない場合には、2026年9月1日以降に起工又は同等の建造段階にある船舶 ・ 2030年3月1日以降に引渡しが行われる船舶

2.3.2 NOx規制対策に関する有効性

NOx規制対策として採用される選択触媒還元（SCR）や排気ガス再循環（EGR）については、ECAにおいて低出力で運航する際など、排気温度が低い場合や低負荷における補助制御装置（ACD）の作動に伴って、SCRやEGRが十分な効果を発揮していない可能性があることが指摘されている。また、ECAにおけるNOx排出制限の適用が船舶の起工日に関連付けられていることを含め、NOx規制の有効性を検討すべきとの提案があった。

今回の会合では、関係国に対して、この問題に関する調査を継続し、NOx規制の有効性のレビューに関する新たな提案を、次回以降の会合に提出するよう要請された。

2.3.3 燃料油の使用における安全性強化の検討

SOx及びPMに対する排出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。2023年6月に開催されたMSC 107では、SOLAS条約及びMARPOL条約において共通の燃料油サンプリング手法を確立するため、既存のガイドライン（決議MEPC.182(59)）をベースとした、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、MEPCに提出された。

今回の会合では、合同ガイドライン案で用いられる用語に対してMARPOL条約との整合をとる作業等が行われ、修正された合同ガイドライン案が承認された。その後、下記3.3.2(6)項の通りMSC 108で改めて承認され、MSC-MEPCサーキュラーとして発行された。

2.4 採択された強制要件

2.4.1 燃料消費実績報告制度の見直し

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の改正が採択された。この改正は2025年8月1日より発効となる。

1. 燃料を使用する機器ごとの合計燃料消費量（主機、補機及びボイラ等）
2. 航海以外での合計燃料消費量
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

なお、本データ報告関連の改正については2025年1月1日より早期適用することが旗国に要請されている。

2.4.2 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

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（BDN, Bunker Delivery Note）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の改正が採択された。本改正は2025年8月1日より発効となる。

2.4.3 バラスト水記録簿関連

MEPC 80で採択され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への参照を含む、バラスト水管理条約A-1及びB-2規則の改正が採択された。本改正は2025年10月1日より発効となる。

3. MSC 108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 108で採択された主要な義務要件は以下の通り。

(1) SOLAS条約II-1章3-4規則の改正

タンカー以外であって20,000GT以上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規則の改正が採択された。なお、設備の具体的な要件を規定するガイドラインは2025年の完成を目標に船舶設計・建造小委員会（SDC）にて検討されている。

(2) IGFコードの改正

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、燃料タンクの圧力逃し弁の冗長性等に関するIGFコードの改正が採択された。また、同改正コード4.2.2及び8.4.1から8.4.3については旗国への自発的な早期実施を促すMSCサーキュラーが発行された。

(3) 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採択された。

(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)）の改正が採択された。

1. 救命胴衣の水中性能要件
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 Codeの改正

Ro-Ro旅客船の火災安全等に関する下記SOLAS条約II-2章及びFSS Code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
 - 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
 - 熱探知ケーブル
 - 可視可聴式火災警報
2. 貨物船の制御室及び貨物制御室の火災探知要件に関するSOLAS条約II-2章7.5.5規則の改正。

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12月に開催されるMSC 109にて採択される見込みである。

(1) IGFコードの改正

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、外板からの最小垂直距離に関するサクシオンウェルの取扱い等に関するIGFコードの改正が承認された。

(2) IGCコードの改正

アンモニア燃料船の就航を見据え、毒性プロダクトを条件付きで燃料として使用可能にするためのIGCコードの改正が承認された。なお、本改正についてはMSC 109での採択時にサーキュラーの発行等により旗国に早期実施を促すこと及び採択後18か月後を改正の発効日とすることが合意されている。

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。

3.3.1 統一解釈

- (1) 固定点検設備の詳細な規定を定めるTechnical Provisions（決議MSC.158(78)）及び水位検知警報装置の性能基準（決議MSC.188(79)）の統一解釈（MSC.1/Circ.1572/Rev.1）の改正

下記に関する統一解釈（MSC.1/Circ.1572/Rev.1）の改正。

1. 固定点検設備の検査間隔及びその記録について明確にするための解釈を追加。
2. 改正された水位検知警報装置の性能基準（決議MSC.188(79)/Rev.2）に合わせ、表題及び適用対象を修正。

- (2) SOLAS条約XV章5.1及びIPコード第1部3.5の統一解釈

産業人員安全証書と既存のSOLAS安全証書の有効期限、検査日及び裏書日を調和するためのSOLAS条約XV章5.1及びIPコード第1部3.5の解釈。

- (3) 船上騒音コードの統一解釈

騒音計及びその現場校正器の校正を行う基準を明確にするための同コード2.1及び2.2の解釈。

- (4) SOLAS条約II-2章9及び13の統一解釈（MSC.1/Circ.1511）の改正

機関区域の下部から保護された囲壁を通じて脱出する「安全な位置」に操舵機室を含めるための、SOLAS条約II-2章9及び13の統一解釈（MSC.1/Circ.1511）の改正。

3.3.2 ガイドライン及び指針等

- (1) 極低温貨物のための高マンガンオーステナイト鋼の使用に係るガイドライン（MSC.1/Circ.1599/Rev.2）

の改正

アンモニア積載のための適合試験に関する規定を追加する極低温貨物のための高マンガンオーステナイト鋼の使用に係るガイドライン (MSC.1/Circ.1599/Rev.2) の改正。

- (2) 液化ガスばら積船又は低引火点燃料船のための極低温貨物の代替金属材使用に関するガイドライン (MSC.1/Circ.1622) の改正

アンモニア積載のための適合試験に関する規定を追加する液化ガスばら積船又は低引火点燃料船のための極低温貨物の代替金属材使用に関するガイドライン (MSC.1/Circ.1622) の改正。

- (3) LPG貨物を燃料として使用するためのガイドライン

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検討された、LPG貨物を燃料として使用するためのガイドライン。

- (4) 液化水素運搬船のための暫定勧告 (決議MSC.420(97)) の改正

断熱に断熱材と水素ガスを使用する独立タンクに関する要件の追加を含む液化水素運搬船のための暫定勧告 (決議MSC.420(97)) の改正。

- (5) SOLAS条約II-1章及びIII章の代替設計・配置に関するガイドライン (MSC.1/Circ.1212/Rev.1) の改正

SOLAS条約II-1章C部、D部及びE部に関する代替設計・配置について、目標、機能要件及び性能基準を追加するSOLAS条約II-1章及びIII章の代替設計・配置に関するガイドライン (MSC.1/Circ.1212/Rev.1) の改正。

- (6) MARPOL条約附属書VI及びSOLAS条約II-2への適合のための燃料サンプリングに関するガイドライン

SOLAS条約及びMARPOL条約において共通の燃料油サンプリング手法を確立するためのガイドライン。

3.4 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、コレスポンデンスグループ (通信作業部会) からの報告や法律委員会 (LEG)・簡易化委員会 (FAL) との共同作業部会 (JWG3) による会合結果等に基づき、目標及び安全性・オペレーション・セキュリティ等の項目ごとの機能要件を中心とした、自動運航船に関する非強制コードの策定作業が進められた。審議の結果、コレスポンデンスグループを再設置すると共に、2024年9月に中間作業会合を開催して、非強制コードの策定作業を引続き進めることが合意された。今後の作業計画として2025年6月開催予定のMSC 110にて非強制コードの最終化及び採択、その後、2030年までの強制コードの採択 (2032年1月1日発効) を目指すことが合意された。

3.5 温室効果ガス (GHG) 排出削減に向けた新技術及び代替燃料

前回の会合において、温室効果ガス (GHG) 排出削減に向けた新技術及び代替燃料のリスト化及びそれらの技術的な評価並びにそれらの使用を妨げる可能性のある既存の要件における安全上の障害及びギャップの検討が開始された。

今回の会合では、コレスポンデンスグループ (作業グループ) からの報告に基づき、関連の作業グループにより新技術及び代替燃料のリストの作成作業がなされ、今後も引き続きコレスポンデンスグループを設置して作業を進めることとなった。

3.6 サイバーリスクマネジメント

船上におけるサイバーセキュリティの重要性及びセキュリティリスク対策の必要性の高まりから、安全管理システム (SMS) でのサイバーリスクマネジメントに関する非強制の決議MSC.428(98)が制定されている。また、本決議が参照すべきガイダンス資料として海事分野のサイバーリスクマネジメントガイドライン (MSC-FAL.1/Circ.3/Rev.2) が策定されている。

前回の会合において、近年のサイバーコネクテッドシステムの利用増加等を踏まえ、当該ガイドラインの見直し作業を実施することが合意された。

今回の会合では、最新の業界標準等を踏まえ、サイバーリスク管理体制の導入にあたって、組織、人員、プロセス及び技術的側面から考慮すべき事項をより具体的な要件として追加した改正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、簡易化委員会 (FAL) で承認された後、MSC-FALサーキュラーとして発行される予定となっている。

ClassNK 技報

No.10(2024 年(Ⅱ))

編集: 石橋 公也
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。

© 2024 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