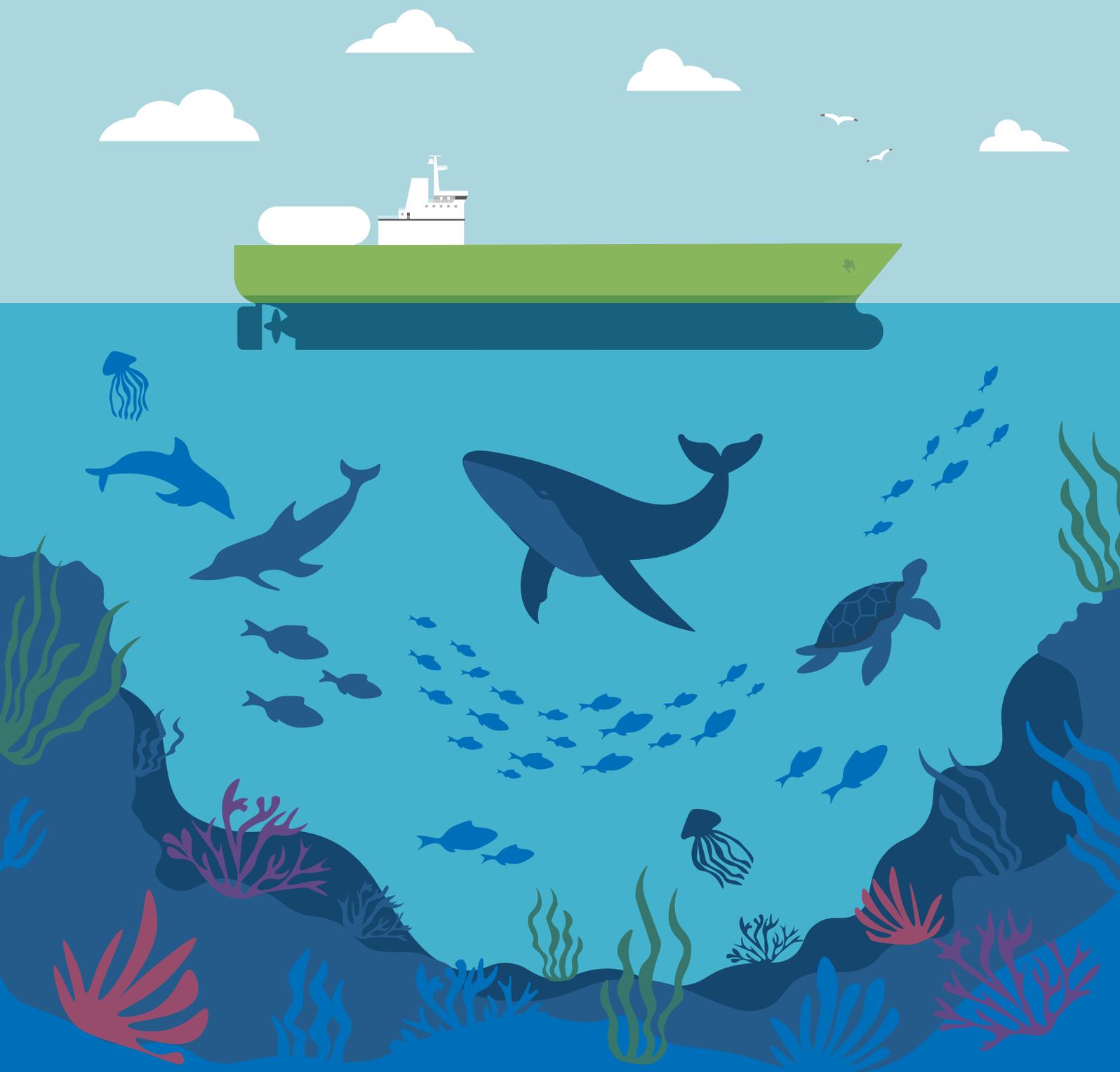


# ClassNK 技報

No.11 2025年 (I)

特集記事：  
海洋環境保護関連の  
最新技術動向



## —目 次—

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

## 特集記事 「海洋環境保護関連の最新技術動向」

船舶水中騒音ガイドラインとIMO等の動向 .....	開発本部 技術研究所.....	3
----------------------------	-----------------	---

あらたな環境問題として、世界的に船舶水中騒音の海洋生物に対する影響低減への関心が高まっている。IMOにおいても低減対策をより実効性のあるものとするために2023年にあらたな水中騒音ガイドラインが発行された。

IMO水中騒音ガイドライン制定の経緯、水中騒音の特性、各国における船舶水中騒音低減に向けた取組みの動向、本会及び他船級が発行したガイドラインの概要、船舶水中騒音低減のための技術課題及び今後の本会の取組み等について概説する。

## 海洋環境保全に向けた船舶水中騒音予測ツールの開発と活用

.....	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 白石 耕一郎.....	9
-------	---	---

実船の水中騒音を管理するために今後必要となる、水中騒音レベルを設計段階で簡易にかつ高精度に算出するための推定手法について概説する。キャビテーション面積推定チャートであるDBチャートを数値計算によって算出し、水中騒音推定法に実装した。DBチャートとBrownの式を組み合わせた改良手法により、プロペラの形状や船尾伴流分布を考慮したキャビテーション発生面積を高精度で予測することが可能となった。実船測定データとの比較検証では、5隻のバルクキャリア船全てにおいて予測精度が向上し、平均RMSE値が7.0[dB]から5.2[dB]へと約26%改善された。

浅海域における船舶騒音計測について .....	沖電気工業株式会社 村山 智希.....	19
-------------------------	----------------------	----

2023年7月のIMO/MEPC 80において非強制であるが水中騒音管理計画の作成等を規定したガイドラインが採択された。それに合わせClassNKは2023年10月に新たなガイドライン「船舶水中騒音ガイドライン（第1.0版）」を発行した。2023ガイドラインに規定されているISO 17208-2準拠の深海域での船舶騒音計測に加え、ISOにおいて計測がより容易となる浅海域に対応した新たな規格ISO 17208-3の策定作業がすすめられており、EU（Saturn Project）ではその計測法に関する実証的な評価も進んでいる。

それらを鑑み、日本固有の制約、例えば水深や海流、航路等を考慮したシステムを検討中である。今回日本沿岸域（浅海域）における船舶騒音計測について検討の一部を紹介する。

## IMOアンモニア燃料安全ガイドライン策定の最新情報及びアンモニア燃料の実用化に向けての本会の取り組み

.....	技術本部 技術部.....	27
-------	---------------	----

アンモニアは、燃焼時に二酸化炭素を排出しないことから、IMOが掲げるGHG削減戦略である2050年排出ネットゼロを実現するための燃料として期待されている。IMOでは2025年2月にアンモニアを船舶の燃料として使用する際の安全要件を定めた暫定ガイドラインを公表している。本稿では、IMO暫定ガイドライン策定の際に行われたIMOでの審議の内容や、アンモニア燃料船の実用化に向けた本会の取組みについて紹介する。

海事分野を含めた社会の脱炭素化の流れの中で、これまでとは異なる安全性評価が必要になってくると考えられる。脱炭素化は急激に進んでいることから、安全性評価技術もまた、スピード感をもって開発する必要がある。本会では、船舶の代替燃料利用や、輸送する貨物の変化に対応するための安全性評価技術として、リスク評価の高度化・定量化と、貨物・燃料格納設備の健全性評価技術をコア技術として重点的に研究を行っている。

本稿では、2025年1月に開催されたR&D Forumにて紹介した、アンモニア燃料船におけるアンモニア漏洩頻度推定、アンモニアガス拡散試験、そしてリスク評価手法の高度化を紹介する。また、貨物・燃料格納設備の健全性評価技術として、アンモニア応力腐食割れ感受性評価手法と材料の液化酸素適合性評価手法の、検討状況と成果を紹介する。

## 「アンモニア燃料船のリスク評価のためのアンモニア漏えい頻度のベイズ推定」の解説

……国立研究開発法人産業技術総合研究所 小島 直也，小野 恭子… 41

船舶運航中の温室効果ガスの排出抑制を目的として、現在、アンモニア燃料船の技術開発が進められている。アンモニアの持つ毒性への懸念から、その漏えい事故時のリスク評価が求められる。一方で、評価に必要なアンモニアの漏えいや事故の頻度はこれまで得られていなかった。本記事では、筆者らが実施したベイズ推定によるアンモニア燃料船の機器ごとの漏えい頻度推定について、その手法および結果を解説する。

## 技術一般

### 主機回転数を監視することによって実現する荒天遭遇時の省エネかつより安全な運航について

……開発本部 技術研究所，総務本部 人材開発センター… 55

国際海運における2050年頃までのGHG排出量ネットゼロへ向けて、海運業界では代替燃料の採用や更なるエネルギー効率の向上といった対策が検討されている。本稿では、荒天に遭遇した際にどのように主機を運転すれば燃料を節約できるかに焦点を当てる。最初に荒天遭遇時に主機の作動限界により生じうる燃料損失の発生メカニズムを解説する。次に各条件下における燃料損失量の試算を行う。最後に荒天遭遇時に燃料を節約するための主機運転方法を示す。

### AISデータ活用事例紹介 ……開発本部 技術研究所… 63

近年、船舶自動識別装置（Automatic Identification System, AIS）データの取得が容易になり、船舶の動静を把握することが可能となっている。AISデータは、海上貨物輸送量の推計や環境影響の分析など多分野で活用されており、産業界においては船舶運航の最適化にも利用されている。本会においても、AISデータの活用を通じて、高精度かつ透明性の高い規則の開発を実現している。本稿では、AISの活用事例として、船舶の航行実態、東京湾寄港船の特徴、紅海における航路変化に関する分析結果を紹介する。

### IMOの動向 ……開発本部 国際部… 73

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82回海洋環境保護委員会（MEPC 82）及び第109回海上安全委員会（MSC 109）の審議概要を紹介する。

2024年にClassNKでは、10のガイドラインを発行している。ここでは、これらのガイドラインの概要を紹介する。





## 巻頭言

### 特集「海洋環境保護関連の最新技術動向」発刊によせて

開発本部 技術研究所長 石橋 公也

ClassNK技報No.11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.10）では、IMO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。

本会は2025年1月に新たな取り組みとして、研究成果の発表を通じて、共同研究等の新しいコラボレーション創生の機会を作ることを目的としたClassNK R&D Forumを開催し、サービスや研究開発に関する海事産業等の方々の様々なニーズを聴かせていただきました。本号では、当該フォーラムでの講演テーマ「より安全で環境にやさしい船舶を目指して」のうち船舶水中騒音とセーフデカーボナイズーションに関する講演を特集記事としてまとめました。

2000年代初頭において、水中騒音の海洋生物への影響や石油ガス産業が海底油田開発等で使用する海中の音響機器への影響に対して関心が高まりました。IMOにおいても商船から放射される水中騒音レベルの低減に関する議論が行われ、2014年に船舶水中騒音低減のためのガイドラインが発行されましたが、水中騒音計測手法及び大型商船の騒音対策に様々な課題があるため非強制でした。2023年に引き続き非強制ではありますが、実効性を高めるための改正ガイドラインが採択されました。本号では、IMO等における水中騒音低減のための取り組みの状況と今後の本会の対応等について概説するとともに、今後の規制等に関する国際的な動向が不確かなところがあるものの、今後の議論の基礎となる船舶水中騒音を「推定・設計する」及び「計測・評価する」ことに関する技術について外部の専門家にご寄稿いただきました。

IMOにおいて「2050年頃までにGHG排出ネットゼロを目指す」という野心的目標が策定され、IMO・EUの課金を伴う規制が導入されることとなっています。それに対応する代替燃料船の建造促進が見込まれることから、本会としては、代替燃料船に必要な安全性に関わるセーフデカーボナイズーション技術の開発を進めています。本号では、アンモニア燃料安全ガイドライン策定の最新情報及び代替燃料の実用化に向けた安全性評価等の本会の取り組み及び定量的なリスク評価に必要なアンモニア漏洩頻度推定法に関する最新技術について外部の専門家にご寄稿いただきました。

本会は、これまで「良い船」をつくることを最優先課題として取り組んでまいりましたが、今後はそれに加えて「良い管理」、「良い運航」という視点も加えて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り組み、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。



# 船舶水中騒音ガイドラインとIMO等の動向

開発本部 技術研究所

## 1. はじめに

本年1月に本会では、サービスや研究開発に関する海事産業等の方々の様々のニーズを聴取するとともに、共同研究等の新しいコラボレーション創生の機会を作ることを目的としたClassNK R&D Forum（以下、Forumとする）を開催した。Forumの講演テーマとして、あらたな環境問題として世界的に関心の高まっている船舶水中騒音を取り上げた。本稿はForumでの「IMOにおける船舶水中騒音低減に関する議論の動向」及び「船舶水中騒音ガイドラインへの対応について」の講演を取りまとめたものである。

本稿ではIMO水中騒音ガイドライン制定の経緯、水中騒音の特性、各国における船舶水中騒音低減に向けた取組の動向、本会及び他船級協会が発行したガイドラインの概要、船舶水中騒音低減のための技術課題及び今後の本会の取組等について概説する。

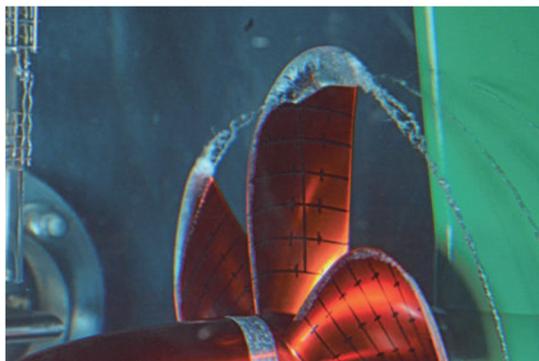
## 2. IMO水中騒音ガイドライン制定の経緯

2000年代初頭において、水中騒音の海洋生物への影響や石油ガス産業が海底油田開発等で使用する海中の音響機器への影響に対して関心が高まり、IMOにおいても商船から放射される水中騒音レベルの低減に関する議論が行われた。2008年開催のMEPC 58において米国から、プロペラキャビテーション、機関振動に起因する船舶由来の水中騒音に対して、設計段階での騒音対策の考慮、運航方法の改善を含むガイドライン策定の提案（MEPC 58/19）がなされたが、水中騒音計測手法及び大型商船の騒音対策に様々な課題があることから非義務的なものとなり、2014年開催のMEPC 66にて、最初の水中騒音ガイドライン（MEPC.1/Circ.833）<sup>1)</sup>が承認された。

## 3. 水中騒音の特性

水中騒音は、船舶に搭載される主機及び補機等に起因する振動が船体構造を伝播し船体外板から放射される構造騒音、船体と流体の摩擦等に起因する流体騒音及びプロペラキャビテーション（写真1）<sup>2)</sup>に起因するプロペラ騒音に大別される。プロペラ翼が流れの遅い船体近傍を通過する際に翼面の圧力が低下し、局所的に膨大な量のキャビテーション気泡が成長・収縮のリバウンドを経て崩壊のプロセスを経る。その際に広帯域の騒音が発生する。プロペラ翼が周期的に通過することによるキャビテーションの体積変動によって引き起こされる翼通過周波数（翼数×回転数）の高調波成分のピークを生じさせる。

写真1 船用プロペラキャビテーション（水槽試験）



特に船尾流れの不均一度が高く、高効率のプロペラを求められる大型肥大船の場合、プロペラキャビテーションに起因し水中に放射される船舶水中騒音が支配的である。さらに、水中騒音そのものが性能となる調査船や艦艇等では、主機に対する防振支持や電気推進等の構造騒音を低減する対策を講じることができるが、日本の船舶建造の大宗を占める大型肥大船の場合、起振力の大きな大型ディーゼル主機等が船体に直付けされており、かつ防振支持等の対策を講じることが困難であり、低速航行等によりキャビテーション騒音が低減した場合に主機等に起因する騒音が顕在化することは留意すべきである。

水中においては1,000Hz以上の高い周波数の音は減衰が大きく、遠くまで届かない。ただし、船舶が発する音は、周波数が低い音が多く水中での減衰効果はあまり期待できない。水中音の音速は水温に影響されるため、海中の水温分布により、一般に水中音は“海底方向”に曲がっていく。一般的な伝播距離は数km～数十kmと言われる。しかしながら、深さとともに水温分布及び音速が変わってゆくと、季節によっては音速の極小部をもつサウンドチャンネルと呼ばれる海洋中の領域が生じるため、音波は、屈折による鉛直方向への発散がなくなり遠距離では円筒発散に近くなる。その結果、遠方まで影響を及ぼすことがある。

船舶からの水中騒音による生物への影響として次のことが挙げられている。生物の行動変化、聴覚感度の悪化、極端な場合は聴覚器官の損傷及び生息分布域や回遊経路への影響等である。なお、影響を受けやすい周波数は生物種によって異なる。(図1)<sup>3)</sup>

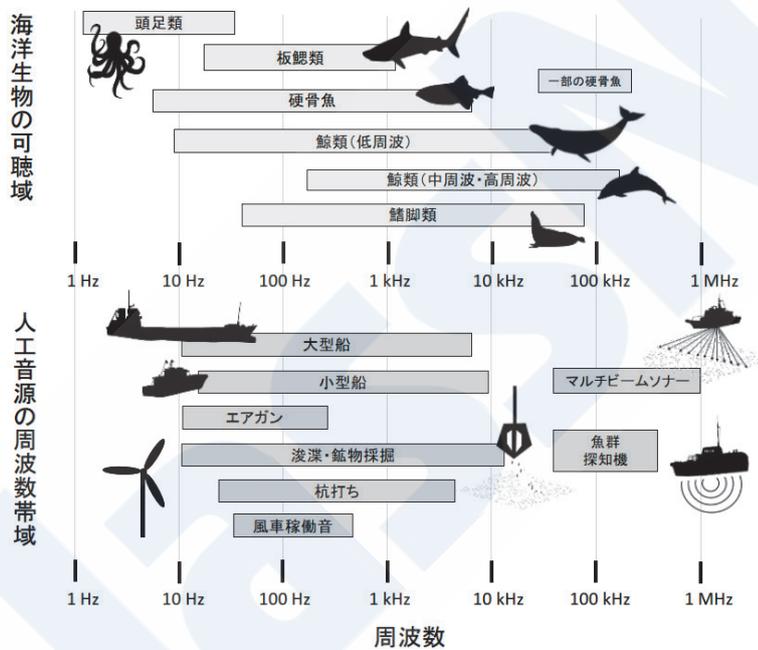


図1 水中騒音と海洋生物の可聴域

#### 4. 船級協会の中騒音ガイドライン

2014年に承認されたIMOガイドライン（以下、2014ガイドライン）に対応した船舶水中騒音に関するガイドラインを発行している船級協会は8機関あり、本会では、2023年10月に「船舶水中騒音ガイドライン（第1.0版）」を発行した。

本ガイドラインは設計要件、水中騒音計測および検査等の6章及び騒音低減対策例等をまとめた添付資料で構成されている。他船級協会同様、海底での音響反射の影響が極限されるISO 17208-1,-2に準拠した深海域での音響計測評価について規定している。本会の場合、水深150mまたは船長の1.5倍の大きい方以上という規定のほか(図2)、ハイドロホンと計測対象船の航路位置(図3)を規定しており、本会独自の基準騒音レベル(表1及び図4)に基づきノーテーション(SUN-Controlled, SUN-Advanced)を付与することとしている。

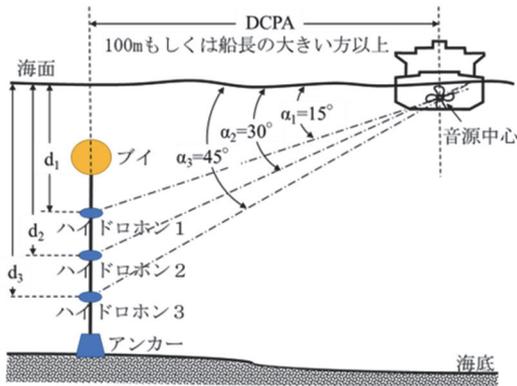


図2 着底式ハイドロホン設置例

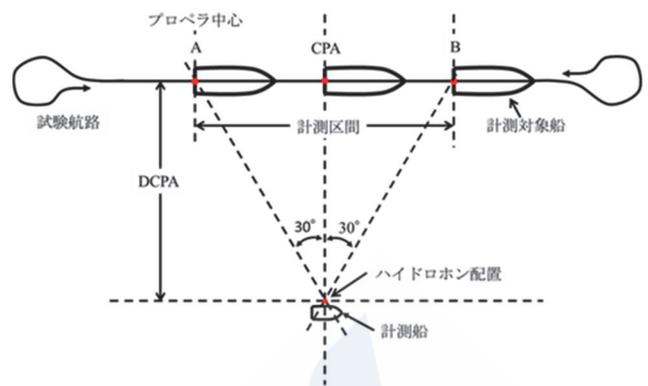


図3 水中騒音測定構成（試験航路等）

表1 基準騒音レベル（1/3オクターブバンド）

周波数 f(Hz)	限界音圧レベル(1/3 オクターブバンド) dB re 1μPa @1m			
	SUN-Controlled		SUN-Advanced	
20	175	SPL=4.365*LN(f)+161.9	160	SPL=4.365*LN(f)+146.9
50	179		164	
100	173		158	
1,000	154	SPL=-8.288*LN(f)+211.3	139	SPL=-8.288*LN(f)+196.3
10,000	135		120	

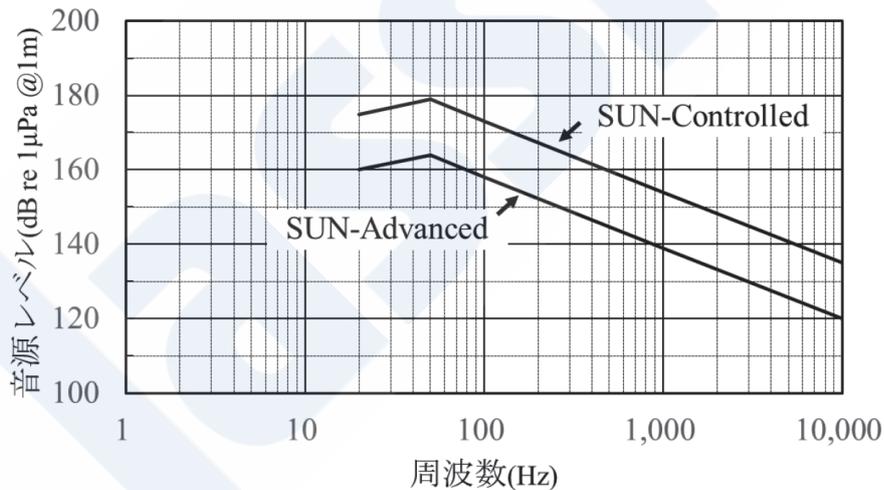


図4 基準騒音レベル（1/3オクターブバンド）

## 5. 船舶水中騒音の研究動向等とIMOガイドライン見直しの議論

### 5.1 各国における船舶水中騒音研究動向

EUにおいては、船舶水中騒音に関するSATURNとPIAQUOの2つの研究プロジェクトが実施されてきた。

SATURNは、船舶水中騒音による環境汚染は、海洋生物のコミュニケーション、採餌、捕食者からの回避行動を混乱させる可能性があるという観点に立っており、生物音響学の専門家を中心とした学際的なチーム構成となっている。

- ・水中騒音の発生源と、それが様々な海洋生物にどのように影響するかの理解を深める。
- ・水中騒音が海洋生態系に及ぼす影響（短期的および長期的な影響を含む）を特定する。
- ・これらの影響を軽減し、水中騒音による環境汚染を減らすためのソリューションを開発する。

以上の3項目を当該プロジェクトの目的としている。研究目標として、船舶水中騒音が生物に与える影響を測

定・評価するための標準と試験法の開発，商船等の船種の水中騒音の定量化等が挙げられている。プロジェクトの成果として，今後の船舶水中騒音管理に実効あるものとして重要である浅水域での騒音計測に関する報告書<sup>4)</sup>や貨物船の速度をわずかに低下させるだけで，海洋哺乳類への騒音の影響が大幅に減少することに関する論文<sup>5)</sup>等が公表されている。

PIAQUOは2019年から開始されたプロジェクトで，水中騒音汚染を最小限に抑えることにより，海上交通が海洋生物に及ぼす音響的影響を軽減させることを目的としている。このプロジェクトは，水中騒音低減を実現するソリューションを考案するメーカー及び研究所等が中心となっている。水中音響分野に強みのある，艦艇<sup>6)</sup>及び艦艇搭載センサー等を開発・製造している企業等も参画している。

PIAQUOプロジェクトの主な目標は以下のとおりである。

- ・水中騒音の排出を減らすための改良されたプロペラの開発。
- ・周辺環境で発生する水中騒音レベルを自己推定し，キャビテーションをリアルタイムで自己検出する船舶搭載システムの開発。
- ・海上の音響ブイによって測定された実際の音害データを含むデータベースを使用した，水中騒音の排出を削減するための船主向けの意識向上プログラムの創出。
- ・PAM（パッシブ音響リアルタイムマッピング）とAUV（水中無人機）を用いた，周囲の生態系と海上交通の調整機構の創出。
- ・船舶からの水中騒音問題に対処するための，公的機関および民間ステークホルダー向けの意思決定ツールの社会実装。

それらの目標が達成された場合の，定置ブイ，船舶搭載システム及び無人機を統合した水中騒音管理の将来像が示されている。<sup>7)</sup>

プロジェクトの成果として，ジェノバ港に設置された定置音響ブイによって，近傍を通過する個々の船舶からの水中騒音の評価が既に行われている。また，水中騒音船指数（NSI）という概念も当該プロジェクトで開発され，船主と管理者が要求に応じて水中放射騒音の状況と対策の進行状況等を追跡，認識するために利用することが考えられている。<sup>8)</sup>

カナダにおいては，バンクーバー港に入港する船舶の水中騒音を継続的に計測，評価をしている。静粛な船舶に対する入港料減免等の優遇措置を与えるEcoAction Program<sup>9)</sup>によって船舶水中騒音放射削減のインセンティブとしている。船級から水中騒音低減対策に関するノーテーションが付与された場合，入港料減免率としては最大となる75%が適用される。また，日本国産メーカーのプロペラ等の装着も減免の対象となる。

日本国内においても，日本財団の助成事業「船舶関係諸基準に関する調査研究」の一環として日本船舶技術研究協会による「水中騒音対策検討プロジェクト」が2015年から実施され，その中で様々の実証的な研究がなされている。その一例として，定期貨客船が就航する小笠原諸島の父島海域でザトウクジラを対象とした，船舶が通過した際における鯨類の反応行動調査（目視観測及び音響観測）が実施された。対象船の騒音暴露による鯨類への聴覚器官の損傷は考え難いこと及び鯨類の行動を分析した結果その生態に悪影響を与えているという明確な結論は得られなかったという所見が得られている。また，大型商船の航路となっている深度約300mの伊豆大島近海にハイドロホンを設置し，約500隻の通過船舶からの水中放射雑音レベルを取得して，通過船舶のAIS情報及び計測日の深度方向の海水温度分布情報を基にそのソースレベルを求めた。そのデータは本会の船舶水中騒音ガイドラインの基準騒音レベル策定の基本データとなっている。

## 5.2 水中騒音ガイドラインの見直しの議論

一度策定された2014ガイドラインだが，十分な数の大型商船への採用・実施がされていないこと加えて技術革新や科学的知見の蓄積により，ガイドラインの見直しが必要との認識のもと，2021年開催のMEPC 76においてカナダ，豪州及び米国の提案により新規作業計画が審議された（文書MEPC 75/14）。この他，欧州諸国を含む多くの加盟国・環境団体から14本の文書が提出され，SDC小委員会でガイドライン見直しとその後の行動計画の審議を開始することが決定された。同時に，IMO主導による世界規模の水中騒音プロジェクト（GloNoise Partnershipプロジェクト）の実施についても検討が開始された。

2年間の議論を経て，2023年開催のMEPC 80において，あらゆる商用船舶（貨物船／旅客船，新造船／既存船）を対象とした，改正ガイドラインが承認された（MEPC.1/Circ.906：以下，2023ガイドライン）<sup>10)</sup>。

さらに改正ガイドラインに対するフィードバックとベストプラクティスに関する情報，及び騒音低減を実現するためのメカニズムを確立するための情報の収集を主な目的とする「経験蓄積期間（EBP）」が2026年末ま

でに設定された。

### 5.3 2023ガイドラインの概要

2023ガイドラインの大きな変更点は、船舶から放射される水中騒音低減を実効あるものとするための騒音管理計画の作成が規定されたことである。それに記載される主要な項目は以下のとおり。

- ・ ベースラインとなる騒音レベルの設定（予測または実測によるものとする）
- ・ 目標とする騒音削減レベルの設定（段階的な強化の可能性あり）
- ・ 船舶にどのような技術面・運航面の措置を実施したか騒音削減アプローチの記載
- ・ 騒音削減措置の効果の定期的なモニタリングと評価
- ・ 水中騒音管理計画の主要関係者の役割

2014ガイドラインでは、水中騒音低減にコミットするステークホルダーは、船舶設計者、建造者及び運航者のみであったが、2023ガイドラインでは以下のようにステークホルダーの拡大とその果たすべき役割が規定された。

- ・ 船主：管理計画の策定・実施
- ・ 造船所：騒音要件を満たす設計・建造
- ・ 運航者：目標値や地域要件に適合した運航
- ・ 旗国海事当局：インセンティブ付与といった支援的取組
- ・ 船級協会：水中騒音予測手法、実海面での水中騒音計測試験、認証等の支援

これらの規定を実行するためのワークフローチャートがIMOによってまとめられており、それを抜粋したものを図5に示す。

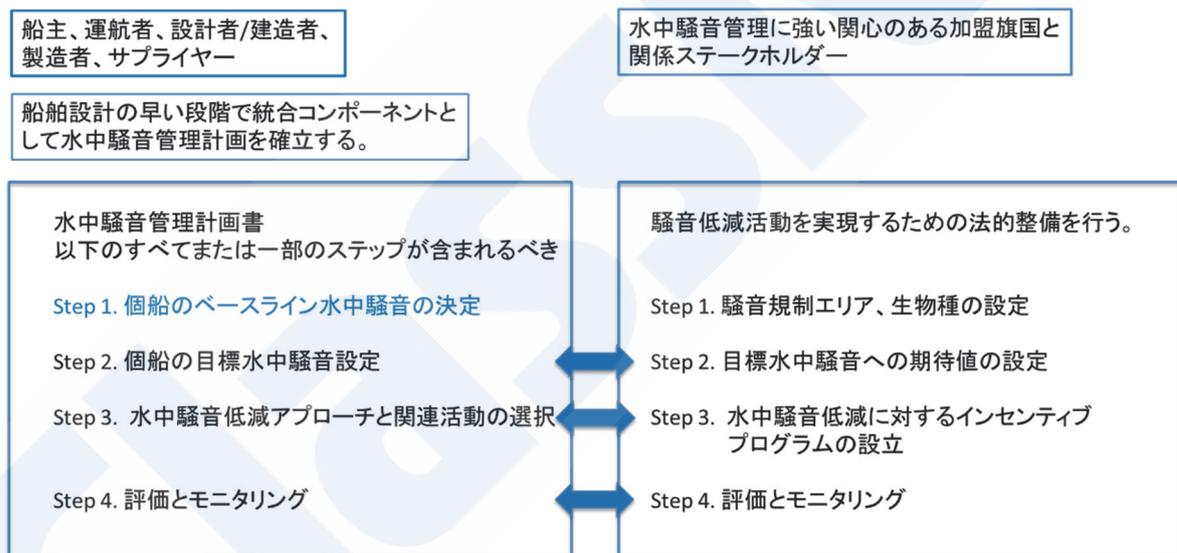


図5 2023ガイドライン ワークフローチャート（抜粋）

## 6. 2023ガイドラインへの本会の対応等について

2023ガイドラインでは「船級協会は合理的かつ実行可能な予測、試験、適切な水中騒音ノーテーション、認証などを通じて船主/建造者を支援する」と役割が規定されており、図5左側の水中騒音管理計画の各Stepに船級協会が関与することが期待されている。Step 1. 個船のベースライン水中騒音決定については「標準的な装置/機関を使用した通常の運転条件下でのベースライン水中騒音を予測する。実際に計測されることが望ましい」と規定されている。2014ガイドラインでは海面反射影響等が少ない深海域における計測法ISO 17208-1,-2に準拠することとなっているが、大型商船での計測はその高額な計測費用のため経済的なインセンティブがなく、計測例は限定的である。今後は合理的かつ経済的に実行可能な浅海域での水中騒音計測法ISO17208-3に準拠するものと考えられる。ISO17208-3規格は2025年中に正式に承認される予定であるが、海面反射影響の除去、試験海面のキャリブレーション等、計測精度に関する課題がある。なお、浅海域での水中騒音計測に係る技術的課題については、本号の「浅海域における船舶騒音計測について」の記事で解説しているので参照されたい。

2023ガイドライン付則には、船舶設計の最適化のための計算モデルの種類と水中放射雑音低減のための技術として以下のものが例示されている。

1. 流体騒音：CFD等を用いた船体周囲流場及びプロペラ性能の解析技術によって、キャビテーション等によって発生する水中騒音を予測。
2. 構造騒音：FEM, BEM, SEA等の解析技術を用いた、主機等に起因する水中騒音予測。
3. 水中騒音伝播：音線理論, ノーマルモード法等の水中騒音の長距離伝搬予測手法によって、船舶の水中騒音が対象となる生物等に与える影響を予測。

これらの技術は対潜水艦戦に代表される軍事と密接に結びついた領域でもあり、欧米等の先進的な軍需技術をベースとした一般商船にとって過度な規制が導入されないように留意する必要があるものと考えている。なお、本会は、1.の流体雑音の簡易推定法について調査を実施し、その成果は本号「海洋環境保全に向けた船舶水中騒音予測ツールの開発と活用」の記事で解説しているので参照されたい。

水中騒音管理計画書のStep2からStep4の各段階に対しても本会として今後取り組んでいくが、その基本的な考え方は以下の通りである。

#### Step 2. 個船の目標水中騒音設定：

ベースラインからの削減目標を、削減の絶対値, 削減率, 船級協会の船舶水中騒音ルール等に合わせて設定することと規定されており、本会として情報収集と情報発信を実施していく。

#### Step 3. 水中騒音低減アプローチと関連活動の選択：

設計, 運用技術, またはそれらを組み合わせたアプローチの組み合わせを特定し、選択することと規定されており、水中騒音低減のための船体付加物の取り付けや最適運行手法等に対するノーテーション付与について検討していきたい。

#### Step 4. 評価とモニタリング：

水中騒音低減アプローチの有効性を定期的に評価し、必要に応じて対応することと規定されており、船上に取り付けられる水中騒音モニタリングシステムの認証や船体クリーニング等の規則化等について検討していきたい。

船舶水中騒音規制について現時点ではその着地点について不透明感があるものの、本会は船級協会として関連ステークホルダーとの対話を深めつつ、合理的かつ実現可能な手法やツール等の整備を行い、船舶水中騒音にかかる懸念の解消に努めていく。

### 参考文献

- 1) IMO, GUIDELINES FOR THE REDUCTION OF UNDERWATER NOISE FROM COMMERCIAL SHIPPING TO ADDRESS ADVERSE IMPACTS ON MARINE LIFE
- 2) 三井昭島研究所HP：<https://akishima-labo.co.jp/modeltest/propellerperformancetest/>
- 3) 赤松友成：海洋音響学会2023年度第1回シンポジウム「水中音の計測と評価」、水中の音とその影響～ガイドランス概要
- 4) SATURN Technical Report, 2023：Final Report on Vessel URN Measurements
- 5) Charlotte R. Findlay et., Science Advances, 2023, Small reductions in cargo vessel speed substantially reduce noise impacts to marine mammals
- 6) Naval Group：<https://www.naval-group.com/en/environment>
- 7) PIAQUO GOALS：<http://lifepiaquo-urn.eu/en/goals/>
- 8) URN：<https://urn.quiet-oceans.com/>
- 9) Port of Vancouver：EcoAction Program  
<https://www.portvancouver.com/media/documents/ecoaction-program-brochure>
- 10) IMO, REVISED GUIDELINES FOR THE REDUCTION OF UNDERWATER RADIATED NOISE FROM SHIPPING TO ADDRESS ADVERSE IMPACTS ON MARINE LIFE

# 海洋環境保全に向けた船舶水中騒音予測ツールの開発と活用

白石 耕一郎\*

## 1. 緒言

商業船舶から発生する水中騒音が海洋生態系に与える影響については、国際海事機関（International Maritime Organization : IMO）において重要な課題として議論されている。2014年4月に開催された第66回海洋環境保護委員会（Marine Environment Protection Committee : MEPC 66）にて「海洋生物への悪影響に対応するための商業船舶からの水中騒音の低減に関する指針」（MEPC.1/Circ.833）が承認された。この指針は強制力を持たないものの、船舶の設計、建造、運用、保守の各段階における水中騒音低減のための方向性が提示されている。その後、2023年1月の第9回船舶設計・建造小委員会（Sub-Committee on Ship Design and Construction : SDC 9）において、指針の修正案が作成され、同年7月のMEPC 80にて、本修正案は「船舶からの水中騒音の低減のための改正指針」（MEPC.1/Circ.906）として承認された。改正指針には、水中騒音管理計画の策定が新たに盛り込まれている。この管理計画は、船舶の水中騒音の基準値設定、削減目標の策定、技術的・運用的な削減手法、および定期的な監視・評価という要素から構成されている。

このような状況を背景として、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（以下、海上技術安全研究所）では、実船の水中騒音レベルを算出するための水中騒音の簡易推定法の開発を進めている。本推定法は、設計段階の情報で実船の水中騒音レベルを推定できるという特徴がある。先行研究においては、Brownの式とHOPE Lightを組み合わせることによって、実船のプロペラキャビテーションノイズの速度影響を把握できることを明らかにしている<sup>1)</sup>。また、水中騒音推定精度の向上を目指して、キャビテーション面積の推定精度の改良を行っている<sup>2)</sup>。数値解析を活用してプロペラ回転数、前進係数、キャビテーション数などの主要因子を変動させてキャビテーション面積を推定し、その結果からデータベースを構築している。このデータベースをもとに、実用的なキャビテーション面積推定図表（以下、DBチャート）を作成している。そして、DBチャートを用いてキャビテーション面積を推定し、その値とBrownの式を用いて水中騒音レベルを算出している。

本稿では、海上技術安全研究所が開発している水中騒音の簡易推定法（以下、簡易推定法）を紹介する。そして、大島南沖におけるバルクキャリアの水中騒音の実船計測結果と簡易推定法の推定結果を比較し、本手法の有効性を検証した結果について報告する。

## 2. 水中騒音の簡易推定法

簡易推定法では、水中騒音の簡易推定式であるBrownの式を活用し、対象船舶の水中騒音レベルを算出する<sup>3)</sup>。この式に必要なパラメータについては、海上技術安全研究所が開発した船型要目最適化プログラム“HOPE Light”を利用して推定を行う<sup>4)</sup>。HOPE Lightへの入力データは、対象船のAISデータから抽出したものを使用する。従来法では、Burrillのチャート<sup>5)</sup>を用いてキャビテーション面積を推定していたが、このチャートは高速艇を主な対象としているため、一般商船に適用した場合にはキャビテーション面積を過小評価する傾向が見られた。そこで、改良法では、一般商船を対象としたキャビテーション面積推定チャートである「DBチャート」を新たに構築し、これを活用することでキャビテーション面積の推定精度を向上させ、結果として水中騒音推定法の精度も高めている。以下では、具体的な水中騒音レベルの推定方法について説明する。

### 2.1 Brownの式

簡易推定法では、船舶から放出される水中騒音は、Brownの式を用いて推定する<sup>3)</sup>。Brownの式は、実船の水中騒音計測結果から導出された経験式である。Brownの式を(1)式に示す。Brownの式では、プロペラ回転数、プロペラ直径、翼数、そして、キャビテーション面積に基づいて、約100Hz～10kHzの広帯域における水中騒

\* 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 流体設計系

音レベル (Sound Pressure Level :  $SPL$ ) の上限を推定することができる。

$$SPL = 10 \log \left( \frac{n^3 D_p^4 Z}{f^2} \right) + 10 \log \left( \frac{A_c}{A_D} \right) + K \quad (1)$$

ここで、 $SPL$  : 水中騒音レベル[dB],  $f$  : 周波数[Hz],  $K$  : 定数 (プロペラ :  $K = 163$ , スラスタ :  $K = 170$ ),  $n$  : プロペラ回転数[rps],  $D_p$  : プロペラ直径[m],  $Z$  : 翼数[-],  $A_c/A_D$  : キャビテーション面積比[-],  $A_c$  : キャビテーション面積[m<sup>2</sup>],  $A_D$  : プロペラディスク面積[m<sup>2</sup>]である。

簡易推定法では、Brownの式に必要な $n$ と $D_p$ はHOPE Lightを用いて推定する。HOPE Lightの概要は2.2節に述べる。翼数は、4翼に設定した。また、キャビテーション面積比の $A_c/A_D$ は、数値計算を用いて新たに作成したDBチャートから推定する。DBチャートの概要は2.3節に述べる。

## 2.2 HOPE Light

簡易推定法では、対象船の水中騒音レベルの推定に必要なパラメータを、船型要目最適化プログラム“HOPE Light”を用いて求める<sup>4)</sup>。本プログラムは、対象船の推進性能だけでなく、操船性、保針性等も求めることができる。また、対象船に適した主機関や補機等の燃料消費量も推定できるという特徴がある。

HOPE Lightの基本的な入力として、対象船の船種と主要目が必要である。これらの入力データは、AISデータと主要目データベースから取得できる。HOPE Lightから得られた計算結果から水中騒音レベルの簡易推定式であるBrownの式に必要なパラメータを抽出する。そして、水中騒音レベル推定のためのExcelシートを作成し、そのシートとHOPE Lightを連携することで、水中騒音レベルの算出を行う。

## 2.3 DBチャート

簡易推定法では、一般商船を対象としたDBチャートを新たに作成し、本チャートを用いてキャビテーションの発生面積を推定する。DBチャートの作成方法を以下に示す。まず、基準となるプロペラを選定し、そのピッチや展開面積を修正したプロペラ群を生成する。これらのプロペラ群について、数値解析を活用してプロペラ荷重度とキャビテーション数を変化させた際のキャビテーション面積を算出する。その後、数値計算から得られたキャビテーション面積のデータを整理することでDBチャートを構築する。

キャビテーション面積は揚力等価法<sup>6)</sup>を用いて求める。揚力等価法の適用の際に必要な伴流中のプロペラ翼表面の圧力分布の計算には九州大学が開発した簡便なパネル法 (SQCM : Source and Quasi-Continuous Method) に基づく非定常プロペラ性能計算法<sup>7), 8)</sup>を用いる。

DBチャートを作成するための原型プロペラとしてMAUプロペラを用いた<sup>9)</sup>。プロペラの翼数は4翼に設定した。プロペラのピッチ比と展開面積比を変更することで20枚のプロペラ群を生成した。そして、伴流分布としてバルクキャリア船型であるJBC<sup>10)</sup>、コンテナ船型であるKCS<sup>11)</sup>、タンカー船型であるKVLCC2<sup>11)</sup>の3種類を用いた。これら3船型の伴流分布を図1-図3に示す。また、DBチャートの内訳を表1に示す。20枚のプロペラ群を3種類の伴流分布において、プロペラ荷重度とキャビテーション数を変更してキャビテーション面積の最大量を推定し、その結果を整理することでキャビテーション面積推定チャートを作成する。本論文では、対象プロペラは、展開面積比 $a_E=0.6$ 、ピッチ比 $H/D_p=0.6$ の場合、MAU0606と表す。また、伴流分布がJBCで対象プロペラがMAU0606の場合のDBチャートはJBC-MAU0606と表す。

表1 Detail of cavitation occurrence area estimation charts.

Item	Num. of items	Parameter
Propeller Blade	1	MAU
Expand Blade Area Ratio ( $a_E$ )	4	0.4, 0.5, 0.6, 0.7
Pitch Ratio ( $H/D_p$ )	5	0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0
Wake Distribution	3	JBC, KCS, KVLCC2
Number of Charts	60	-

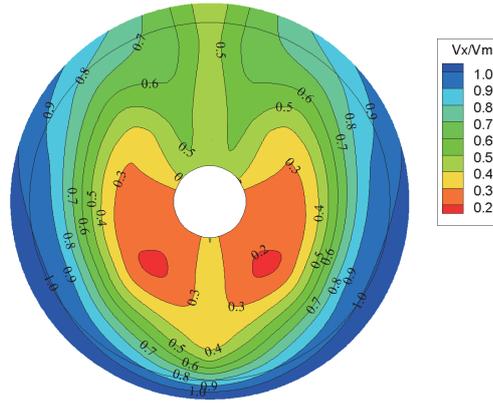


図1 Wake distribution of JBC.

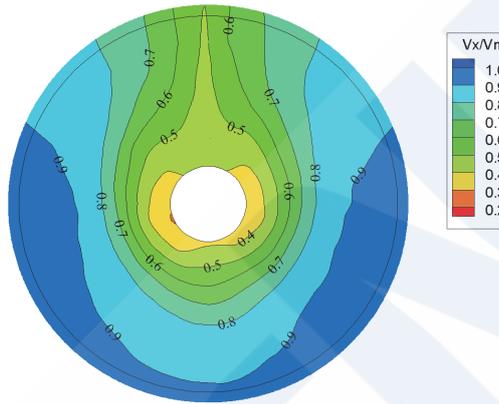


図2 Wake distribution of KCS.

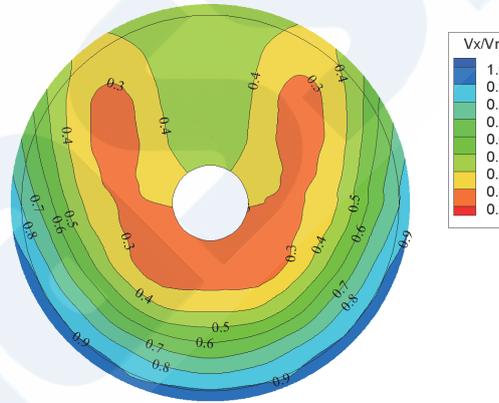


図3 Wake distribution of KVLCC2.

作成したDBチャートの一例として、伴流分布がJBCで、以下に示す6種のプロペラのキャビテーション面積を推定した結果を図4-図9に示す。

- ・展開面積比シリーズ：JBC-MAU0506, JBC-MAU0606, JBC-MAU0706
- ・ピッチ比シリーズ：JBC-MAU0607, JBC-MAU0608, JBC-MAU0609

図4-図9は、横軸にキャビテーション数 $\sigma_{0.7R}$ をとり、縦軸にプロペラ荷重 $\tau_c$ をとって、キャビテーションを発生させない上限を与える。 $\sigma_{0.7R}$ と $\tau_c$ はそれぞれ(2)式と(3)式で表される。プロペラ半径 $0.7R$ 位置の周速度 $V_R$ は(4)式で表される。

$$\sigma_{0.7R} = \frac{p - e}{1/2\rho V_R^2} \quad (2)$$

$$\tau_c = \frac{T}{1/2\rho A_p V_R^2} \quad (3)$$

$$V_R = \sqrt{V_A^2 + (0.7D_p\pi n)^2} \tag{4}$$

ここで、 $\tau_c$  : プロペラ荷重度[-],  $T$  : スラスト[N],  $\rho$  : 流体密度[kg/m<sup>3</sup>],  $A_p$  : プロペラ投影面積[m<sup>2</sup>],  $V_A$  : プロペラ流入速度[m/s],  $V_R$  : プロペラ半径0.7R位置の周速度[m/s],  $\sigma_{0.7R}$  : キャビテーション数 (0.7R位置) [-],  $p$  : プロペラ半径0.7R位置の水圧[Pa],  $e$  : 水蒸気圧[Pa],  $D_p$  : プロペラ直径[m]である。

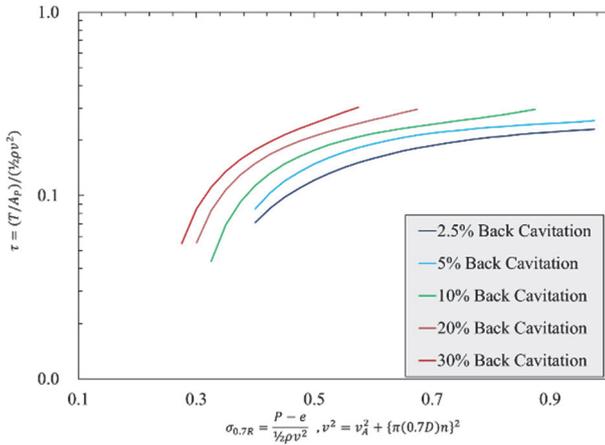


図4 Cavitation occurrence area estimation chart: JBC-MAU0506.

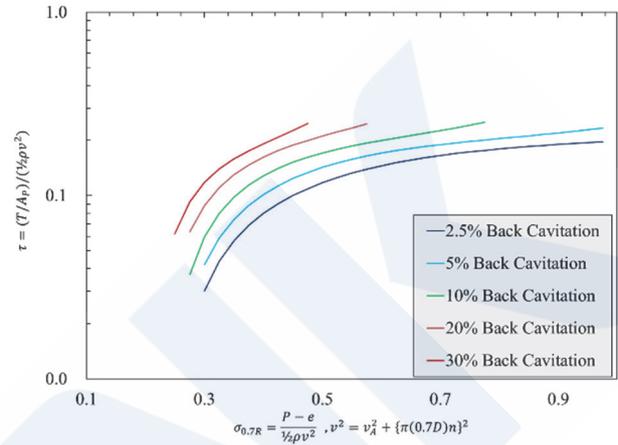


図5 Cavitation occurrence area estimation chart: JBC-MAU0606.

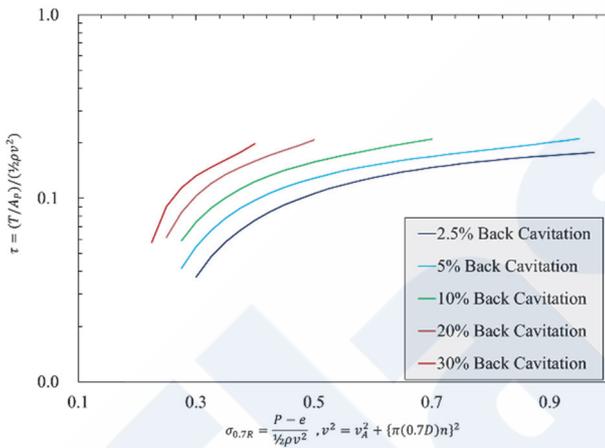


図6 Cavitation occurrence area estimation chart: JBC-MAU0706.

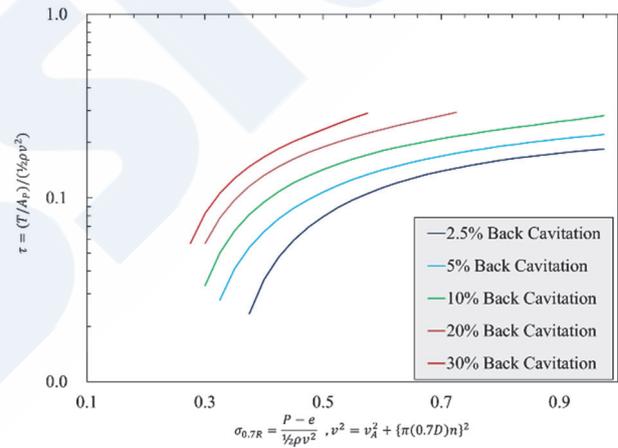


図7 Cavitation occurrence area estimation chart: JBC-MAU0607.

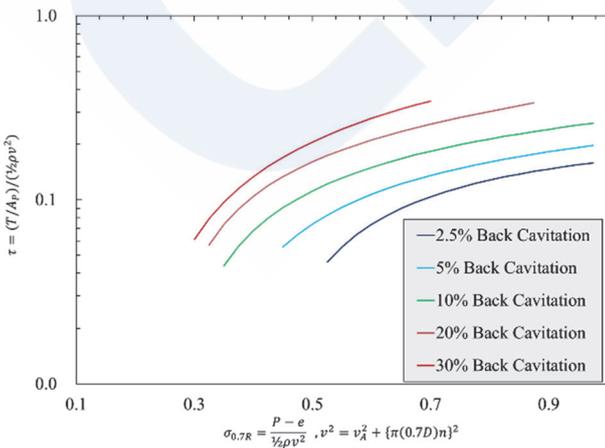


図8 Cavitation occurrence area estimation chart: JBC-MAU0608.

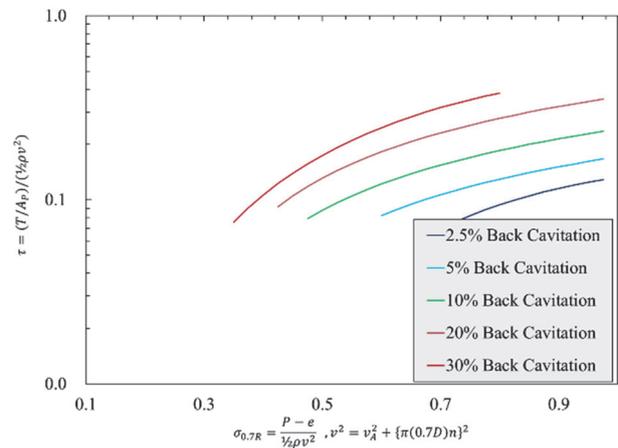


図9 Cavitation occurrence area estimation chart: JBC-MAU0609.

## 2.4 水中騒音推定法への実装方法

2.3節で述べたDBチャートをHOPE Lightに組み込み、DBチャートからキャビテーション面積を推定する機能を追加した。具体的には、本システムはHOPE Lightから出力される対象船のプロペラのピッチ比と展開面積比、そして、対象船の伴流分布に対応したDBチャートを探索する。そして、探索したチャートに基づいて、HOPE Lightから出力される対象船のプロペラ荷重度とキャビテーション数に応じたキャビテーション面積を算出する。その結果をBrownの式に代入することで、対象船の水中騒音レベルを推定する。

## 3. 実船計測データによる検証

簡易推定法の精度検証を行うために、実船計測による水中騒音データとの比較検証を実施した。過去の水中騒音対策検討プロジェクトにおいて取得された大島南沖での水中騒音実測値と、簡易推定法による推定結果を比較することで、簡易推定法の精度検証を行った。

### 3.1 大島南沖の実船計測の概要

水中騒音対策検討プロジェクトでは、大島南沖の海中に hidroホンを設置し、付近を航行する船舶の水中騒音データを収集している。本データを活用し、簡易推定法と実船計測結果の比較検証を実施した。実船計測データの詳細に関しては、Sakai他の論文<sup>12)</sup>に詳述されている。本解析においては、船長100m以上の大型船の実船計測結果を対象とした。また、大型船の測定データから、潮流の影響が限定的で、設計船速から航行船速が著しく乖離していないデータを選別した。具体的には、以下のようなフィルタリング条件を適用した。

- ・AISの対地船速と対水船速の差異が1kt以上のデータは潮流影響が顕著と判断し除外した。
- ・測定時の船速が設計船速の30%未満となっているデータは、異常値として除外した。

選別した実船計測データから、バルクキャリア5隻を抽出し、各船舶について水中騒音レベルの推定を行い、実船計測結果との比較を行った。抽出した対象船の主要目一覧を表2に示す。

表2 Principal particulars and ship speeds of bulk carriers used for verification.

No.	$L_{pp}$ [m]	$B$ [m]	$D$ [m]	$V_s$ [knot]
203	195	32	13	10
208	225	32	15	14
231	178	32	12	14
246	229	43	14	12
282	288	45	18	13

### 3.2 実船計測結果と推定結果の比較

3.1節に述べた対象船について、簡易推定法の従来法と改良法を用いて、実船の水中騒音レベルの推定を行い、推定結果と実船計測結果の比較を行った。図10-図14にバルクキャリアを対象とした実船計測結果と従来法と改良法による水中騒音推定結果を示す。図中の青マーカーのラインが実船計測結果、紺の破線が従来法の推定結果、赤の実線が改良法の推定結果を示している。図10-図14より、従来法に比べ改良法では水中騒音レベルの推定値が増加し、実船計測結果により近づく結果となっている。

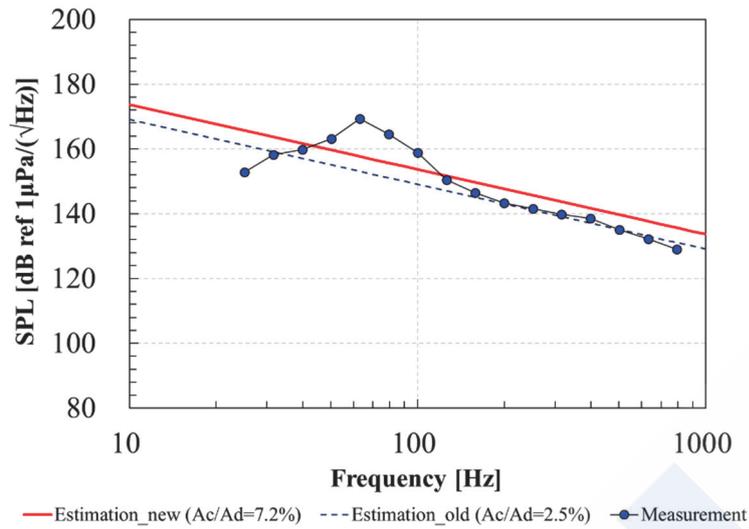


図10 The results of No.203 bulk carrier ( $L_{pp}=195\text{m}$ ,  $V_S=10\text{kt}$ ).

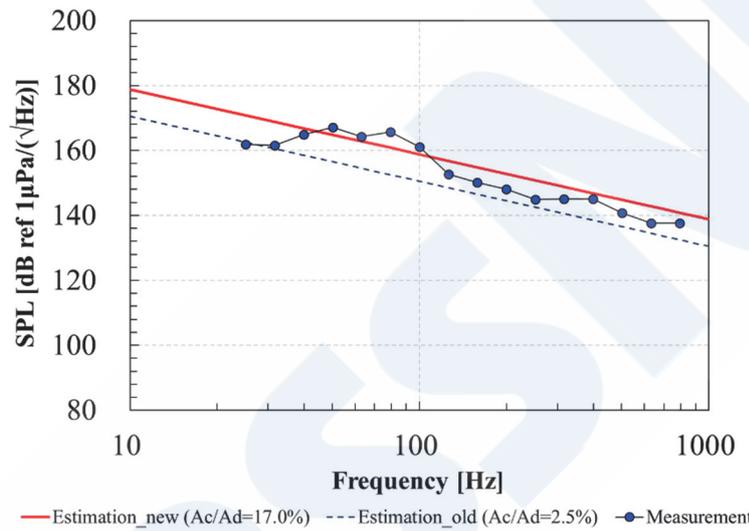


図11 The results of No.208 bulk carrier ( $L_{pp}=225\text{m}$ ,  $V_S=14\text{kt}$ ).

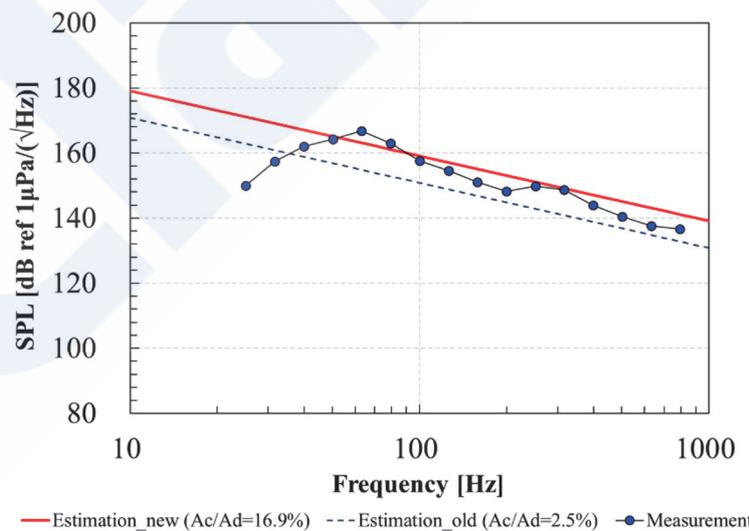


図12 The results of No.231 bulk carrier ( $L_{pp}=178\text{m}$ ,  $V_S=14\text{kt}$ ).

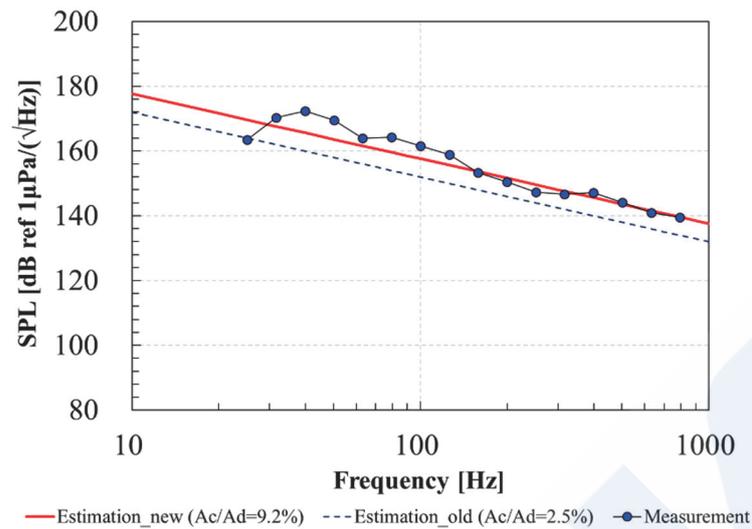


図13 The results of No.246 bulk carrier ( $L_{pp}=229\text{m}$ ,  $V_s=12\text{kt}$ ).

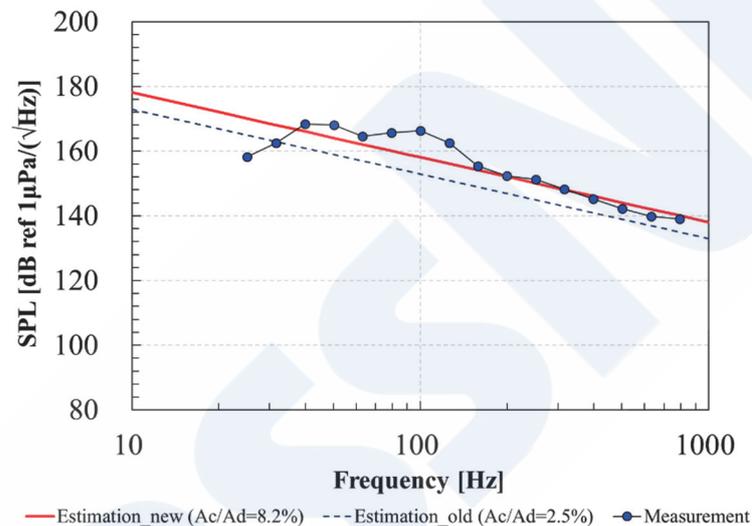


図14 The results of No.282 bulk carrier ( $L_{pp}=288\text{m}$ ,  $V_s=13\text{kt}$ ).

### 3.3 考察

3.2節に示した実船計測値と簡易推定法の推定結果を定量的に評価するため、両者の誤差評価を実施した。1/3オクターブバンドの各中心周波数における計測値と推定値の二乗平均平方根誤差 (RMSE : Root Mean Square Error) を算出し、従来法と改良法のRMSE比較により、推定精度の検証を行った。評価対象とした中心周波数は、25, 32, 40, 50, 63, 79, 100, 126, 158, 200, 251, 316, 398, 501, 631, 794[Hz]である。表3および図15にバルクキャリアに関するRMSE評価結果を提示する。従来法のRMSEが7.0[dB]であるのに対し、改良法では5.2[dB]という結果が得られ、約1.8[dB] (約26%) の精度向上が認められた。改良法の精度が向上した主な要因としては、プロペラのピッチ比と展開面積比、さらに伴流分布を考慮したキャビテーション面積推定チャートであるDBチャートを活用することで、プロペラ形状と船体形状を反映したキャビテーション面積をより正確に推定できるようになり、キャビテーション面積の予測精度が高まったことが考えられる。

表3 Results of RMSE assessments of bulk carriers.

No.	$L_{pp}$ [m]	$V_s$ [knot]	$RMSE_{old}$ [dB]	$RMSE_{new}$ [dB]
203	195	10.2	6.6	6.2
208	225	13.5	6.6	4.6
231	178	14.0	6.9	6.9
246	229	11.7	7.6	3.4
282	288	13.1	7.4	4.7
Average			7.0	5.2

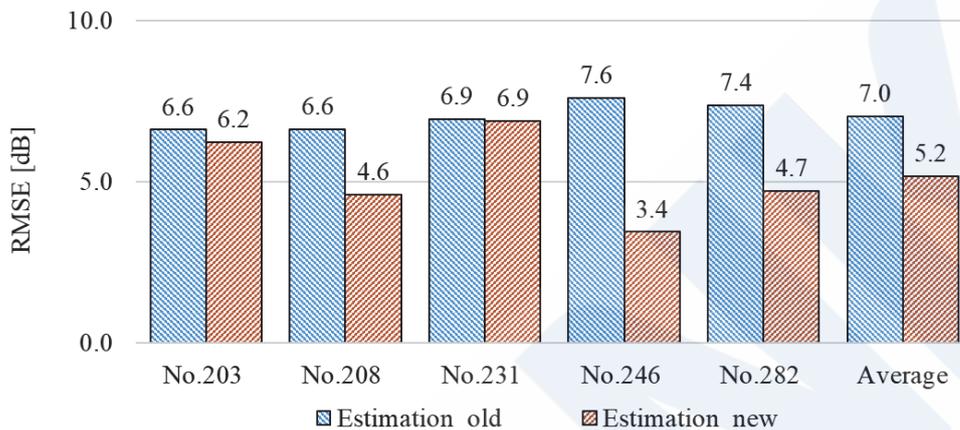


図15 Comparison of RMSEs for bulk carriers.

#### 4. 結言

本稿では、設計段階の情報で実船の水中騒音レベルを推定できる水中騒音の簡易推定法を紹介した。簡易推定法では、一般的な商船を対象としたキャビテーション面積の予測チャートであるDBチャートを構築し、このDBチャートとBrownの式を組み合わせることにより、水中騒音レベルの予測精度を向上させている。紹介した簡易推定法の特徴は以下の通りである。

- ・ 数値計算を活用し、通常の商船を対象とした独自のDBチャートを開発したことで、従来のBurrillチャートを用いた方法と比較して、キャビテーション面積の予測精度を高めている。
- ・ DBチャートを用いることで、プロペラの形状や船尾伴流分布を考慮したキャビテーション面積を高い精度で予測することが可能である。
- ・ 対象船のキャビテーション面積をDBチャートにより予測し、その結果をBrownの式に代入することにより、当該船舶の水中騒音レベルを推定する。
- ・ 大島南域で実施した水中騒音の実船計測データと比較検証し、改良を加えた簡易推定法の精度評価を行った。検証対象とした5隻のバルクキャリア船全てにおいて、改良法はBurrillのチャートを用いた従来法と比較して、水中騒音レベルの予測精度が向上していることを確認した。
- ・ 実船計測結果と簡易推定法について、1/3オクターブバンド分析における中心周波数でのRMSE値を評価した結果、平均RMSE値は従来法の7.0[dB]から改良手法では5.2[dB]へと減少しており、約26%の精度改善が達成され、より正確に水中騒音レベルを予測できる。

簡易推定法は、船舶の設計段階における水中騒音の評価や、IMOのガイドラインに準拠した水中騒音管理計画の策定において、極めて有効なツールとなることが期待される。

#### 謝辞

本稿に記載した研究の一部は、日本財団の助成事業として一般財団法人日本船舶技術研究協会が実施する水中騒音対策検討プロジェクトの調査研究として行われた。また、報告した研究の一部はJSPS科研費JP22H01708の助成を受けて実施された。ここに関係各位に深く謝意を表す。

## 参考文献

- 1) K. Shiraishi, K. Kume, D. Arakawa and H. Kamiirisa, Verification of simplified underwater radiated noise estimation tool using Brown's formula, Proceedings of INTERNOISE2023, 2023.
- 2) K. Shiraishi, D. Arakawa, Y. Kawanami and K. Kume, Improvement of Simplified Estimation Method for Propeller Cavitation Noise, Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 39, pp. 771-775, 2024. [in Japanese]
- 3) N. A. Brown, Cavitation Noise Problems and Solutions, Proceedings of International Symposium on Shipboard Acoustics, 21-38, 1976.
- 4) Y. Ichinose and K. Kume, A Program named "HOPE Light" for Optimizing Hull-Form Dimensions, Papers of National Maritime Research Institute, Vol.15, No.4, 2016. [in Japanese]
- 5) Burrill, L. C. and Emerson, A., Propeller Cavitation, Further Tests on 16 in Propeller Models in the King's College Cavitation Tunnel, International Shipbuilding Progress, Vol. 10, No. 104, pp. 119-131, 1963.
- 6) H. Kato and Y. Ukon, Estimation Methods for Propeller Cavitation, Symposium on Resistance and Propulsion Theory for Ship Hull Design, pp. 189-216, 1979. [in Japanese]
- 7) J. Ando, S. Maita and K. Nakatake, A Simple Surface Panel Method to Predict Steady Marine Propeller Performance, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 1995, Issue 178, pp. 61-69, 1995. [in Japanese]
- 8) S. Maita, J. Ando and K. Nakatake, A Simple Surface Panel Method to Predict Unsteady Marine Propeller Performance, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 1997, Issue 182, pp. 71-80, 1997. [in Japanese]
- 9) A. Yazaki, M. Takahashi and J. Minataka, Open Water Test Series of Modified AU-type Five-Bladed Propeller Models of Area Ratio 0.80, Journal of Zosen Kiokai, Vol. 1967, No. 122, 1967.
- 10) Proceedings of Tokyo 2015 a Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics, Vol. II & Vol. III, 2015.
- 11) L. Larsson, F. Stern and M. Visonneau, Numerical Ship Hydrodynamics / An assessment of the Gothenburg 2010 Workshop, 2014.
- 12) M. Sakai, R. Haga, T. Tsuchiya, T. Akamatsu and N. Umeda, Statistical analysis of measured underwater radiated noise from merchant ships using ship operational and design parameters, The Journal of the Acoustical Society of America, Acoustical Society of America (ASA), Vol. 154, No. 2, pp. 1095-1105, 2023.



# 浅海域における船舶騒音計測について

村山 智希\*

## 1. はじめに

2023年7月のIMO/MEPC80において非強制であるが水中騒音管理計画の作成等を規定したガイドラインが採択された。それに合わせClassNKは2023年10月に新たなガイドライン「船舶水中騒音ガイドライン（第1.0版）」を発行した。2023ガイドライン（\*1）に規定されているISO 17208-2準拠の深海域での船舶騒音計測に加え、ISOにおいて計測がより容易となる浅海域に対応した新たな規格ISO 17208-3の策定作業がすすめられており、EU（Saturn Project）ではその計測法に関する実証的な評価も進んでいる。

それらを鑑み、日本固有の制約、例えば水深や海流、航路等を考慮したシステムを検討中である。今回日本沿岸域（浅海域）における船舶騒音計測について検討の一部を紹介する。

## 2. 2023ガイドラインにおける音響計測

2023ガイドラインでは船舶騒音計測における諸元が提示されている。その計測条件に関して簡単に整理した。

### 2.1 計測箇所（2023ガイドライン5.2項抜粋）

次の2点が示されている

- (1) 水深が150m以上、もしくは船長の1.5倍以上のいずれか大きい方
- (2) 交通量の輻輳しない海域

※設定理由として、(1)は騒音の発生周波数の最大波長を発生元の大きさから勘案していると理解。  
上記(2)は計測の安全性や計測における背景雑音の影響低減を意図していると理解。

### 2.2 計測条件（2023ガイドライン5.2項抜粋）

ビューフォート風力階級、風浪階級、主機関出力等規定されている。

※計測時における背景雑音、計測対象の信号レベルの大きさ掌握が目的と理解。

### 2.3 計測手順（2023ガイドライン5.4項抜粋）

次の手順が記載されている。

- (1) 計測は、機器の使用に精通した者により実施されること。
- (2) 計測中の船内においては、原則として、操船に必要な人員及び計測員以外の立ち入りは認められない。
- (3) 計測区間は、ハイドロホンを中心として $\pm 30^\circ$ の範囲とする。
- (4) 航行及び計測回数は、ハイドロホンを右舷側及び左舷側にして2回とする。
- (5) ハイドロホンまでの最接近距離は100mもしくは船長の大きい方以上とする。
- (6) 計測に使用するハイドロホンは全指向性で、3台を着底式、浮体式または支援船からの吊り下げて設置する。
- (7) ハイドロホンは事前に校正しておくこと。
- (8) 周波数帯域：10Hz～10kHz

以上「肝」となる部分を抽出してみたが、かなり詳細まで定められている。

これら提示された計測諸元を活かしながらも課題の提示、対策と共に計測環境を提案する。

\* 沖電気工業株式会社

\*1 2023年10月ClassNK発行 船舶水中騒音ガイドライン（第1.0版）

### 3. 計測方式の違いによる2つの方式

次頁図1, 図2は2章に示したガイドラインを元にそれぞれ浮体式と着底式での計測イメージ図を示したものである。計測対象船舶に対し相対角度±30°に受波器を配置した場合、ガイドラインより水深は船長の1.5倍要とあるので、100mの船長で150m水深、その時計測系のCPA (Closest Point of Approach) から受波器アレイまでの水平距離は100m必要となる。同様に400m船長で水深は600m, CPAからの必要距離は400mに及ぶ。なお、船舶がCPAに向かい、船速を安定させるための距離、左舷右舷を計測するための旋回を考慮すると概略で計測に必要な海域エリアは数平方kmに及ぶと想定する。

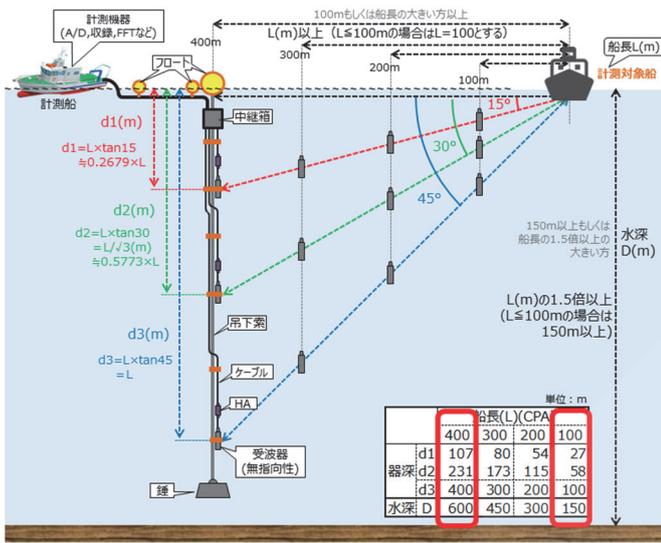


図1 浮体式イメージ図

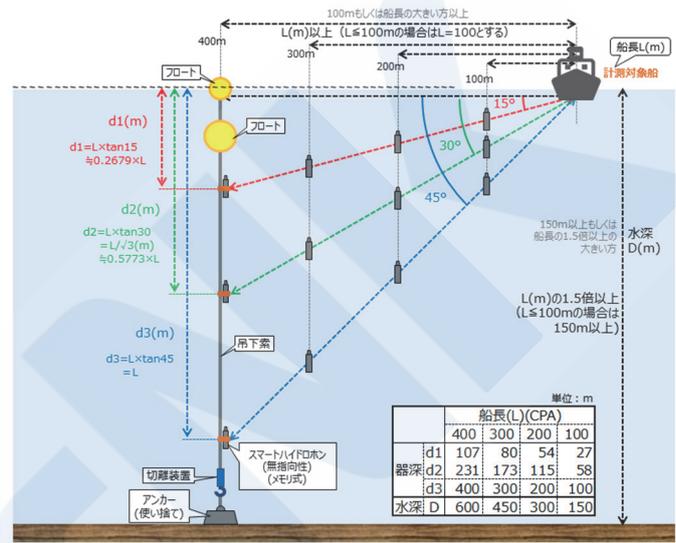


図2 着底式イメージ図

図2の着底式では図1のように計測船配置も考えられるが、受波器アレイの設置及び揚収の困難さから常設が望ましく、近傍の陸地まで有線で計測用及び給電用に光ファイバ、電線等を設置、陸地の計測所で計測するという形がより効率的である。その場合、海に係留式アレイが常設されることとなり航行船舶の障害となり得るので、海域立ち入り制限やその啓蒙、警告表示ブイ設置等が必要となる。また、浮体式、着底式共に実計測時には警戒船の配置等も状況に応じて必要と想定する。

### 4. 音響計測の課題と対策案

#### 4.1 計測時の課題

まず、前述した船長400mの場合の必要水深600m確保に純粹に従った場合の候補海域を絞ってみる。次頁図3に示す通り、日本近海においては概ね赤い点線の外側となる。近くに海溝がある場合を除くが、沿岸から100km程度離隔しないと計測可能海域に到達しない。計測ポイントに到達したとしても深度600m以上の海域では3章図2の常設可能な着底式の場合、設置費用及び維持メンテナンス費用も膨大となることが容易に予測される。可能な方式は3章図1の浮体式かもしれないが、それにしても計測エリアまで出向いて投入計測準備から計測終了まで考慮すると費用が大きく嵩むことが容易に想定される。

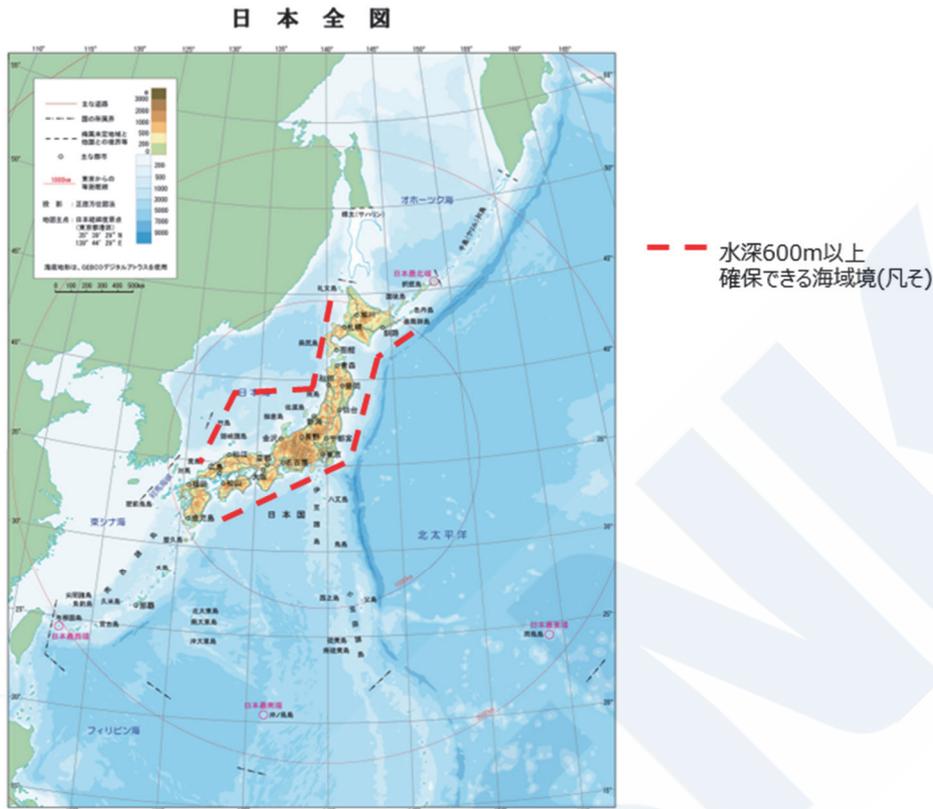
2023ガイドラインに則り、水深600m以上のエリアに出向いて船舶騒音を計測すること自体は可能ではある。しかし、上述のように計測規模及び期間は大きくなる。「計測場所が遠方&手間を要する場所に限られる」ということが、実運用を見据えた場合の最初に想定できる第一の課題と言える。

では、逆にどのような場所、計測のタイミングが船主の負担減となるかを運用面から検討してみたい。まず、計測のタイミングとしては、新造船建造時、ないしは、保守メンテナンス（法定点検）時が良いと考える。

次に場所だが、造船所周辺で計測できるのが良いと考え、日本の主要造船所が集中する瀬戸内海を運用エリアと仮定してみた。この条件で計測システムの検討を始めてみる。次頁図4は日本の主要造船所の分布を示すが、船舶水中騒音の計測は新造時及び保守メンテナンス（法定点検）時に実施される場合、これらの造船所周辺で

計測できることが望ましい。

但し、ご承知の通り瀬戸内海は前述した水深600mの確保どころか100mの水深確保も厳しい。



出典 国土交通省 国土地理院

図3 日本近海の水深 水深600mを確保できるエリア

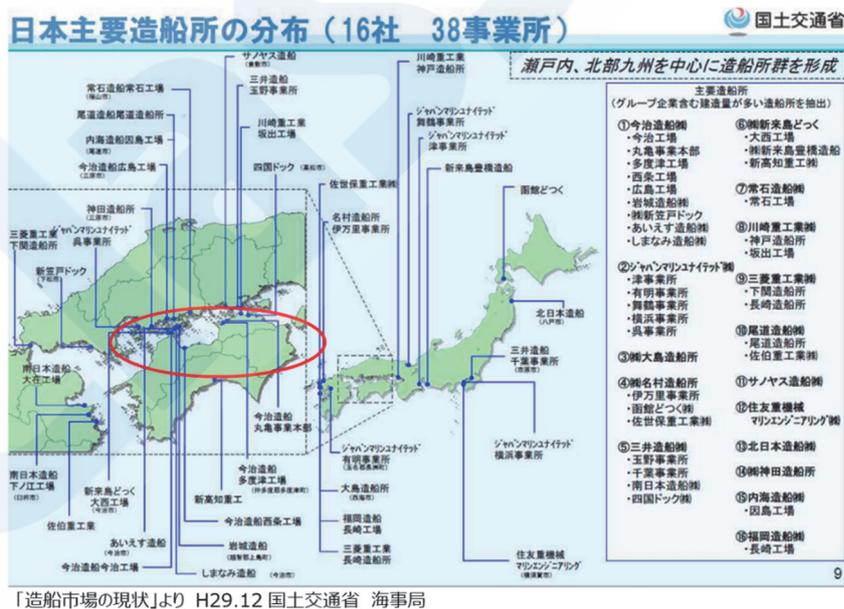


図4 日本の主要造船所の分布

ところで、そもそも、ガイドラインに「水深が150m以上、もしくは船長の1.5倍以上のいずれか大きい方」と謳われているが、技術的考察からその縛りを解くことを勘案してみる。まず一つ目のガイドライン記載の想定理由に、10Hz以上の周波数を計測対象としており、音速=周波数×波長から10Hzにおける一波長の150m換算から来ている可能性がある。但し、水平方向のモード伝搬を考慮するに伝搬のモード理論の背景から、第一モード=1/4波長=150/4m=37.5mの水深でも水平方向への伝搬自体は可能と考える(伝搬のカットオフ周波数

の図を後述)。

二つ目の想定理由として、計測時の海面、海底反射の影響を出来るだけ除去したいことから、海底反射のパス経路を出来るだけ長く取り距離減衰を狙って海底反射影響の低減を狙った可能性がある。但し、ある程度水深を確保して海底反射影響部分を多少軽減するにしても単一素子での計測では海面反射経路を含む干渉による影響は多分に残ると容易に予想される。

何れにしても上記二つ目の、海面、海底反射の計測への影響が非常に大きいと考える。それを加味し、第二の落とし込んだ真の課題として、「浅海域における海底及び海面反射の計測の影響を極力低減した計測方式を構築し、計測場所を出来るだけ近傍で確保する」を設定する。(再掲:「計測場所が遠方&手間を要する場所に限られる」を実運用を見据えた場合の最初に想定できる第一の課題としていた)

#### 4.2 浅海域計測方法の提案

下記図5は瀬戸内海(平均水深38m)を適地と仮定した場合の左図及び上図が浮体式、右図及び下図が着底式の計測イメージとなる。水深が38mになっただけで2023ガイドラインと変わらないように見えるかもしれないが、よく見ると受波器の数が3個から5個に変わっている。何故深度が浅くなったところで受波器を増やす必要があるのか?これが、今回提言する計測方式による前述した課題解決策、「海面、海底反射波の干渉影響を平均化の効果によって低減させるため」という目的実現のため、シミュレーション結果を反映したものとなる。以降、マルチパスの影響をシミュレーション、考察した結果を示す。

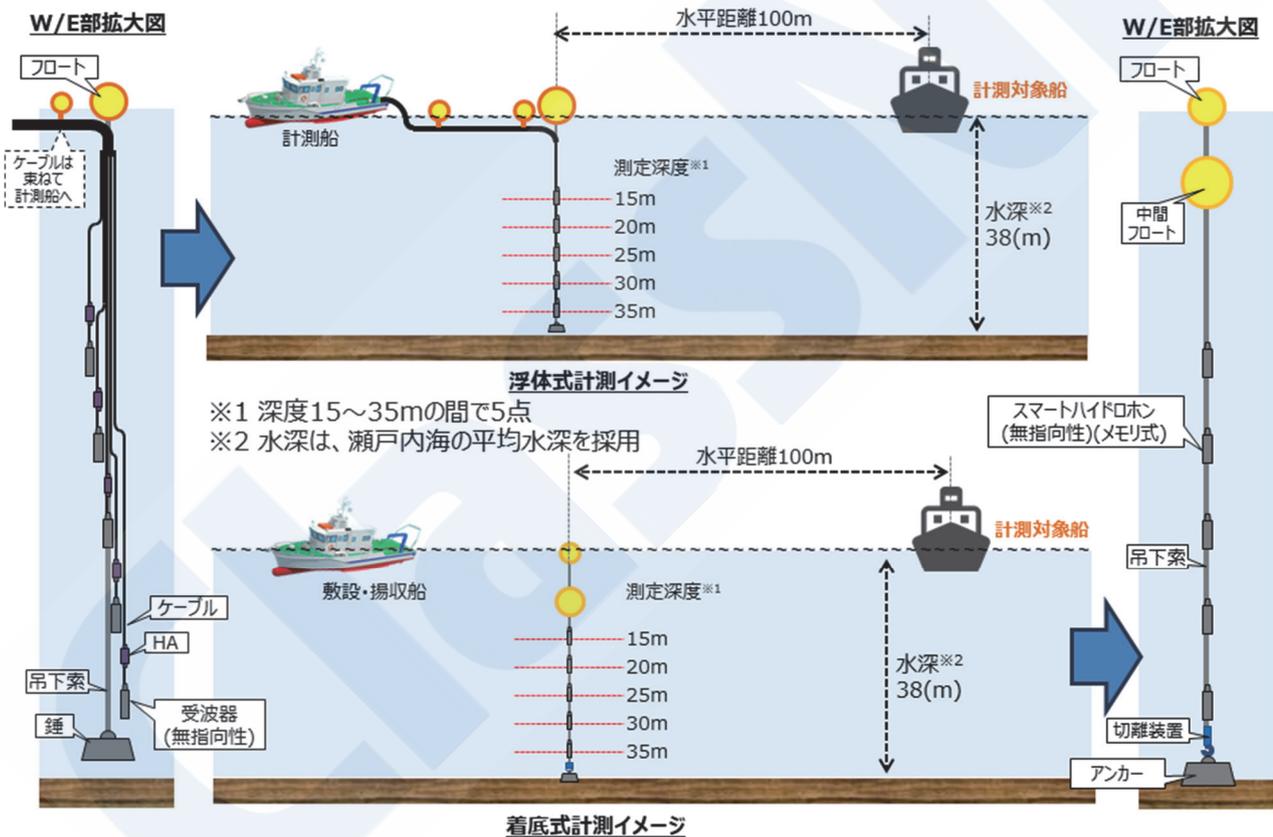


図5 浅海域における測定提案イメージ図

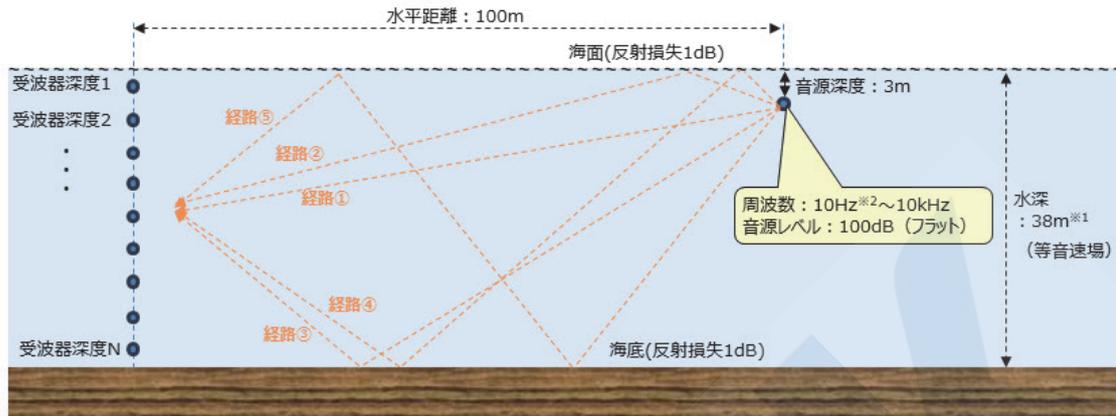
シミュレーションに当たっては、深度を2海域で考えてみた。一つは瀬戸内海の平均水深38m条件、もう一つは追加で豊後水道海域等を意図し、水深80mで考慮してみた。

##### 4.2.1 瀬戸内海(平均水深38m)海域での検討

図6に瀬戸内海(水深設定38m)でのマルチパス環境下での音波干渉状況のシミュレーション設定内容を示す。

受波器深度を細かく振って深度毎のマルチパス干渉状況を示す。音源深度は3m、音の経路は①直接波、②海面一回反射経路、③海底一回反射経路、④海面(先)一回、海底(後)一回反射経路、⑤海底(先)一回、海面(後)一回経路の5経路の干渉結果を、伝搬条件を球面拡散として加味して加算して算出する。反射損失は海面、海底とも1dBと設定した。

なお、図6の右下に、先に後述すると記載した下限周波数は、剛体で閉じられた空間のカットオフ周波数（出典：海洋音響の基礎と応用）から、下限10Hzでも水深38mで何とか満たすことも示しておいた。



経路①～⑤の反射回数は下表の通り。

	海面反射	海底反射
経路①	0回	0回
経路②	1回	0回
経路③	0回	1回
経路④	1回(先)	1回(後)
経路⑤	1回(後)	1回(先)

※1 水深は、瀬戸内海の平均水深を採用

※2 下限周波数は、剛体で閉じられた空間のカットオフ周波数（下図）を採用

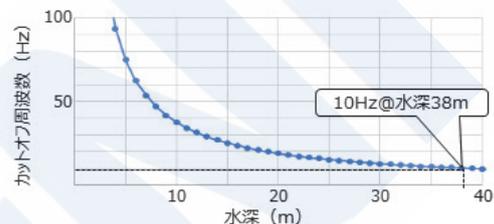


図6 マルチパスシミュレーション条件（瀬戸内海平均水深38m）

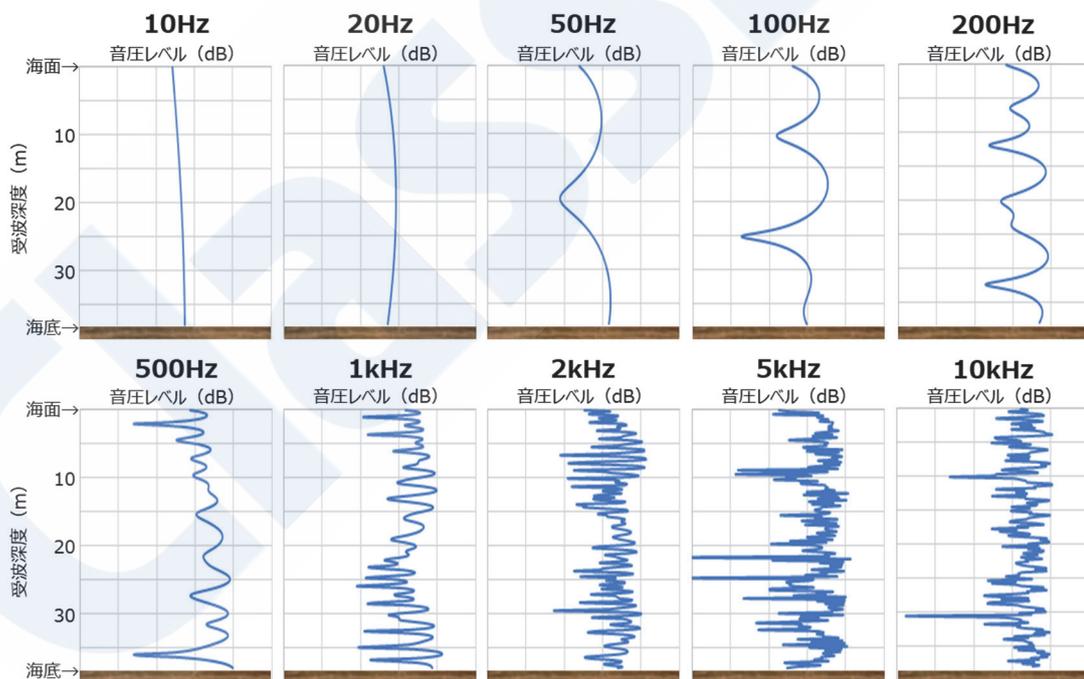


図7 受波器深度毎の周波数によるマルチパス干渉によるレベル変動状況

図7が、図6の条件の時に受波器深度を海面から海底まで振った時のマルチパスの加算によるレベル変動状況を周波数毎にプロットした結果である。そこから言えることは2点、「①周波数によって変動量は異なるものの、受波器深度によってマルチパスの経路差により干渉の影響が変化、音圧レベルに大きな変動が生じるので、（周波数にもよるが）受波器1個での計測は望ましくない」「②複数受波器を用い、音圧レベル変動の山谷を一様に受信し平均的なレベルを計測する方法が良い」である。

ここで、念のため、改めて干渉によりレベルが変動する原理を示しておく。

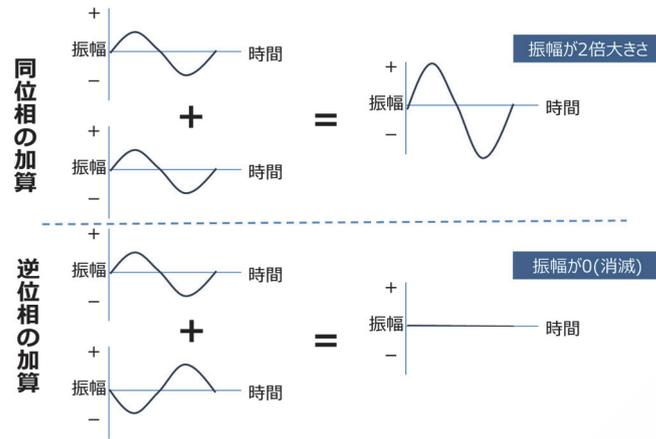


図8 二つの受波器の同位相加算，逆位相加算の様子

例)経路①と経路②の伝搬時間差による干渉の影響

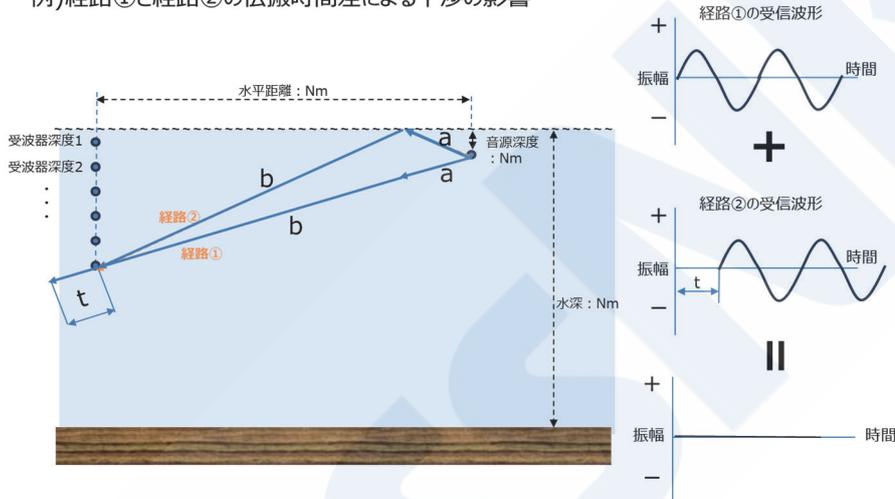


図9 経路差異の2波の加算状況（遅延時間が波長の半分ずれ逆相加算になった場合）

図8は、二つの波が干渉して、加算後にレベルが増加して2倍になる場合と、打ち消し合って消滅してしまう極端な例である。

図9では、図8の二つの波を直接波と海面反射波の干渉で例示する。反射波遅延時間 $t$ が波長の整数倍であり同相である場合、レベルは仮に海面反射の減衰分及び経路長減衰差分を除くとした場合には、完全な同相加算となり2倍になる。逆に減衰の例として反射波の遅延時間 $t$ が波長の整数倍に対して更に $1/2$ 波長分ずれていると、互いの波は打ち消し合う。海面反射減衰と経路差長分の減衰差がないとすると完全に逆相となり、打ち消し合って信号が消えてしまうことになる。

これらの干渉影響を簡易に低減するには、受波器を深度方向に何個か設置しての平滑化が効果的である。

(※海面、海底反射の影響を低減するもう一つの策に、計測アレイへの指向性の付与が挙げられるが、特に低周波においては音響開口が取れないことによる指向性形成が困難な点や、指向性付与＝システム規模の大幅な増大から、ここでは一番平易で効果があると考える多数の受波器による平滑化運用で勘案することとした)

ところで、図7の深度毎の受波器のレベル変動状況を再度横並びでプロット、「計測結果の暴れ方」状況を考察し、受波器の深度方向への何個かの設置例を提言したい。図10に受波器設置深度による周波数干渉状況を横並びで再掲する。

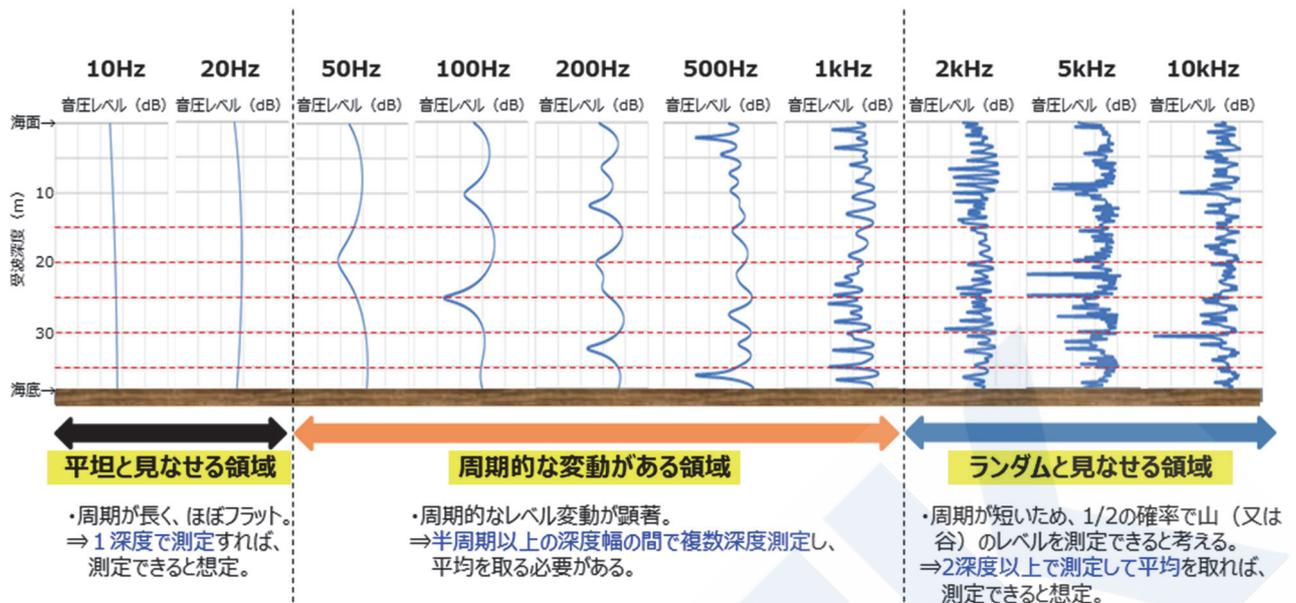


図10 周波数毎の受波器設定深度毎のレベル変動状況 追加考察（瀬戸内海水深38m）

ご覧の通り20Hz以下では干渉によるレベル変動周期は長く、ほぼフラット、1深度での計測でも基本的には計測できると想定する。50Hz～1kHz程度では周期的なレベル変動が顕著であると考え、半周期以上の深度幅の間で複数個の深度別計測を実施、平均を取る必要があると考える。2kHz以上では変動周期が短く2深度以上の計測で平均を取れば計測できると考える。

改めて要約、推奨する受波器数と設定深度を下記に記す。

- ① 周波数によって深度方向の音圧レベル変動の周期が異なり、3つの領域に分けられる。
- ② 複数受波器を使用して平均的なレベルを計測する方法として、以下の条件が良いと考える。
  - ・計測深度帯：15～35m（50Hzの結果において、約半周期をカバーするように設定）
  - ・受波器数：5個（50～500Hzの結果において、複数の山谷をカバーするように設定）
 深度15～35mの間で5点（15、20、25、30、35m）（図10の赤点線）計測を推奨したい。

なお、実際には船舶が一定速度で航走し、受波器アレイのCPAを横切って通過するわけだが、CPA通過の±数秒の時間計測を行うため、時間方向の平均も加わる。この数秒の航走距離分の経路差は少ないが、2kHz以上のランダムな経路差分の平均には更に十分寄与してくると考える。

#### 4.2.2 豊後水道付近相当（平均水深80m）海域での検討

最後に水深条件を豊後水道付近相当、80m水深に変えてシミュレーションしてみた。設定条件を図11に、周波数毎の干渉状況と設置受波器の推奨深度を図12に示す。

経路の5経路含め、水深設定以外は設定条件は同じである。水深が深くなった分、カットフ周波数も5Hz付近まで下がってくる。

図12を見ていただいで分かるように水深38m時の場合と同様、マルチパスの干渉で受波器設定深度によって音圧レベルに大きな変動が生じるため、受波器1個での計測は望ましくない。水深38m時と同様、複数受波器を用い、音圧レベル変動の山谷を受信し、平均的なレベルを計測する方法が良い。

図12の結果を瀬戸内海（水深38m版）と同様に考察するに、ほぼ変わらない結論となった。

- ① 周波数によって深度方向の音圧レベル変動の周期が異なり、3つの領域に分けられることは同様である。
- ② 複数受波器を使用して平均的なレベルを計測する方法として、以下の条件が良いと考える。
  - ・計測深度帯：30～70m（20Hzの結果において、約半周期をカバーするように設定）
  - ・受波器数：5個（10～200Hzの結果において、複数の山谷をカバーするように設定）

⇒深度15～35mの間で5点（15、20、25、30、35m）（図10の赤点線）

敢えて水深38m（瀬戸内海）の場合との差異を記載すると、ランダムと見なせる領域が更に広がっている。周期的な変動がある領域の計測が受波器数5個を生んでいる訳で、計測水深を更に深くすれば2023ガイドラインに近づき、3個の受波器の平均になってくると予想される。

既にお話した通り、2023ガイドラインに完全に則とすると、水深確保のために計測適地は限定され、シス

テムは大型化し、船主負担も大きくなる。今後は、「場所を選ばず（あまり限定せず）、出来るだけ容易に計測できるシステムのより具体化」が継続検討課題となると考え、最後に今後の推進案に関して記載したい。

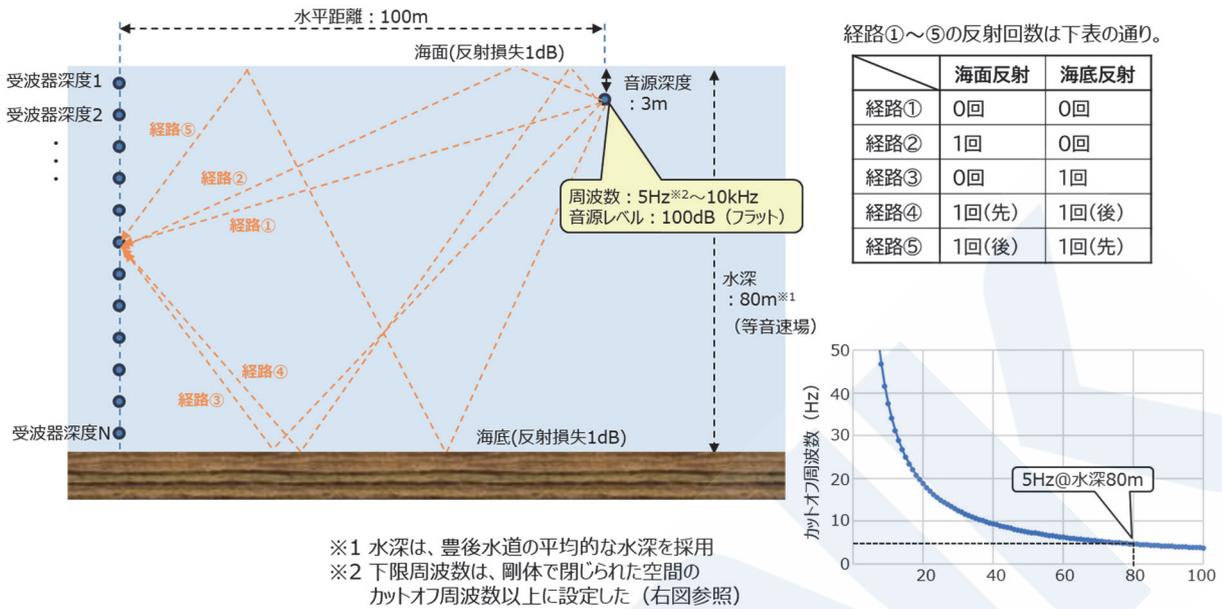


図11 マルチパスシミュレーション条件 (豊後水道付近水深80m)

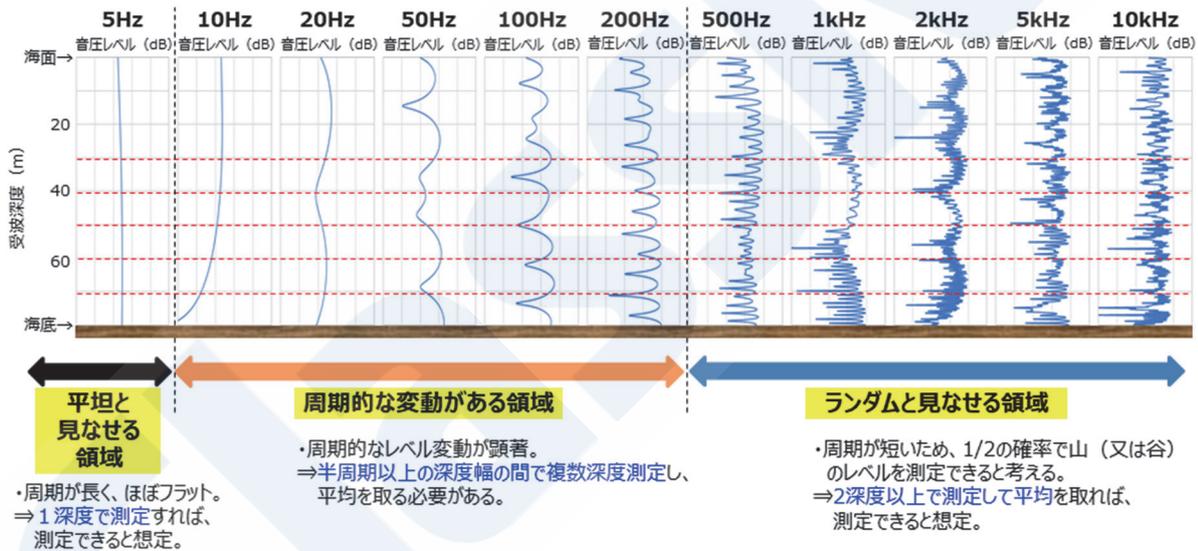


図12 周波数毎の受波器設定深度毎のレベル変動状況 追加考察 (豊後水道付近水深38m)

## 5. 今後の推進案

今後想定される船舶騒音計測の規制を考慮し、日本に適した方法で、且つ船主にとって負担が少ない方法を海洋産業のステークホルダーの皆様と共に検討していく。

- ◆計測地候補を挙げ、要すれば状況に応じてシミュレーションのパラメータをより現実環境(水温、地形、水深等)に合わせ、シミュレーション精度を上げる。
- ◆実海域実データ又はシミュレーション結果を元に、より具体的に計測システムを構築、提案する。
- ◆出来るだけ早急に提案したシステムを具現化、実海域で計測の検証を試みる。

# IMOアンモニア燃料安全ガイドライン策定の最新情報及び アンモニア燃料の実用化に向けての本会の取り組み

技術本部 技術部

## 1. はじめに

近年、国際海運の分野では、大気汚染防止、地球温暖化抑制に向けて規制が強化される中、次世代の船舶燃料として、石油燃料に代わり環境負荷の低い低炭素燃料や脱炭素燃料などの代替燃料の利用の検討が活発に行われている。

現在、SO<sub>x</sub>規制及びNO<sub>x</sub>規制への対応のため、LNG、LPG、メタノール/エタノールなどを燃料とする船舶の導入が広がりつつある。また、従来の燃料油を使用する船舶がこれらの燃料を使用することによりCO<sub>2</sub>の排出量を10%から25%削減することが可能であるが、国際海事機関（以下、IMO）は、2050年頃までにGHG排出ネットゼロの目標を掲げており炭素を含まないアンモニア燃料や水素燃料への期待が高まっている。

そのような状況において、IMOでは2025年2月にアンモニアを船舶の燃料として使用する際の安全要件を定めた暫定ガイドラインを発行した。

本稿では、そのIMOアンモニア燃料安全ガイドライン策定に関する最新の情報と、アンモニア燃料船の実用化に向けた本会の取り組みについて紹介する。

## 2. IMOにおけるアンモニア燃料安全ガイドラインの開発状況

### 2.1 アンモニア燃料安全ガイドラインの開発状況

2024年9月に開催された第10回IMO貨物運送小委員会（以下、CCC 10）において、液化ガス運搬船以外のアンモニアを燃料とする船舶に適用されるアンモニア燃料安全ガイドライン案の最終化が行われた。その後、2024年12月の第109回海上安全委員会（MSC 109）にて、CCC 10で最終化されたガイドライン案が承認され、2025年2月にIMO暫定ガイドライン（MSC.1/Circ.1687）が発行された。

CCC 10におけるガイドラインの審議の詳細については後述の3.にて解説するが、CCC 10においては、時間の制約からガイドライン各章の詳細要件の審議は完了されず、各章の目的、機能要件について主に議論が行われた。一部の詳細要件についても審議が行われたが、それ以外の要件に関しては基本的にガス燃料及び低引火点燃料を使用する船舶の安全に関する国際規則（以下、IGFコード）を参照しつつ、アンモニアに関する特別要件が追加される形で最終化がなされた。なお、本ガイドラインについては、今後の貨物運送小委員会において、適切な情報収集と技術的な議論を行った上での継続的な見直しが計画されている。

### 2.2 アンモニア燃料を使用する液化ガス運搬船向けの安全ガイドラインの開発状況

上述のアンモニア燃料安全ガイドラインに加え、液化ガスばら積運送のための船舶の構造及び設備に関する国際規則（以下、IGCコード）が適用となる液化ガス運搬船向けのアンモニア燃料安全ガイドラインについても現在IMOにて開発が行われている。本ガイドラインについては、CCC 10において提案文書が提出されており、今後、通信部会などによるガイドライン策定の作業が行われ、2025年に開催されるCCC11において、ガイドライン案の最終化が行われる計画となっている。

## 3. IMOアンモニア燃料安全ガイドラインの解説

### 3.1 IMOアンモニア燃料安全ガイドライン策定に関する審議について

CCC 10におけるアンモニア燃料安全ガイドラインの審議の概要について紹介する。CCC 10において、アンモニア燃料安全ガイドラインの草案を基に、ガイドラインの適用、目的、機能要件、船舶設計の配置、アンモニアの放出制限、毒性曝露の防止など様々な観点から審議が行われた。

アンモニア燃料安全ガイドラインは1章から20章で構成されているが、上述の通り、CCC 10における時間の制約からガイドライン各章の詳細要件の審議は完了されず、各章の目的、機能要件について主に審議が行われ、

目的、機能要件の合意を以て最終化された。なお、一部の詳細要件（5章～6章6.9, 12bis章など）については審議が行われ、それらの規定についてはガイドラインに取り入れられている。その他の要件に関しては基本的にIGFコードの要件を参照しつつ、アンモニアに関する特別要件のみが追加される形で最終化されている。当該ガイドラインの各章の構成と審議状況の一覧を表1に示す。

表1 IMO暫定ガイドラインの構成と各章の審議状況

章番号	章タイトル	Goal 目的	FR 機能要件	Provisions 詳細要件
1章	INTRODUCTION	2023年CCC9にて合意済み		
2章	GENERAL	2023年CCC9にて合意+残りの項目について合意		
3章	GOAL AND FUNCTIONAL REQUIREMENTS	2023年CCC9にて合意+残りの項目について合意		
4章	GENERAL PROVISIONS	2023年CCC9にて合意済み		
5章	SHIP DESIGN AND ARRANGEMENT	合意	合意	合意
6章	FUEL CONTAINMENT SYSTEM	合意	合意	一部内容について合意
7章	MATERIAL AND GENERAL PIPE DESIGN	合意	合意	一部内容について合意
8章	BUNKERING	合意	合意	一部内容について合意
9章	FUEL SUPPLY TO CONSUMERS	合意	合意	一部内容について合意
10章	POWER GENERATION INCLUDING PROPULSION AND OTHER FUEL CONSUMERS	合意	合意	IGFコードを参照することに合意
11章	FIRE SAFETY	合意	合意	IGFコードを参照することに合意
12章	EXPLOSION PREVENTION	合意	合意	IGFコードを参照することに合意
12bis章	PREVENTION OF EXPOSURE TO TOXICITY	合意	合意	合意
13章	VENTILATION	合意	合意	IGFコードを参照することに合意
14章	ELECTRICAL INSTALLATIONS	合意	合意	IGFコードを参照することに合意
15章	CONTROL, MONITORING AND SAFETY SYSTEMS	合意	合意	一部内容について合意
16章	MANUFACTURE, WORKMANSHIP AND TESTING	IGFコード B-1部16章を引用することで合意		
17章	DRILLS AND EMERGENCY EXERCISES	合意	合意	IGFコードを参照することに合意
18章	OPERATION	合意	合意	IGFコードを参照することに合意
19章	TRAINING	合意	合意	IGFコードを参照することに合意
20章	PERSONNEL PROTECTION	合意	合意	IGFコードを参照することに合意

※12bis章は新章であるが現行のIGFコードの構成と整合を重視し、番号は振り直されていない。

なお、各章の詳細要件について審議が十分に行われていないことから、ガイドライン案を最終化することには否定的な意見もあったが、すでにアンモニアを燃料として使用する船舶に関するプロジェクトが各国で進行中であり、早急なガイドラインの発行が求められていることから、ガイドラインを最終化することに賛成の意見が多数であったため、CCC 10でガイドラインの最終化が行われた。なお、この審議状況を鑑み、発行されたガイドラインの序文には、すべての要件について機能要件を達成するための詳細要件が具体的に規定されているというわけではないという旨の注記が記載されている。

当該ガイドラインについては、今後より詳細な技術的議論と情報収集が行われた上で見直しが行われることが合意されている。

### 3.2 IMOアンモニア燃料安全ガイドラインの概要

本節では、IMOアンモニア燃料安全ガイドラインの策定作業における主な議論の内容と、それらに関連するガイドラインの規定について紹介する。

#### 3.2.1 ガイドラインの適用について

当該ガイドラインの適用に関して、IGCコードが適用となる液化ガス運搬船は対象外とすることが合意された。お、IGCコードが適用となる船舶については、上述の2.2の通り、別途安全ガイドラインが作成される計画

となっている。

### 3.2.2 毒性曝露の防止（毒性エリアと毒性区画の分類）について

乗組員がアンモニアに直接曝露するリスクを低減させることを目的とし、救命設備、脱出経路、吸排気口、居住区域などの開口を安全な場所に配置するために、船舶のエリア／区画を、開放甲板上のアンモニア曝露の可能性のあるエリア（毒性エリア）とアンモニアが漏洩する可能性がある船内の閉囲された区画（毒性区画）に分類することについて合意され、ガイドラインにおいて関連の規定が設けられている。

毒性エリアはアンモニア燃料管のフランジや弁などの潜在的な漏洩源から10mの範囲やベントポストから25mの範囲など、アンモニア漏洩の起点となる場所とそこからの距離（範囲）として定義されている。毒性区画については、燃料を保持する設備の内部、及び単一損傷で漏洩がある閉囲された区画（燃料タンクや燃料調整室、二次的囲壁の内部や潜在的な漏洩源のある区画も含まれる）と規定されている。

また、毒性エリアについては、規範的な距離の規定に加え、ガス拡散解析を使用して、規範的な距離を超えて、許容できないアンモニア濃度（220ppm）が、居住区の空気取入口などの非毒性エリアに到達しないことを実証する旨も規定されている。毒性エリアのイメージを図1に示す。

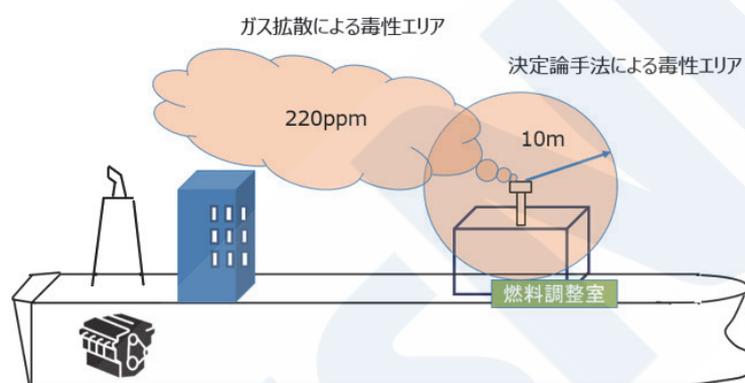


図1 毒性エリアのイメージ図

### 3.2.3 避難場所について

アンモニア漏洩に備えて、船内の全乗組員を収容できる閉囲された避難場所を設けることについて合意された。避難場所は、船舶の運航に不可欠な場所（例えば船橋やエンジンコントロールルーム）に配置し、外部のアンモニアを取り込まないように、区画内の環境を維持可能な場所とするよう規定されている。

### 3.2.4 アンモニアの曝露限界、警報、安全装置の作動について

アンモニア曝露限界と警報及び安全装置作動の閾値について議論が行われた。曝露限界に関して、利用可能な基準、急性曝露ガイドラインレベル（AEGLs）や及び米国国立労働安全衛生研究所（NIOSH）の曝露限度ガイドラインなど、各国の作業基準が異なるということもあり、乗組員の曝露限度を設定することは合意が得られなかった。

警報及び安全装置作動については、各区画でアンモニアの液または蒸気が検出された場合に取りべき措置なども含め議論が行なわれ、濃度の閾値とそれを検知した際の対応について規定された。

- ・ 毒性区画入り口には可視警報を設け、警報設定値は区画内部のアンモニア濃度が25ppmとする。
- ・ 110ppmを超えるガス濃度を検知した場合、人がいる場所に可視可聴警報を発する。可視可聴警報は、ブリッジ、常時人が存在する中央制御場所及び漏洩区画の内部及び外部で発する。
- ・ 220ppmを超えるガス濃度を検知した場合、安全装置を作動する。

### 3.2.5 アンモニアの放出について

基本原則として、通常の運転状態においてアンモニアの直接放出は許容しないことが合意された。また、制御可能な状況では基本的にアンモニア除害装置を使用して放出量を最小限に抑えるべきと合意された。制御不能なアンモニア放出とは、燃料タンクの圧力弁の開放などの壊滅的な状況下に限定されるという点についても合意された。なお、予見可能で制御可能な事象においては、アンモニア除害装置により、アンモニア濃度を110ppm未満に低減しなければならないことが規定されている。ここでいう予見可能で制御可能な事象による放出とは、燃料管系統のダブルブロックブリード弁からのブリードガス、燃料管系統の安全弁からの放出、燃料

管のページガス放出、ドレン排出による放出などを指している。

### 3.2.6 船舶の設計と配置

船舶の設計、配置について、燃料調整室やタンクコネクションスペース、バンカリングステーションなど、アンモニア関連区画／エリアごとに規定を設定することが合意された。また、毒性曝露の防止の観点から、避難経路や居住区などの開口を毒性エリアに配置しないよう規定されている。加えて、機関室はガス安全機関区域のみ許容され、機関室内の燃料管はガス密の二次的囲壁内に設置するよう規定されている。

### 3.2.7 燃料格納設備

加圧式、半冷蔵半加圧式のアンモニア貯蔵の場合、アンモニア格納設備に漏洩が発生した際にアンモニアが噴出する危険性があることが懸念されており、また、低温アンモニアの場合、漏洩が発生した場合でも、蒸発速度が低いことから、当該ガイドラインの開発において、アンモニアは大気圧状態でかつ完全冷蔵状態を前提に規定を作成することが合意された。このため、ガイドライン内には加圧式、半冷蔵半加圧式でのアンモニア貯蔵に関する記述はないものの、その貯蔵方式が禁止されるわけではなく、代替設計により許容される旨も合意されている。また、タンクの圧力及び温度制御に関する議論において、燃料タンク内の液化アンモニアの温度を常に $-30^{\circ}\text{C}$ を超えないように維持することが合意された。

## 3.3 ガイドライン要件に関する検討事項

前3.1及び3.2に記載した通りアンモニア燃料船の安全要件が規定されたものの、ガイドライン最終化を優先したため議論が十分ではない部分が多く残されている。このため、実際の建造にあっては、船舶の安全要件は個別に主管庁と調整する必要があると考えている。本節では、本会が実際の建造にあたり主管庁と協議すべきと考える事項の内、主要な項目について参考に記述する。なお、これらの事項は基本設計に関係するため、設計のなるべく早い時期に行うことを推奨する。

### 3.3.1 燃料タンク内のアンモニア温度について

当該ガイドライン6.9.1.1には、「燃料タンク内の液体アンモニアの温度は、主管庁が認める手法によりいかなる場合も $-30^{\circ}\text{C}$ を超えないよう維持しなければならない」と規定されている。CCC 10のワーキンググループ（以下、WG）では、「いかなる場合」の解釈について議論が行われている。例えば、バンカリング中、供給されるアンモニアは $-33^{\circ}\text{C}$ 程度であり、タンクをクールダウンしていたとしても一時的に $-30^{\circ}\text{C}$ の温度を超えることが予想される。このため、バンカリング中もこの規定が適用されるかの確認が行われた。結論は明確になっていないがバンカリング中も含まれるとする主管庁も見られた。一方で、これを達成しようとする、実際には供給するアンモニアの温度を極端に低くすることが求められるため、現実的には一時的にアンモニアの温度は、 $-30^{\circ}\text{C}$ を超えることが予想される。このほか、ブラックアウトなどの異常状態を含め、当該規定の「いかなる場合」については、主管庁に確認を行う必要があると考えている。

### 3.3.2 加圧式、半冷蔵半加圧式のアンモニア貯蔵

当該ガイドラインの開発において、アンモニアは大気圧状態でかつ完全冷蔵状態で貯蔵することを前提としているものの、WGにおいて、加圧式、半冷蔵半加圧式の貯蔵を認めるべきとした参加メンバーは多かったように思われる。これは、現在アンモニアを貨物として運送する液化ガス船では認められた貯蔵方法であることや今後アンモニア燃料を供給するインフラ設備の候補となる既存インフラが加圧式、半冷蔵半加圧式の貯蔵を行っていることに起因していると考えている。このような状況において、加圧式、半冷蔵半加圧式貯蔵の安全性をどのように立証していくかが問題となる。安全性の立証は、一般に対象規則を基に設定する性能評価基準を用いる手法、規則設計船リスクと相対比較を行う特定リスク評価基準を用いる手法（図2）、トータルリスクの許容基準を利用する包括的リスク評価（図3）の3つの手法が存在する。詳細な説明は省略するが、当該規定の代替設計の安全性立証は、これら3つの手法の内、包括的リスク評価を用いるべきと考えている。この手法を用いる場合、許容できるリスク基準を設定する必要がある、この基準は主管庁と協議して決定する必要がある点に留意が必要となる。実際に、冷蔵式、半冷蔵半加圧式、加圧式の当該リスクの算定の実績はなく、事業者側と主管庁が合意したリスク基準に収まるかは未知であるため、本件に関する安全性立証は、基本計画設計の前段階に終わらせておくことを推奨する。

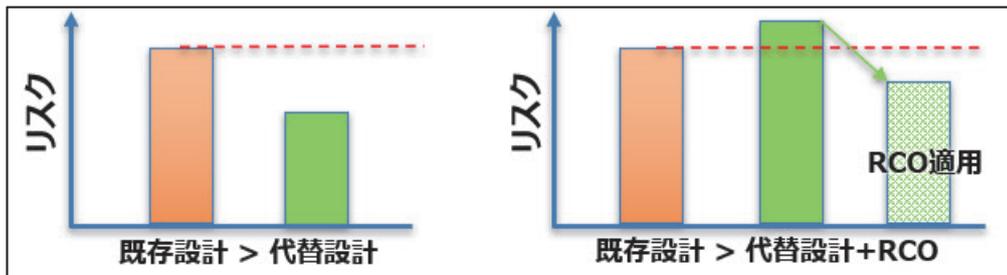


図2 特定リスク評価基準を用いる評価手法

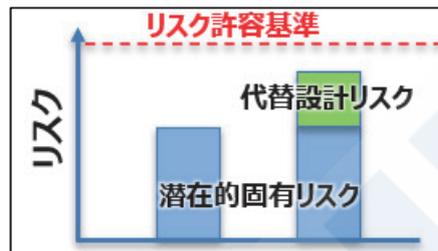


図3 包括的リスク評価手法

### 3.3.3 予見可能で制御可能な事象

CCC 10 WGにおいて、配管等からの漏洩は「予見可能で制御可能な事象」であるかという点についても議論が行われた。一部のメンバーは、配管等からの漏洩は、予見可能で制御可能な事象であるとし、漏洩したアンモニアも大気放出せず、アンモニア除害装置を通じて処理した後大気放出すべきと主張していた。一方で、配管等からの漏洩は、予見可能であるものの制御できるものではないとするメンバーもおり、漏洩事故があった際の漏洩アンモニアの処理有無は主管庁が判断するという結論になっている。漏洩アンモニアを処理するかどうかは基本設計にも影響を与えるため、この解釈についても早期に主管庁への確認が必要となる。本会としては、漏洩したアンモニアは安全な場所から大気放出することを前提に考えており、必ずしも除害装置を通じて放出する必要はないと考えている。いずれにしても毒性エリアを設定するためのガス拡散解析を実施するため、その影響度及び範囲を考慮し、軽減措置を設けるかどうかの判断を行うことが肝要と考えている。

### 3.3.4 ガス拡散解析の解析手法

ガス拡散解析を実施する際、解析条件はその結果に大きな影響を与える。例えば、毒性エリアを設定するための拡散解析でどの風向、どの風速を設定するかによって毒性エリアの範囲は大きく異なる。また、漏洩量の設定も結果に大きく影響を与える。CCC10 WGの議論では、CFD解析などによるガス拡散解析の解析条件について主管庁の許可を得る旨の議論がなされた。一般にCFD解析における解析条件とは、ディレトリ条件、ノイマン条件、壁面条件などの境界条件を指すが、主管庁と協議すべき事項は、こういったCFD解析の一般的な境界条件というよりも上述した解析を行う上での前提条件となる点に留意が必要となる。

### 3.3.5 防火及び消火

当該ガイドライン11章に規定される防火及び消火に関する規定は、IGFコード11章を参照するよう規定されている。IGFコード11章は、LNGを対象として開発された防火及び消火の要件が規定されているが、LNGとアンモニアの火災リスクを比較すると圧倒的にアンモニアの火災リスクは低い。このことからIGFコード11章の規定はアンモニアを燃料として扱う船舶に対して過剰な要求になっている可能性がある。例えば、本会ガイドラインでは、アンモニアの燃焼範囲から開放甲板上では可燃性雰囲気形成できず、開放甲板上に対する防火及び消火の規定は必要ないと考えており、当該規定は取り入れていない。当該ガイドライン11章については、時間の制約から議論されなかったため、本事項についても主管庁との協議を行うべきと考えている。

## 4. 今後の本会の対応

上記で紹介したIMO暫定ガイドラインの内、CCC 10にて詳細に議論が行われた詳細要件（5章～6章6.9、12bis章など）の内容に関しては本会の代替燃料船ガイドラインC-1部にも取り入れることを予定している。

また、今後アンモニア燃料を使用する液化ガス運搬船のガイドライン策定作業やアンモニア燃料船の安全ガイドラインの改正作業などにおいて、本会としてもこれまでの調査検討結果等を活かし、議論に積極的に関与していく所存である。また今後も引き続き、IMOにおける最新の審議状況及び新技術の急速な発展を考慮して本会のガイドラインも定期的に見直し、開発者に有用なガイドラインの策定に取り組む所存である。

#### 参考文献

- 1) IMO, MSC.1/Circ.1687 INTERIM GUIDELINES FOR THE SAFETY OF SHIPS USING AMMONIA AS FUEL

# 代替燃料・新貨物輸送の安全性評価

柳本 史教\*

## 1. はじめに

本稿は2025年1月28日に開催された、ClassNK R&D Forum 2025における講演「代替燃料・新貨物輸送の安全性評価」の概要を紹介するものである。海運ゼロエミッションに向けて、種々の代替燃料が提案されているほか、産業・社会の脱炭素化のために液化水素の大量輸送をはじめ、輸送される貨物も変わろうとしている。船舶の安全性は、長い船舶の歴史の中で発達してきた。これは、新たな概念の船舶の設計を規定する規則が、これまでは必ずしもその船舶の設計以前に成立してこなかった、つまり新概念船の設計と承認プロセスを通じて得られた知識を蓄積していくことで規則が開発されてきた面があることに裏付けられている。しかし、船舶上での利用実績に乏しい、あるいは使用されてこなかったシステムが急速に実用化されようとしている現代においては、スピード感を持った安全要件の策定が、新システムの社会実装を加速するためにも必要となる。

そこで、本会は、ファーストペンギンたるフロントランナーとの連携による安全要件の開発という、従来のアプローチに加え、研究開発の強化によるプロアクティブなアプローチを行っている。中でも、「代替燃料船のリスク評価の高度化・定量化」と「貨物・燃料格納設備の健全性評価技術」をコア技術として研究開発を推進している。この二つが選定された理由として、リスク評価が代替燃料船の設計においては求められることから、多様なステークホルダー間で共通認識を醸成するためにはリスク評価の定量化が必要不可欠であること、また、リスク評価は万一の漏洩を考慮するものであるが、そもそも漏洩（損傷）が生じないように努めることこそが必要と考えたこと、が挙げられる。これら2点のアプローチに基づき、研究開発を行ってきている。

本会技術研究所が上記のアプローチに基づき実施している研究は多岐にわたるが、時間的制約から、当該講演では以下の研究を取り上げた。

代替燃料船のリスク評価の高度化・定量化：

- ・ アンモニア燃料船におけるアンモニア漏洩頻度推定
- ・ アンモニアガス拡散試験
- ・ 代替燃料船の定量的リスク評価・リスク評価手法の高度化

貨物・燃料格納設備の健全性評価技術：

- ・ 材料のアンモニア応力腐食割れ感受性の評価手法検討
- ・ 材料の液化酸素（LOX）適合性評価手法検討

これらに加え、「代替燃料船のリスク評価の高度化・定量化」については、水素微小液滴漏洩・拡散試験の分析や、ガス拡散解析の妥当性検証（Verification & Validation, V&V）の推進等を行っている。また、「貨物・燃料格納設備の健全性評価技術」では材料の極低温環境における破壊挙動の研究や、液化CO<sub>2</sub>タンクを想定した溶接後熱処理（Post Weld Heat Treatment, PWHT）による破壊靱性への影響評価、低温用材料の延性破壊シミュレーションによる大型試験省略可否検討等を行っている。これらの結果は、順次規則やガイドラインに取り込まれているほか、本会技術研究所ウェブサイトにて報告書を掲載している。ご関心のある方は参照されたい。

本稿では、「代替燃料船のリスク評価の高度化・定量化」と「貨物・燃料格納設備の健全性評価技術」の研究開発の概略を述べたうえで、R&D Forumにおいて取り上げた5つの研究プロジェクトについてこれまでの成果や現在の状況を解説する。

## 2. 代替燃料船のリスク評価の高度化・定量化

一般に、リスク評価は図1のように、ハザードの同定から始まるフローで行われる。とあるシナリオが選定されると、その発生頻度と影響度をそれぞれ評価、掛け合わせることでリスクを求めることができる。そのため、

\* 開発本部 技術研究所 安全性評価部門

リスク評価の高度化・定量化のためには、発生頻度及び影響度の評価をそれぞれ定量化することが必要となる。また、船舶分野では、HAZID等を除いて、必ずしも定量的なリスク評価が一般的ではないことから、リスク評価フロー全体の高度化、定量化の検討が必要となる。そこで、次に説明する「アンモニア燃料船におけるアンモニア漏洩頻度推定」「アンモニアガス拡散試験」「リスク評価の定量化・プロセス安全概念の代替燃料船への適用」の検討を行っている。

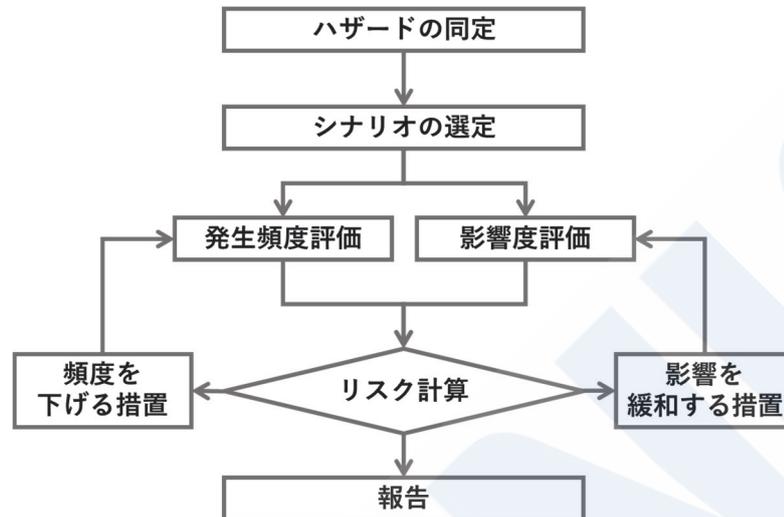


図1 リスク評価フロー

## 2.1 アンモニア燃料船におけるアンモニア漏洩頻度推定

代替燃料船特有のリスクとは、格納、利用している燃料の漏洩に起因するものである。そのため、代替燃料船のリスク評価を行うにあたり、漏洩頻度の正確な推定が重要である。炭化水素（石油、天然ガス）プラントでは、これまでの膨大な操業実績から、どの程度の規模の漏洩が、どのような確率で生じるのか、整理がなされており、例えばIOGP Risk Assessment Directory<sup>1)</sup>にまとめられている。過去の研究で、こうした炭化水素プラントの漏洩頻度統計値を用いてアンモニア燃料船のリスク評価を行っている例<sup>2)</sup>や、IOGPの頻度を用いることでアンモニア燃料船リスクの安全側の評価が可能である旨述べられている例<sup>3)</sup>がある。

しかし、アンモニアは炭化水素とは異なる性質を有しており、発生するハザードも異なることから、アンモニアの漏洩頻度をアンモニア燃料船のリスク評価に適用することが望ましいが、アンモニアの漏洩事例の統計値が存在していなかった。そこで、アメリカSandia国立研究所が水素ステーションのリスク評価に活用するべく実施した手法<sup>4)</sup>であるベイズ更新技術により、限られた陸上アンモニア利用設備のアンモニア漏洩データベースを用いて船上アンモニア燃料機器からの漏洩頻度を推定した。尚、本研究は、国立研究開発法人 産業技術総合研究所（以下、産総研）安全科学研究部門との協業である。

本研究については、Forumにおいて産総研小島博士より報告されたこと、まだ本稿執筆現在（2025/2）において査読付き論文を投稿中であることから、ここで詳細を記述することは差し控える。本研究で得られた成果は、様々な仮定を置いたものではあるものの、現状世界で唯一存在するアンモニアに特化した漏洩頻度推定値であることから、不確実性の高いアンモニア燃料機器の安全性担保に有益なものであることと考えられる。

## 2.2 アンモニアガス拡散試験

図1に示した影響度評価を定量的に行うにあたり、代替燃料船では燃料の漏洩後のガス拡散評価が行われる。一般にはすべてのケースに対し実験を行うことは不可能であることから、プルームモデルのような拡散式や、数値流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）が利用される。当然、これらの評価手法の妥当性は、V&Vの観点から検討されていることが望ましい。

ここでいうV&Vとは、一つ目のVは、作成した数値計算が、概念モデルを正しく実装できているかどうか、そして二つ目のVはその数値計算が、現象を正しく再現できているかを問うものである<sup>5)</sup>。研究レベルにおいて、アンモニア燃料船を想定した拡散評価が少なからず実施されているものの、その妥当性検証が十分実施されていないことが指摘できる。

特に二つ目のVは、比較対象としての実験データが必要になるが、信頼できるアンモニアガス漏洩拡散試験は、

Tan et al.(2017)<sup>6)</sup>, RED SQUIRREL TEST<sup>7)</sup>, Fladis Field Experiments<sup>8)</sup>といった研究に限られている。これらはいずれも開放空間あるいは風洞中における拡散挙動を対象としている。一方で、アンモニア燃料船では、燃料調整室や機関室等、アンモニアの漏洩がありえる閉囲空間が存在する。そこで、以上の背景を踏まえ、閉囲空間におけるアンモニア漏洩・拡散実験を行い、数値解析の妥当性検証に資することとした。

実験は図2に示すおおよそ1m立方の亚克力容器に、下方からアンモニア窒素混合ガスを放出することで実施した。図2では省略しているが、容器上部からホースにてアンモニアを排出している。この時、放出前にアンモニアを除去するようにしている。また、アンモニア窒素混合ガスにおけるアンモニア濃度は、最大でも5vol%とした。

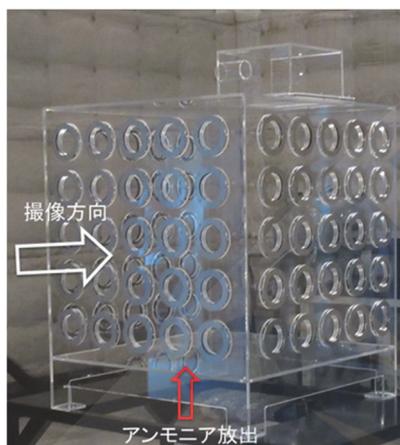


図2 アンモニア放出空間

本実験の最大の特徴は、ラマン散乱法を用いた2次元イメージングによるアンモニア濃度計測を行った点である。例えばTan et al.<sup>6)</sup>ではアンモニア濃度の計測に、接触式のガス濃度計を用いているが、実験のスケールが小さい場合、このような濃度計自体が流場に影響する恐れがある。また、市販されているアンモニアガス検知器は応答時間も長く、このような実験用途に適していない。そこで、株式会社四国総合研究所が開発したレーザーラマン分光法を用いることで、流場に影響を与えず、かつ面的な濃度評価が可能なシステムを採用した。本手法は水素を対象に多数の実績が存在するものであり、詳細は、朝日ら(2021)<sup>9)</sup>を参照されたい。図2で亚克力容器に多数設けられている円孔は石英ガラス製窓を差し込む。これはレーザーラマン分光法のレーザー及びガス分子の散乱光の撮影を可能にするための仕組みである。理想的には撮像面を全て石英ガラスにすることが望ましいが、大型の石英ガラスを作成することが困難であったため、覗き窓として石英ガラスを用いることとした。

今回の実験では、図2の「撮像方向」の向きにCCDカメラでラマン散乱光を撮影している。図3にアンモニア濃度撮像例を示す。これはアンモニアの放出開始直後の状況であるため、放出孔に近い位置では高輝度（赤コンター）となっており、放出孔から遠い容器上部ではアンモニアが計測されていない。ここで計測された輝度を参照セル（既知濃度のアンモニアを充てんした小型容器）の輝度を用いて濃度に換算する。計測したアンモニア濃度推移の一例を図4に示す。アンモニアの放出開始～放出停止に伴う濃度推移が計測できていることがわかる。

今後の課題として、計測精度の向上に加え、容器内への障害物の設置、アンモニアの放出方法の多様化（例えばピンホール放出）、そしてCFDとの比較による妥当性検証が挙げられる。このような閉囲空間におけるアンモニア濃度計測は世界に他に例がない試みであることから、引き続き共同研究者（公立諏訪東京理科大学今村教授、九州大学篠田名誉教授）と連携のうえ、研究を推進する予定である。

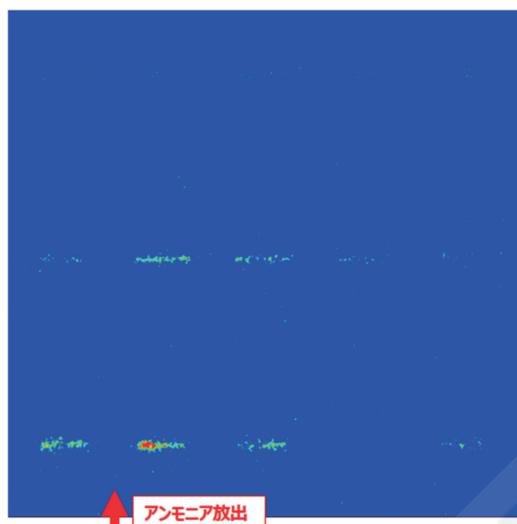


図3 アンモニア濃度イメージング例

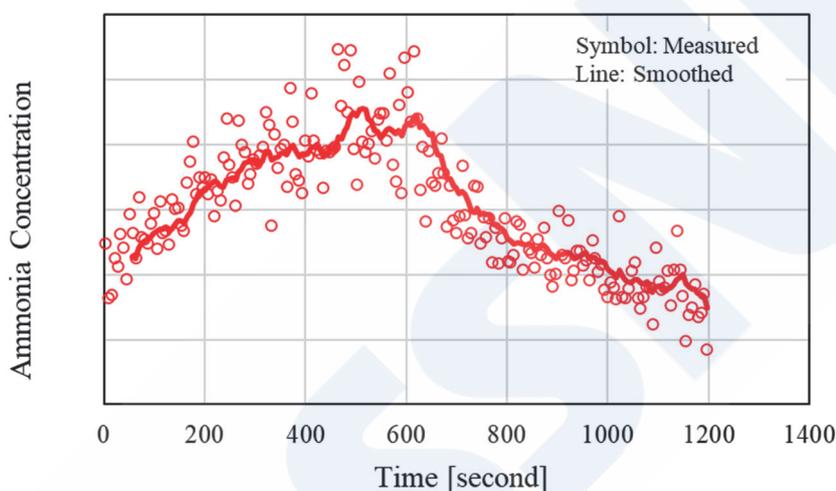


図4 噴出孔付近のアンモニア濃度推移例

### 2.3 代替燃料船の定量的リスク評価・リスク評価手法の高度化

代替燃料船の設計時，リスク評価が要求される。このリスク評価としてHAZIDやHAZOPが行われることが多いものの，例えば水素ステーションを対象に行われている<sup>10)</sup>ような，狭義の定量的リスク評価(Quantitative Risk Assessment, QRA)は船舶分野では一般的ではない。QRAは評価されたリスクを可視化することが容易であることから，ステークホルダー間で共通の認識が醸成しやすく，またリスクを低減する措置の効果を定量的に評価することができるため，特にこれまで実績に乏しいシステムを評価することに適している一方で，代替燃料船への適用実績はまだ少ない。そこで，本研究では，水素燃料モデルシップを対象に，QRAを行うべく，研究開発を行っている。これまでは同モデルシップを対象にHAZID，HAZOP，Bow-tie分析を行った。Bow-tie分析の結果の一例を図5に示す。

こうしたリスク評価の結果を用いて，QRAに用いるだけでなく，リスク評価結果のオペレーションにおける活用を目指した研究を行っている。船舶の特性として，設計者，運用者，船主が異なり，また配乗される船員も比較的高頻度に入れ替わる。中古売船も一般的であり，船主が入れ替わって運用されていくことも少なくない。そのため，本船にどのようなリスクが存在しており，どのように対処していくべきか，設計時のリスク評価結果を生かして管理していくことで，実績に乏しい代替燃料船の安全性向上に繋がるものと考えられる。

尚，これらの研究は，横浜国立大学伊里准教授との共同研究として実施している。

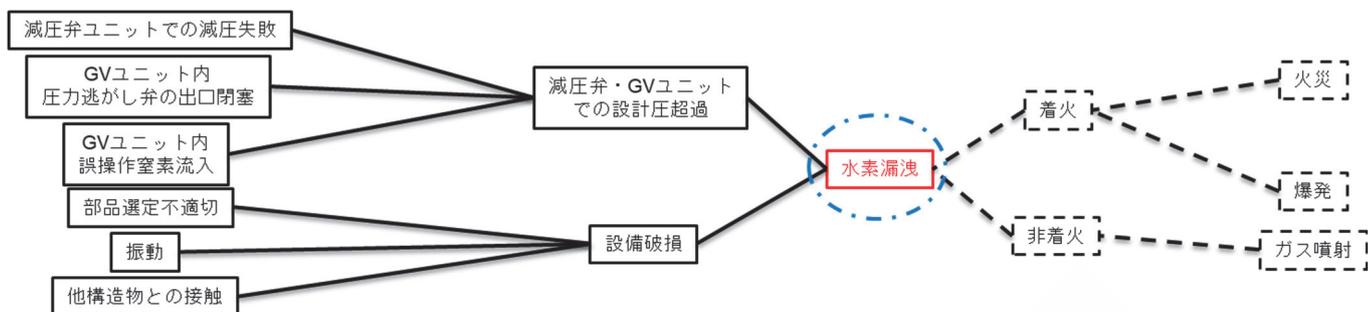


図5 水素燃料モデルシップのBow-tie分析例

### 3. 貨物・燃料格納設備損傷の防止

リスク評価は、万一の漏洩を加味したうえでシステム全体の安全性を確保した設計を行うために必要であるが、一方で漏洩や損傷は統計的にのみ処理される。つまり、実績のないシステムでは、当然これまで経験のない損傷が生じる可能性があり、リスク評価に基づく設計だけではこのような損傷そのものを防止できない。そこで、燃料・貨物格納設備自体の損傷を防止するために、これらの設備の健全性を評価する手法、またその健全性を脅かすような事象への対応策を検討する必要がある。これまでは、発生した損傷を踏まえたルール形成が行われてきたものの、技術革新の進む時代の中では、1章で述べた通りプロアクティブな研究開発が望ましい。本会では、構造健全性（“Structural integrity”）及び材料適合性（“Material compatibility”）の観点から研究開発を行っている。

構造健全性評価は、一般には破壊を起こす駆動力と、破壊に抵抗する抵抗力それぞれを適切に評価することが求められる。本会が実施している研究の例として以下のものが挙げられる。Forumでは、このうち、破壊を生じる駆動力の例として材料のアンモニア応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking, SCC）評価手法の検討について報告した。また、Forumでは合わせて、火災発生源になりうる、液化酸素（LOX）に対する材料適合性の研究開発を報告した。本章ではそれぞれ3.1節及び3.2節で、これらの内容を紹介する。

#### 3.1 材料のアンモニア応力腐食割れ感受性の評価手法検討

液化アンモニアタンクの貯蔵・利用において、アンモニアSCCが損傷の原因となってきた。現代では、IGCコード17.12にあるように、使用する鋼材の強度制限や、水の添加、PWHTの実施等の対策が取られているものの、1970年代までの知見に依拠しており、今後のアンモニア輸送船の大型化やアンモニア燃料船の普及の障害になる可能性がある。そこで、アンモニアSCCを考慮した材料のアンモニア貯蔵供用可能性を評価する手法を検討している。

アンモニアSCCは時間依存型の破壊現象であるため、材料のアンモニアSCC感受性は加速試験により評価されることが望ましい。また、アンモニアSCC感受性は一般に材料の硬さと相関することが知られており、過去の研究では高強度鋼を対象にして実験が行われており、船用タンクに使用されるような降伏応力がそれほど高くない鋼材が評価されていないことが多かった。そこで、本会では、1980年代の中井らの研究<sup>11)</sup>を参考にして試験条件を設定し、広い範囲の強度レベルの鋼材でも割れが発生するかどうか検証した。試験は4点曲げで行った。

図6に、5%二酸化炭素と1000ppm酸素を加えたアンモニアに降伏応力相当のひずみを付与かつ2.0V vs Ptの電位を印加して2週間浸漬したHT80クラスの鋼材の浸漬後の状態を示す。顕著な割れが発生していることがわかる。同様の実験を規格最小降伏応力325MPaの鋼材に対して行うと200 $\mu$ m程度の微細なクラックが確認された。このことから、この試験条件では現在実用的に使用されている鋼材であれば、軟鋼を除いてはアンモニアSCC試験により有意な結果が得られることが示唆された。

一方で、同じHT80クラス鋼材を同じ実験系に136h浸漬した結果を図7に示す。浸漬期間は短いと、亀裂が発生するものの微小な長さにとどまっている。また、最小降伏応力325MPaの鋼材では亀裂が発生していない。これらのことから、材料のアンモニアSCC感受性を評価するためには、試験条件に応じた適切な浸漬期間を設定する必要があるといえる。



図6 HT80のSCC破面（浸漬期間：2週間）



図7 HT80のSCC破面（浸漬期間：136時間）

アンモニアSCC加速試験を行うにあたり、適切な加速条件の設定が不可欠である。アンモニアSCCには酸素や二酸化炭素、水といった不純物が影響することが知られているものの、どのような機構でアンモニアSCC挙動が変化するかは明らかではない。また、腐食反応が寄与することもあり、実験の成功率も必ずしも高くないのが現状である。そのため、今後引き続き、安定的な実験実施条件の設定、ばらつきの確認を目指して研究を行う予定である。

### 3.2 材料の液化酸素（LOX）適合性評価手法検討

次世代のクリーンエネルギーとして注目されている水素は、 $-253$ 度という極低温で液化される。この温度は酸素の液化温度より低いことから、防熱の状態によっては、空気中の酸素が液化する可能性がある。そのため、本会液化水素運搬船ガイドライン<sup>12)</sup>では、単一損傷シナリオにおいて空気が液化温度以下にまで冷却される場合、液化酸素（LOX）による発火リスクへの配慮、すなわち、液化酸素の発生が安全上の問題を発生しないこと、あるいはLOXに接触する材料が、LOX適合性を有していることを要求している。

ここでいう材料のLOX適合性とは、その材料が液化酸素に触れた状態で機械的衝撃を受けても発火しないことを指している。ASTM規格にてLOX適合性評価を規定するものはあるものの、これまで主に宇宙分野で活用されており、船用分野ではLOX適合性が問題になることはほとんどなかった。そのため、本会では、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構（以下、JAXA）との共同研究を通じて、LOX適合性評価に関する知見の蓄積に努めている。

LOX適合性試験は、図8に示すアルミカップに試験体を設置し、LOXを浸漬、ストライカーピンを通じて打撃を与えることで行う。この時、一切の発火がみられず、また試験後の供試体に着火した痕跡がみられなければLOX適合性があると判断されるが、図9のように着火した場合、LOX適合性がないとみなされる。尚、着火の形態は様々であり、図9のように比較的穏やかなこともあれば、Guo et al.<sup>13)</sup>にてExplosionに分類されるような爆発的な着火も見られる。本会では、JAXAとの共同研究を通じて、炭素鋼（SM400C）、塗料付き炭素鋼、アルミ合金（A5083-O）、PEEK樹脂、断熱材（MLI）、エポキシ系構造用接着剤を対象に実験を行った。

これまでの試験状況を表1に示す。ASTM規格では打撃エネルギーは98Jと規定されているが、本研究では、船用分野に適した打撃エネルギー量が必ずしも明らかではないため、打撃エネルギーに応じてLOX適合性が変化するかどうか検討するため、49J、25Jにおいても試験した。また、着火ナシとしたものは、10体以上試験を行い、1回も着火しなかったものを指す。また、複数回試験を行い、1回でも着火とみなされた場合に着火アリとしている。この結果から、材料によりばらつきはあるもののLOX適合性は打撃エネルギー依存性があることが示された。このことは、船舶におけるLOXに対する安全性を考える際に、一概に既存規格通りに適合、不適合を判定するのではなく、その部材が受ける着火要因の度合いに応じて適合判定を行うことが可能であることを示唆している。

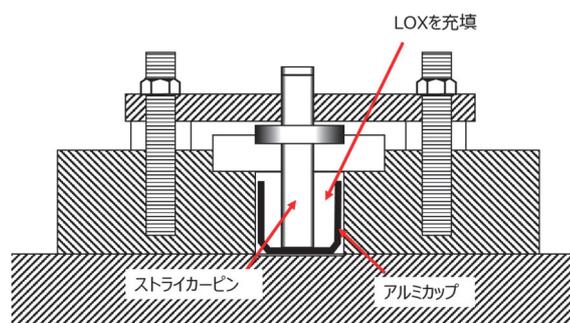


図8 打撃試験機

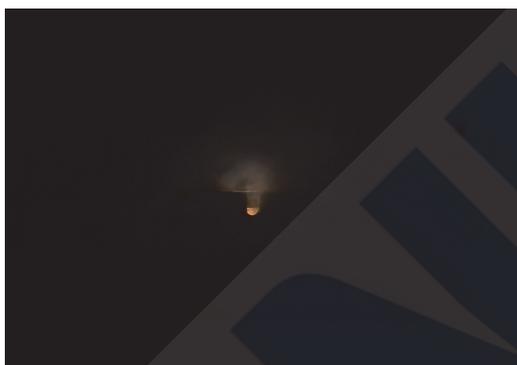


図9 LOX試験結果

表1 LOX適合性試験実施状況

供試体	打撃エネルギー [J]		
	98	49	25
SM400C	非着火		
塗装済みSM400C	着火アリ	着火アリ	非着火
A5083-O	非着火		
PEEK樹脂	着火アリ	非着火	
断熱材 (MLI)	着火アリ	着火アリ	
エポキシ系構造用接着剤	着火アリ	着火アリ	着火アリ

LOX適合性はこれまで宇宙分野で主に評価されてきたことから、海事分野に適した評価法、評価基準を検討することは、液化水素運用の合理化に寄与するものである。本研究はJAXA殿のご協力の下、推進しているが、引き続き宇宙・船舶の連携を行い、液化水素利用の安全性向上に貢献していく。

#### 4. 総括

海事産業の脱炭素化が急激に進んでおり、代替燃料船や新貨物輸送船の設計が行われている。一方で安全要件はこれまでの規則の延長線上であるか、あるいはそれらの設計の承認プロセスの中で得られた知見を反映する形で開発されており、場合によっては安全要件の開発に対して設計が先行している部分もある。そのため、プロアクティブな研究開発の実施が、一層重要となる。本会では、「代替燃料船のリスク評価の高度化・定量化」と「貨物・燃料格納設備の健全性評価技術」の二点のアプローチで研究開発を推進し、安全かつ効率的な代替燃料船、新貨物輸送船の実現・運航に必要な知見の蓄積を行っている。

本会では、要素技術研究、安全要件策定／規則開発、実プロジェクトそれぞれのステージにおいて研究開発を行っている。技術研究所が要素技術研究と、安全要件策定／規則開発の段階での研究開発に主に従事してい

るが、要素技術研究で得られた最先端の知見を実プロジェクトに提供するとともに、実プロジェクトからのニーズのフィードバックを得ることで、有機的に連携した研究開発体制を敷いている。また、従来の船舶海洋工学分野に縛られず、必要な知見獲得のために、様々な分野との連携体制を構築している。これらのオープンイノベーション体制を維持・推進していくことで、タイムリーな研究開発を実現していく。

## 謝辞

本会で実施している研究開発の多くは、大学、企業、研究機関との連携によって実施している。この場を借りてお礼申し上げる。

## 参考文献

- 1) International Association of Oil & Gas Producers: Risk Assessment Data Directory Process Release Frequencies, Report 434-01, 2019
- 2) A. Franks et al.: Use of quantitative risk assessment to enhance the safety of ships using ammonia as fuel, Journal of Safety and Sustainability, Vol. 1, pp.127-140, 2024
- 3) KT Moon et al., Ammonia as a marine fuel: likelihood of ammonia releases, Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, Vol. 47(6), pp. 447-454, 2023
- 4) B. D. Ehrhart and E. S. Hecht: Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+) Version 4.1 Technical Reference Manual. SAND2022-5649, 2022
- 5) 中村：シミュレーションのV&Vの現状と課題 第3回（最終回）V&Vに関わる技術標準の動向「モデルV&Vと品質V&V」, 日本原子力学会誌, 57巻, 2号, pp.99-103, 2015
- 6) W. Tan et al.: Experimental and numerical study of ammonia leakage and dispersion in a food factory, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 47, pp. 129-139, 2017
- 7) S. Dharmavaram et al.: RED SQUIRREL Tests – Air Products Ammonia Field Experiments, 19th Global Congress on Process Safety, 2023
- 8) M. Nielsen et al.: Field experiments with dispersion of pressure liquefied ammonia, Journal of Hazardous Materials, Vol. 56, pp.59-105, 1997
- 9) 朝日ら：レーザラマン分光法による局所ガス濃度非接触連続計測技術の開発, 四国電力, 四国電力送配電, 四国総合研究所研究期報, Vol.114, pp.21-27, 2021
- 10) T. Suzuki et al.: Quantitative risk assessment of a hydrogen refueling station by using a dynamic physical model based on multi-physics system-level modeling, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 46(78), pp. 38923-38933, 2021
- 11) 中井ら：液体アンモニア中における応力腐食割れ促進試験法の開発, 鉄と鋼, Vol.67(14), pp.2226-2233, 1981
- 12) 日本海事協会：液化水素運搬船ガイドライン（第3.0版）, 2024
- 13) Guo et al.: Experimental characterization and molecular dynamics simulation of thermal stability, mechanical properties and liquid oxygen compatibility of multiple epoxy systems for cryotank applications, Extreme Mechanics Letters, Vol. 44, 101227, 2021

# 「アンモニア燃料船のリスク評価のための アンモニア漏えい頻度のベイズ推定」の解説

小島 直也\*, 小野 恭子\*

## 1. はじめに

本記事は、Kojima et al. (2025) の論文<sup>1)</sup>の解説である。詳細および付属資料については、参考文献を参照されたい。特に、紙幅の関係から後述する事前分布および更新1回目の尤度の設定方法や感度解析については省略するとともに、推計に用いたパラメータや結果についてはFlangeのみを例示した。

温室効果ガス（GHG）の排出抑制は国内外ともに喫緊の課題であり、産業活動のなかで環境と調和しつつ対策が求められている。この潮流は船舶運航においても例外ではなく、国際海事機関（International Maritime Organization, 以下IMO）は当初2100年までの外航船におけるゼロエミッションの達成を目指していた<sup>2)</sup>が、2023年にこの目標は2050年に繰り上げられた<sup>3)</sup>。外航船に使用される燃料は歴史的に重油が主流であったが、近年、液化天然ガス（Liquefied Natural Gas, 以下LNG）やメタノールなど、GHG排出量が少ないとされる代替燃料の使用が増加している<sup>4)</sup>。

アンモニアは、日本の経済産業省が関係省庁と連携して策定した「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」<sup>5)</sup>において、水素社会への移行期で主力となる脱炭素燃料と位置付けられている。船舶におけるアンモニアの燃料利用も実行可能な選択肢の一つとして、ますます注目されつつある<sup>(6)(7)(8)</sup>など。上述したLNGやメタノール等の代替燃料と比較した際のアンモニアの利点として、高い重量エネルギー密度と体積エネルギー密度、そして全世界で1.5億トン/年の生産量（2019年）<sup>9)</sup>を支える既存の保管・運輸インフラとの互換性<sup>10)</sup>があげられる。また、アンモニアは大気圧で容易に液化でき、可燃性範囲が狭いといった物理的特性から実用的である。2050年までに、アンモニアは船舶燃料需要全体の約44%を占め<sup>3)</sup>、またアンモニア需要全体の30%を占めると予測されている<sup>8)</sup>。一方でアンモニアは、劇物であり、一定の暴露レベルでは目を刺激し、呼吸器を損傷する可能性がある<sup>11)</sup>。また、高強度鋼、亜鉛、銅、真鍮などの材料に応力腐食割れを引き起こす可能性があげられる<sup>12)</sup>。

海上における人命の安全のための国際条約（The International Convention for the Safety of Life at Sea, 以下SOLAS<sup>13)</sup>）は、使用する液化ガス燃料の種類によらず船舶設計のためのリスク評価を要求しており、港湾と海上両方の環境における、使用・貯蔵・バンカリング（燃料供給）における評価が必要とされる。

評価手法の一つに、定量的リスク評価（Quantitative Risk Assessment, 以下QRA）が用いられることがある。これは、事故時の被害の大きさとその起こる確率を見積もり（以下、それぞれ被害評価、確率評価とよぶ）、その積をリスクとして数値化するものである<sup>14)</sup>。LNG船に関しては、事例が多くみられ、エンジンルーム<sup>15)</sup>やLNG浮体式生産貯蔵積出システム<sup>16)</sup>といった設備を対象とした事例から、フルボアイベントを含むLNG燃料タンカー<sup>17)</sup>やLNG燃料鉱石・ばら積み貨物船<sup>18)</sup>といった船舶を対象とした事例などがあげられる。これらの事例で用いられる漏えい頻度、あるいは事故確率や発生率などの主な情報源は、英国・Health and Safety Executive（HSE）のHydrocarbon Release System（HCR）<sup>19)(20)</sup>、オランダ・Committee for the Prevention of Disasters（CPR）のGuidelines for Quantitative Risk Assessment（いわゆる‘Purple book’）<sup>21)</sup>、または国際石油・天然ガス生産者協会（IOGP）のデータベース<sup>22)(23)</sup>である。しかしながら、これらの情報源から得られるデータはLNGやアンモニアには特化していない点に注意が必要である。

LNGと比較すると実施数は限られるものの、近年、アンモニア燃料のQRAも実施されつつある。特にアンモニアのバンカリングに関連した事故やアンモニア拡散については懸念が大きく、港湾周辺でのリスク評価事例が多くみられる（例えば<sup>24)(25)</sup>）。これらの評価の課題として、被害評価はアンモニアの特性を踏まえて実施されているものの、確率評価にはLNGや炭化水素燃料から推計した漏えい頻度が用いられており、アンモニア漏えい事故の特徴が十分に反映されたQRAは限られていることが挙げられる。

その中で、Moon et al.<sup>26)</sup>は、液体アンモニアを輸送するタンカーにおけるアンモニア漏えい事故のデータを

\* 国立研究開発法人産業技術総合研究所

分析することで、船舶全体における潜在的なアンモニアの漏えい頻度を推定している。彼らは得られたアンモニア漏えい頻度について、IOGPの漏えい頻度データと比較するなどの考察を行い、アンモニア燃料船のリスク評価に適用できると結論づけている。ただし、漏えい径別あるいは機器別の漏えい頻度データが限られていることも指摘している。今後、アンモニア燃料船の増加が見込まれ、正確で信頼性の高いQRAが求められると予想されることから、アンモニア燃料船のQRAに適用可能な機器別の漏えい頻度データを得ることが不可欠であると考へた。

以上から我々の研究ではアンモニアの特徴、およびアンモニア利用に用いられる機器の特徴を考慮して、アンモニアの漏えい規模別・機器別の漏えい頻度（以下、漏えい頻度）を推定した。図1にアンモニア燃料船の漏えい頻度を推定するための枠組みを示す。最初に、我々は、LaChance et al.<sup>27)</sup>、Groth et al.<sup>28)</sup>、および木原ら<sup>29)</sup>の手法を参考にベイズ更新モデルを開発した。更新1回目ではDavies and Fort<sup>30)</sup>から入手したLNG燃料船の漏えい頻度データを取り込んだ。また、更新2回目では、日本の高圧ガス事故事例データベース（DB）<sup>31)</sup>における57年間にわたる18,945件の事故事例からアンモニア利用施設における漏えい頻度データを作成し、これを尤度として取り込んだ。2回目のベイズ更新の結果、アンモニア燃料船におけるアンモニア燃料船における漏えい頻度が推定された。結果の不確実性に関する検討として、尤度に対する感度解析を実施した。

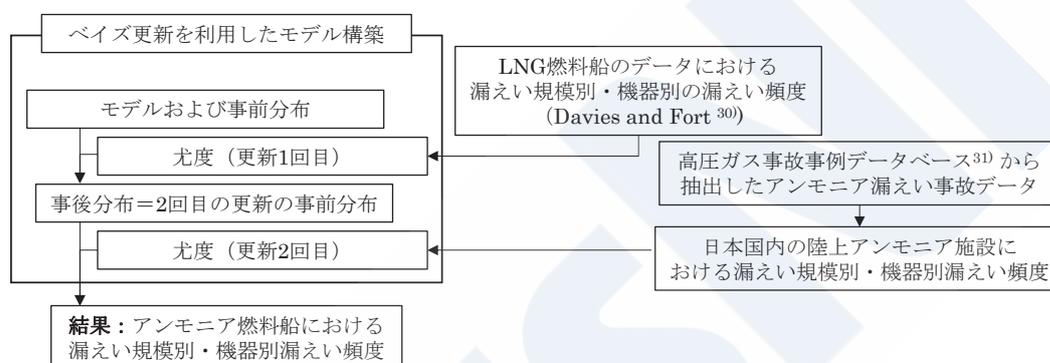


図1 アンモニア燃料船におけるアンモニア漏洩頻度推計の枠組み

## 2. 手法

### 2.1 ベイズの定理

ベイズの定理から導かれる基本式は(1)のように表される<sup>29)</sup>。

$$\text{事後分布} \propto \text{尤度} \times \text{事前分布} \quad (1)$$

事後分布は尤度と事前分布の積に比例する。事前分布は、客観的な情報から導出される場合もあれば、専門家の経験や判断などの主観的な情報に基づいて仮定される場合も、また無情報の分布として一様分布などを仮定される場合もある。そして、尤度として新しい証拠やデータを取り込むことで、事後分布が推定できる。さらに、この事後分布を新たな事前分布として使用し、追加収集したデータを尤度として取り込み、新たな事後分布を推定する、という反復プロセスがベイズ更新として知られている。

ベイズ更新の長所は、複数の情報源からのデータを組み合わせられる点、新たな証拠やデータを継続的に取り込むことで信頼性を高められる点である。そのため、燃料アンモニアのように、経験的モデルによる予測が困難で、データが不足しがちな分野においても、一定の客観性・再現性のある確率分布を導出する目的で活用されている。

### 2.2 FLAを用いた階層ベイズモデルの構築と実装

当論文では、米国・Sandia National Laboratory（以下、SNL）で開発された<sup>27)</sup> <sup>28)</sup>、水素充填施設における漏えい頻度推定モデルを参考とした。

まず、このモデルの概念について整理する。SNLは(2)に示すように、漏えい頻度（Leak frequency; LF。単位は回/年）と配管等の機器断面積に対する漏えい面積の割合（Fractional leak area, 以下FLA）の対数が線形関係にある、という仮定から出発している。この仮定は、規模の大きな漏えいは発生頻度が低く、反対に規

模が小さい漏えいは高頻度で発生するという直感とも整合的である。また、化学処理、圧縮ガス、原子力発電所、および海洋石油産業における事故データを分析した結果を根拠として導出されており、その他の既往研究でも同様の傾向が確認されている（例えば、Spouge<sup>32</sup>, IOGP<sup>22</sup>）。

モデル式について、(2)の両辺の値の対数を取ることで(3)に、また(3)の切片を定数に置換し、底の変換を行うことで(4)に簡略化できる。底の変換により表1に示すFLAの大きさが、-4, -3, -2, -1, 0と負の整数に換算されるため、理解が容易である。次に、SNLは表1に示す5つにカテゴリ化した漏えい規模Iに対応するLF(I)の対数が(5)の正規分布に従うと仮定した。

ここでカテゴリ化を行う理由は、モデルに取り込むための各データの情報源で報告される漏えい規模が一貫しないためである。つまり、漏えい規模を連続的に扱おうと、ある漏えい規模の事故がデータベース中に1件しかない場合が多数生じてしまい、結果的に尤度となる確率データを作成できず、ベイズ推定が実行できなくなる。これを避けるために、同等の漏えい規模と判断できる事故を集め、その漏えい頻度を算出する手続きを用意している。筆者らが2.6.2で実施した漏えい規模の分類作業でも、事故の報告内容は多種多様であり、このカテゴリ化手続きが必要であることを強く認識した。

モデル式の説明に戻ると、LF(I)の対数が(5)の正規分布に従うとき、(2)は切片 $\alpha_1$ と傾き $\alpha_2$ をもつ、対数線形モデル((6))として記述できる。この時、(5)および(6)の推定すべきパラメータである $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\sigma^2_{LF(I)}$ については自然共役分布を採用し、それぞれ(7), (8)の正規分布、および(9)の逆ガンマ分布を仮定した。すなわち、 $\mu_{LF(I)}$ が $\alpha_1$ と $\alpha_2$ を変数とする分布を持ち、さらに $\alpha_1$ と $\alpha_2$ がそれぞれ分布を持つ、階層ベイズモデルを仮定した。

以上の手続きにより、事故データから導出した様々な機器断面積と漏えい規模の組み合わせをFLAに換算し、ベイズモデルに取り込むことで、漏えい頻度を推定できる。我々はここに、アンモニアの漏えい頻度を尤度として取り込むことで、アンモニア燃料船における漏えい頻度分布を推定するモデルとした。なお、SNLはベイズ更新のためのツールとしてWinBUGS<sup>33</sup>を利用しており、我々はRパッケージのjagsUI<sup>34</sup>を利用した。

$$LF = A_1 \times FLA^{A_2} \quad (2)$$

$$\ln LF = \log A_1 + A_2 \cdot \ln FLA \quad (3)$$

$$\ln LF = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot \log_{10} FLA \quad (4)$$

$$\ln(LF(I)) \sim Normal(\mu_{LF(I)}, \sigma^2_{LF(I)}) \quad (5)$$

$$\mu_{LF(I)} = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot \log_{10} FLA_I \quad (6)$$

$$\alpha_1 \sim Normal(\mu_{\alpha_1}, \sigma^2_{\alpha_1}) \quad (7)$$

$$\alpha_2 \sim Normal(\mu_{\alpha_2}, \sigma^2_{\alpha_2}) \quad (8)$$

$$\sigma^2_{LF(I)} \sim InvGamma(a_I, b_I) \quad (9)$$

I: 漏えい規模 (表1)。

LF(I): 漏えい規模Iにおける漏えい頻度。

$A_1, A_2$ : FLAのパラメータ。

$\alpha_1, \alpha_2$ :  $\log_{10} FLA$ および $\mu_{LF}$ の切片と傾き。

$\mu_{\alpha_1}, \sigma^2_{\alpha_1}$ : 正規分布を仮定した $\alpha_1$ の平均と分散。

$\mu_{\alpha_2}, \sigma^2_{\alpha_2}$ : 正規分布を仮定した $\alpha_2$ の平均と分散。

$\mu_{LF(I)}$ : 報告されている漏えい頻度の平均値。

$\sigma^2_{LF(I)}$ : 報告されている漏えい頻度の分散。

$a_I, b_I$ : 逆ガンマ分布を仮定した $\sigma^2_{LF(I)}$ の形状パラメータとスケールパラメータ。

表1 漏えい規模とFLAのカテゴリの対応関係

漏えい規模 (I)	FLA <sup>a</sup>
1 Very small	0.0001
2 Minor	0.001
3 Medium	0.01
4 Major	0.1
5 Rupture	1

a FLA : Fractional Leak Area。機器の断面積に対する漏えい面積の割合。例えば漏えい規模の区分Very smallは、断面積の0.0001 (=0.01%) に相当する漏えい面積を指す。

## 2.3 漏えい頻度推計の対象とした機器

推定に必要な事前分布および2つの尤度について、それぞれの参照した出典内で報告されている機器の種類を表2に示す。当論文では、3つの情報源全てで情報が得られる機器のみ、すなわち太字で示したFlanges, Joints, Pipes, Valves (actuated), Valves (manual)を漏えい頻度の推定対象とした。なお、コンプレッサーについては、Davies and Fort<sup>30)</sup>は遠心式と往復式を区別しているが、LaChance et al.<sup>27)</sup>および高圧ガス事故事例DB<sup>31)</sup>では区別しておらず、両者の機械的な違を考慮して対象外とした。

表2 情報源ごとで報告される機器の種類とその対応関係

事前分布： LaChance et al. <sup>27)</sup> より	更新1回目で用いた尤度： Davies and Fort <sup>30)</sup> より	更新2回目で用いた尤度： 高圧ガス事故事例DB <sup>31)</sup> より
<b>Flanges</b>	<b>Flanges</b>	フランジ
<b>Joints</b>	<b>Instrument connections<sup>a</sup></b>	ジョイント, 接手
<b>Pipes</b>	<b>Pipes</b>	パイプ, 管
<b>Valves</b>	<b>Valves (actuated)</b>	バルブ, 弁
	<b>Valves (manual)</b>	
Compressors	Compressors (centrifugal)	圧縮機
	Compressors (reciprocating)	
Cylinders		
Filters		
Hoses		ホース
	Pressure vessel	
	Refrigerated ambient pressure vessel	
Instruments	-	その他 <sup>b</sup>

※空欄部はその出典内において報告されていない機器である。

- a Davies and Fort<sup>30)</sup>では“Instrument connections include flanges within the given release frequency.”と述べられている。以下、本記事では特に断らない限りJointと記す。
- b その他として貯槽、熱交換器、ポンプ、冷却器、計測機器などがある。

## 2.4 事前分布

更新1回目の事前分布については、化学処理、圧縮ガス、原子力発電所、海洋石油などの分野の事故データから推定された一般機器の漏えい頻度<sup>27)</sup>を使用した。

## 2.5 更新1回目の尤度：Davies and Fort<sup>30)</sup>におけるLNG燃料システムの漏えい頻度

更新1回目では、Davies and Fort<sup>30)</sup>が推定したLNG燃料船における漏えい頻度を、表1のFLAに対応するように変換し、これを尤度として取り込んだ。この漏えい頻度はLNG燃料船に関するリスク評価ガイドライン(IGFコード)<sup>35)</sup>で参照されており、一定の信頼性がある。

## 2.6 更新2回目の尤度：高圧ガス事故事例DB<sup>31)</sup>から推計した尤度

### 2.6.1 アンモニア使用施設における規模別のアンモニア漏えい事故の抽出

現在、アンモニア燃料船は研究・設計段階にあるため、事故事例やそのデータベースが存在しない。このような場合の代替データとして、陸上のアンモニア生産・消費施設のデータを使用することが考えられる<sup>12)</sup>。そこで当論文では、高圧ガス保安協会が管理する、高圧ガス事故事例DB<sup>31)</sup>を参照し、日本の陸上施設におけるアンモニアに関する漏えい事故から、尤度となる漏えい頻度を推定した。

高圧ガス事故事例DBとは、高圧ガス保安法によってアンモニアを含む高圧ガスを扱う事業者に対して義務付けられる事故報告18,945件(1965～2022年)が保存されているDBである。事故ごとに識別情報、時間、場所、死傷者数、物質名、噴出や漏えいに関する情報(程度、部位など)、原因、事故概要など計28項目が用意されて

いる\*1。

これらの18,945件の事故報告から物質欄や事故概要欄に「アンモニア」を含む927件を抽出した。次に、この927件のうち、アンモニアの冷媒利用に関連する610件の記録\*2を除外した。除外理由は、冷媒利用するシステムではアンモニアを消費、生産することなく閉鎖系として循環させるため<sup>36)</sup>、アンモニアを継続的に投入および消費する燃焼システムと事故の特徴が異なると考えたためである。残った317件を、表2で評価対象として選ばれた機器（Flanges, Joints, Pipes, Valves）に限定した結果、215件が抽出された。

### 2.6.2 アンモニア漏えい事故に対する漏えい規模の設定

得られた215件の事故の漏えい規模を図2のフローチャートに従い設定した。まず、漏えいの程度や部位に関する情報から直接にFLAが計算できる事故は、そのFLAに応じて漏えい規模を設定した。次に、事故概要欄の記述から判断が容易な事故を、RuptureとVery smallの規模に設定した。例えば、「破断」「切断」「破裂」などの記述がある事故はRuptureを設定し、「わずかな」「通常運転を維持する」「安定した運転」などの記述がある事故はVery smallを設定した。さらに、事故概要欄の記述や漏えいに関する情報から流量の推計を行える事故は、その流量にしたがって漏えい規模を設定した。それ以外の事故事例は2人の研究者が個別に漏えい規模を判断し、両者の判断が一致した場合にはその漏えい規模、一致しない場合には協議を経て漏えい規模を設定した。ここまでの手順で109件に対して漏えい規模が設定できた。

残る106件については、漏えい規模設定に必要な情報がほとんど、あるいは全く含まれていないため、ここまでに設定したVery small, Minor, Medium, Majorの漏えい規模の事故件数に基づいて按分した。ここでRuptureに対して按分しない理由は、Ruptureに該当するような大規模事故は事項報告が詳細である一方で、それ以外の事故報告は簡潔な場合が多いと判断したためである。また、ごく軽微な漏えいの一部は、検知されず報告もされていない可能性があることを考慮し、Very smallは按分対象とした。得られた結果として表3に、按分前後のアンモニア漏えい事故件数を示す。

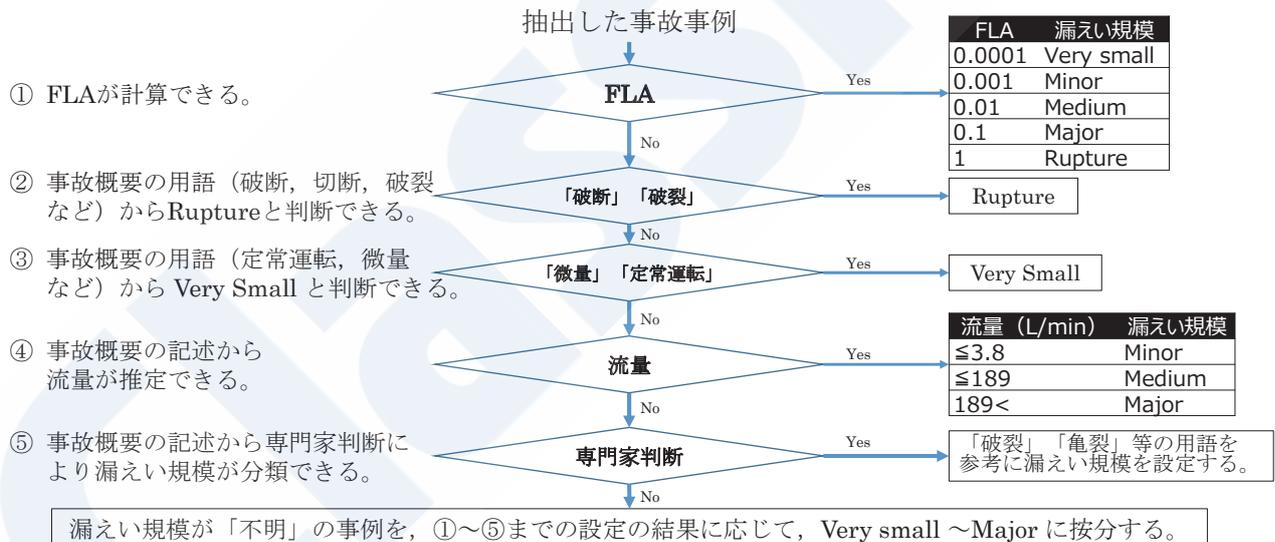


図2 DBから得られたアンモニア漏えい事故に対する漏えい規模設定のフローチャート

表3 機器別漏えい規模別のアンモニア漏えい事故件数（Flangesの例）

機器	漏えい規模別事故件数						
		Very small	Minor	Medium	Major	Rupture	Unknown
Flanges	按分前	14	1	1	0	1	18
	按分後	30	2	2	0	1	

\*1 ただし、全項目が記載された事故は、18,945件のうち28件（0.1%）のみである。

\*2 各事故報告において業種、設備区分、事故概要の項目欄に冷蔵、冷凍、製氷、食品、漁業、水産業の用語を含むものを除外した。

### 2.6.3 事故件数から事故頻度（尤度）への換算

2.6.2で推計した漏えい規模別の事故件数から、1年あたり1個あたり（Pipeでは1mあたり）の漏えい頻度に推計するために、表3の按分後の漏えい件数事例を、推定される機器総数と総運転時間で除した。機器総数は、施設数に施設あたりの平均機器数を乗じて推定する。

$$LF(I)_j = \frac{LC(I)_j}{Period \times N_F \times N_{C,j}} \quad (10)$$

$LF(I)_j$  (件/年/個)：漏えい規模 $I$ ，機器 $j$ における1年あたり1個あたりの漏えい頻度。

$LC(I)_j$  (件)：漏えい規模 $I$ ，機器 $j$ におけるアンモニア漏えい事故の件数。

$Period$  (年)：総運転時間。参照したDBの運用期間（1965～2022年）より57年とした。

$N_F$  (施設)：アンモニア利用施設の総数。

$N_{C,j}$  (個/施設)：アンモニア利用施設あたりの機器 $j$ の数。

アンモニア利用施設の総数 ( $N_F$ )，施設あたりの機器 $j$ の数 ( $N_{C,j}$ ) について、高圧ガス事故事例DBや事業者団体・国が整備する統計から直接得ることができなかつたため、それぞれ参考文献の情報に基づき推定した。

$N_F$ について、鈴木<sup>37)</sup>は、日本の高圧ガス保安法に照らして第二種ガス類（アンモニアを含む）を扱う一般施設数が、1996年3月時点で12,428施設、2015年3月時点で21,438施設であると報告している。また2.6.1で述べたように、全事故数18,945件に占めるアンモニア関連事故927件の割合は4.9%（=927/18,945）、冷媒用途以外のアンモニア関連事故317件に限ると1.7%（=317/18,945）の割合で発生すると推定した。これらの情報から、アンモニア取扱施設数は211（=12,428×1.7%）～1,050（=21,438×4.9）の範囲にあると考え、1965年から2022年のアンモニア利用施設数 $N_F$ を500と推定した。

$N_{C,j}$ について、国立研究開発法人産業技術総合研究所が設定した水素ガスに関する漏えい頻度推定のための施設当たり機器数を参考とした<sup>38)</sup>。文献では、CNG供給施設は高圧ガス関連施設を、ガソリン供給施設は危険物関連施設を代表すると仮定して、それぞれの施設の典型的な機器数を水素の漏えい頻度推定に用いた。当論文でも同様の考え方を採用し、アンモニア施設がCNGステーションに類似していると仮定し、機器数を推定した。結果、1施設あたりの機器 $j$ の数 ( $N_{C,j}$ ) はFlanges=10, Pipes=48, Joints=40, Valves=8とした。

以上から推定した漏えい頻度を表4に示す。漏えい頻度は $10^{-5}$ から $10^{-4}$ の範囲であり、これはLNG燃料船の漏えい頻度より低い傾向にあった。

表4 高圧ガス事故事例DBから推定したアンモニア施設におけるフランジの漏えい頻度（尤度）

FLA	漏えい頻度 (回/年)
0.0001	1.05E-04
0.001	7.02E-06
0.01	7.02E-06
0.1	Not available
1	3.51E-06

### 2.6.4 感度解析：高圧ガス事故事例DBから得られた漏えい頻度に関する仮定が結果に与える影響の検討

2.6.1から2.6.3までで述べた、漏えい規模が「不明」であった事故の按分方法、および $N_F$ や $N_{C,j}$ の推定方法には、主観的な判断や仮定が含まれる。このようなデータに適用した判断・仮定が、結果にどの程度影響するかを理解するために有効な手法<sup>39)</sup>として、感度解析を実施した。当論文では、ここまでで採用した値を最も妥当性の高いケースとし、他の仮定から得られたであろう結果と比較することで、その差異について考察した。なお、Davies and Fort<sup>30)</sup>で報告された漏えい頻度を、FLAに変換する手続きが結果におよぼす影響についても感度解析を実施したが、その影響はごくわずかであった。詳細は、当論文を参照されたい。

2.6.2で述べた漏えい規模「不明」の事故の按分方法に関する感度解析として、Very small～Rupture, Minor～Major, Minor～Ruptureに按分したケースの推定を行い、Very small～Majorに按分したケースと比較した。

2.6.3では日本のアンモニア利用施設数 ( $N_F$ ) を、211~1,050程度と推定したうえで、500を採用した。この推定範囲を参考として、感度解析ではLower bound (下限値) を採用したケースとして100, Upper bound (上限値) のケースとして1,000を採用した (表5)。また、施設あたりの機器数 ( $N_{C,j}$ ) に関する感度解析として、CNG供給ステーション・ガソリン供給ステーションの数値などを参考に、代替ケースとして採用する  $N_{C,j}$  を設定した (表6)。

表5の3つのケースと表6の3つのケースを組み合わせ、表7の5つの感度解析のためのケースを設定した。

表5 各ケースにおける日本国内の施設総数 ( $N_F$ )

パラメータ	Lower bound	Most likely	Upper bound
$N_F$ (施設) : アンモニア利用施設の総数	100	500	1,000

表6 各ケースにおける施設あたり機器数 ( $N_{C,j}$ )

パラメータ	機器 ( $j$ )	Lower bound	Most likely	Upper bound
$N_{C,j}$ (個/施設) : 施設あたりの機器 $j$ の数	Flanges	5	10	48

表7 アンモニア施設におけるフランジの漏えい頻度推定に関する5つの感度解析のケース

Case No.	1	2	3	4	5
$N_F$ のケース	Most likely	Lower bound	Upper bound	Most likely	Most likely
$N_{C,j}$ のケース	Most likely	Most likely	Most likely	Lower bound	Upper bound
FLA					
0.0001	1.1E-04	5.3E-03	5.3E-05	2.1E-04	2.1E-05
0.001	7.0E-06	3.5E-04	3.5E-06	1.4E-05	1.4E-06
0.01	7.0E-06	3.5E-04	3.5E-06	1.4E-05	1.4E-06
0.1	NA	NA	NA	NA	NA
1	3.5E-06	1.8E-04	1.8E-06	7.0E-06	7.0E-07

NA: not available

### 3. 結果

#### 3.1 アンモニア燃料船における漏えい規模別漏えい頻度の推定結果

ベイズ更新における収束を診断する指標である  $R_{hat}$  が1.1未満であり収束したことや、そのplotを確認し、感度解析を含むすべてのケースにおいて適切な解が得られた。

アンモニア燃料船における漏えい頻度推定結果を図3に示す。各プロットや信頼区間の数値は当論文の Supplementary material に記載した。図3の黒点・黒線で示した更新1回目のLNG燃料船の漏えい頻度と比較すると、赤点・赤線で示した更新2回目のアンモニア燃料船の漏えい頻度は相対的に低くなった。つまり、LNG燃料船向けの漏えい頻度をアンモニア燃料船のQRAに用いた場合には、定量的リスクが1~10倍高く推計される。この場合、より安全な (保守的な) 評価結果が得られる一方で、より厳格なリスク管理や高額な対策が必要となる可能性が示唆された。この漏えい頻度の差異が生じた理由については4章で考察する。

漏えい頻度の信頼区間について、90%信頼区間 (平均の5%から95%のパーセンタイルをカバーする範囲) は、平均のおよそ1/10~10倍の範囲におさまった。この信頼区間は、常に推定結果に付随する不確実性であり、リスク評価の実施者が考慮する必要がある。

自動弁と手動弁の漏えい頻度推定結果を比較すると、更新1回目ではDavies and Fort<sup>30)</sup>で手動弁の漏えい頻度 (尤度) が自動弁よりもおよそ10倍高いことを反映して、手動弁が自動弁より約10倍高かった。しかし、更新2回目では、両方とも高圧ガス事故事例DBから得られた同一の尤度を取り込んでおり、異なる事前分布にもかかわらず、ほぼ同様の漏えい頻度推定結果が得られた。このような結果が得られた理由は、漏えい頻度の推定結果 (分布) が取り込む尤度の不足と(3)で定義される柔軟性のない直線モデルによって決定されるためである。直近での対応は困難だが、事故データベースの充実やより柔軟なモデリング手法の適用 (例えば、Kaneko and Yuzui<sup>40)</sup>) により、各機器における事故特性をより適切に反映した結果が得られる可能性がある。

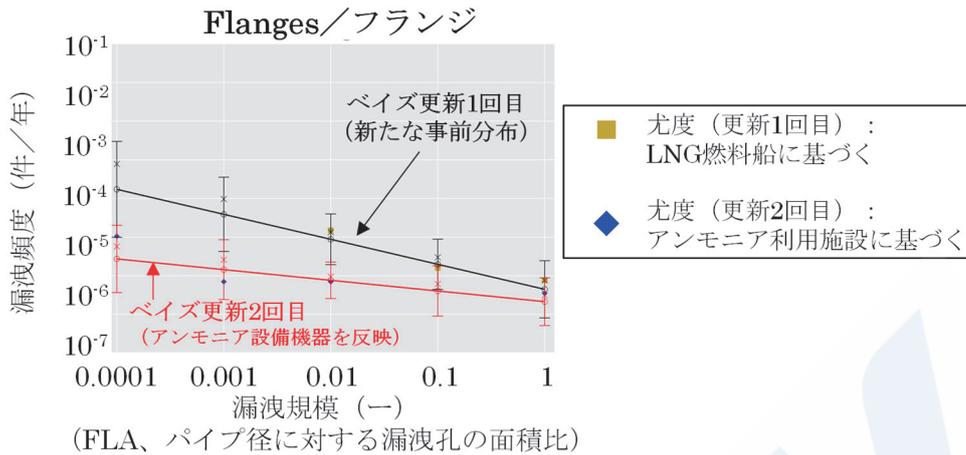


図3 アンモニア燃料船における漏えい頻度推定結果

### 3.2 感度解析結果

本節では、ここまでと同様にFlangesを例に、更新2回目で取り込む尤度に関する感度解析結果について述べる(図4, 図5)。その他の結果は、当論文のSupplementary materialを参照されたい。

まず図4に示す、漏えい規模がUnknownとなった事故の按分方法に関する感度解析結果について述べる。最も妥当として採用したVery small to Majorのケースでは、アンモニア燃料船における漏えい頻度推定結果は、漏えい規模が増加するにつれ、漏えい頻度が減少した。この傾向は、Minor to Major, およびVery small to Ruptureでも同様であるが、漏えい頻度の傾きは緩やかとなった。一方でMinor to Ruptureでは正の傾きを示し、漏えい規模が大きくなるほど頻度も多くなるという、直感に反する結果となった。また、90%信頼区間について、漏えい規模や機器によって結果に違いはあるものの、平均値に対して1/10~10倍範囲に収まった。結果として、Very small to Majorが最も安全側のリスク評価に適した分布が得られたといえる。

次に図5に示す、アンモニア施設数( $N_F$ )および施設あたりの機器数( $N_{C,j}$ )の感度解析結果について述べる。二つのパラメータはともに(10)の分母に位置しており、(10)を介して漏えい規模に関わらずその尤度が上下する。そのため、図5に示した5つの推定結果(赤色の直線)について、傾きはほぼ同様であり、切片のみが異なる結果となった。推定した漏えい頻度分布の平均について、最も妥当なケース(左上)を基準とした場合、他の4つのケースの値は、およそ1/10~10倍の範囲にあった。特に $N_F$ の仮定に依存して平均の差は広がっており、上述したUnknownの按分方法が与える影響よりも大きかった。 $N_F$ のLower boundケースを除き、およそすべての機器・漏えい規模において、Lower boundおよびUpper boundの平均漏えい頻度推定結果は、Most likelyケースの信頼区間内にはほぼ含まれていた。 $N_F$ のLower boundケースで信頼区間から外れた理由として、 $N_F=100$ が過少な設定であったことが挙げられる。100を設定した理由として、 $12,428 \times 1.7\%$ (=211)から、専門家判断として、また区切りの良い数字を設定したためである。

仮定には常に一定のバイアスがあり、情報が限られていることも踏まえると、最も妥当として推計した漏えい頻度の分布は、適切な範囲におさまったものと考えられる。

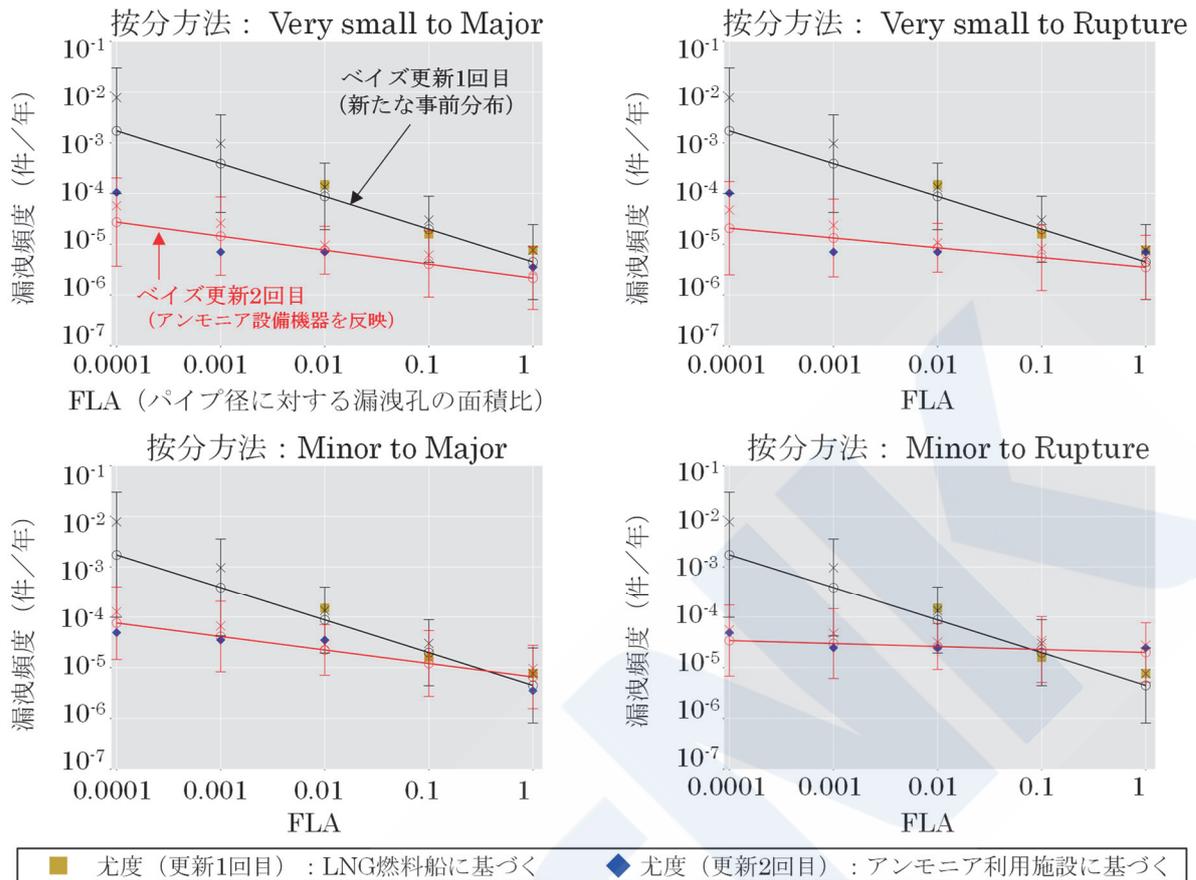


図4 漏えい規模「Unknown」の按分方法に関する感度解析の結果

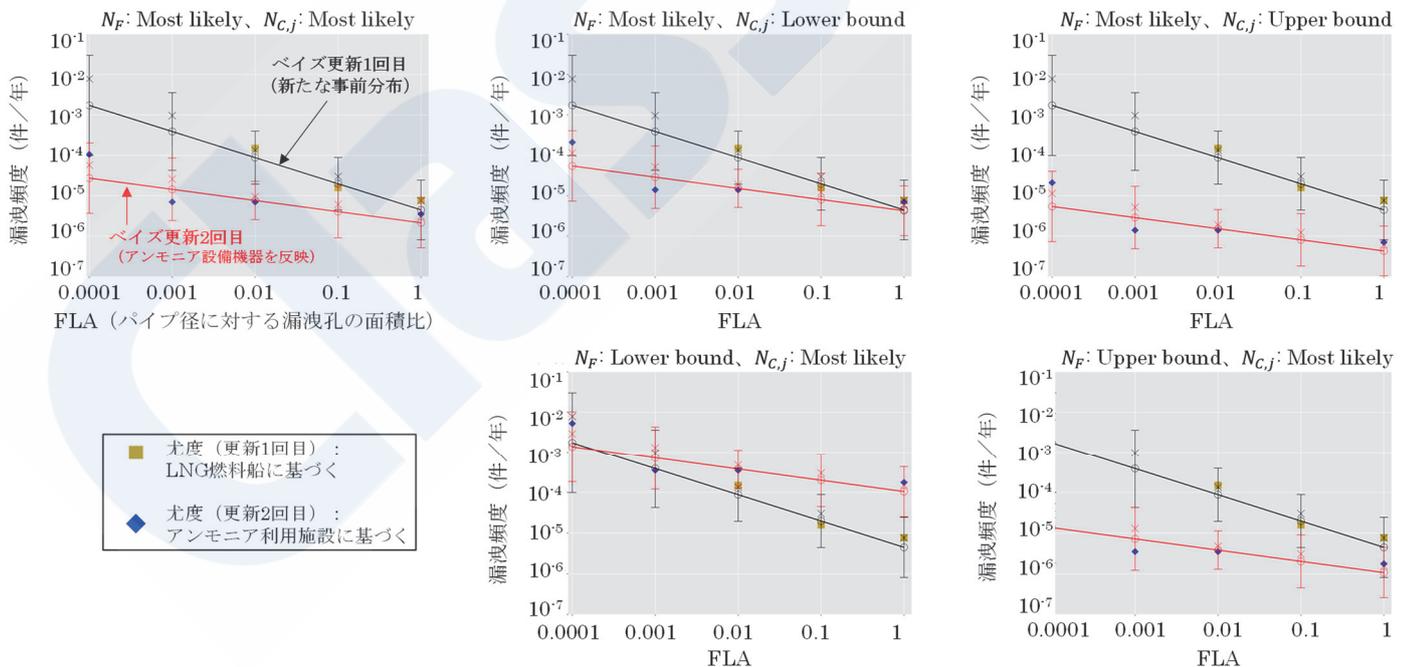


図5 アンモニア利用施設数および施設あたり機器数に関する感度解析の結果

## 4. 考察

### 4.1 アンモニア燃料船と他の燃料船における漏えい頻度の比較

アンモニア燃料船について、本研究では機器別の漏えい頻度を推定しており、Moon et al.<sup>26)</sup>の推定結果を比

較した。なお、上述した研究以外に、アンモニアの事故特性を漏えい頻度に反映した研究は限られており、直接の比較は困難であった。Moon et al.<sup>26)</sup>はシステムとしてアンモニア燃料船全体からの漏えい頻度を $2.40 \times 10^{-2}$ と推計しており、これは従来のLPGタンカー船の $3.10 \times 10^{-2}$ よりも低く、77%に相当する。当研究では船舶全体からの漏えい頻度は推定していないため、直接の比較はできないものの、アンモニア燃料船における漏えい頻度と、尤度として取り込んだLNG燃料船の機器別の漏えい頻度を比較すると、同様の傾向にあった。アンモニア燃料船でLNG燃料船よりも漏えい頻度が低い理由として、炭化水素燃料と異なり、アンモニアは可燃性と毒性の両方を有するため、比較的厳格な管理が実施されているためと考えた。一方で、我々の推計したアンモニア燃料船とLNG燃料船の漏えい頻度の差異は、Moon et al.<sup>26)</sup>の77%よりも大きかった。この理由については、Moon et al.<sup>26)</sup>では両方の燃料船ともに海上事故のデータソースから結果を導出した一方、我々は陸上システム由来の尤度と海上システム由来の頻度を比較したため、より差が大きくなったからと考えた。

#### 4.2 漏えい頻度推定の不確実性に影響する要素の定性的な整理

当論文で推定した漏えい頻度が真値に対して過少か過大かを十分に考察できるだけの先行研究は、4.1で述べたように不足しているが、ここでは可能な範囲で整理する。

まず、既に述べたように、更新2回目に取り込んだ尤度は、高圧ガス事故事例DBから抽出した日本における陸上のアンモニア施設での運用・管理状況が反映されている。DBには1965年以降の事故が含まれるため、2025年現在までの材料科学、建設技術、運用管理の進歩を踏まえると、当論文で推定した漏えい頻度を用いた場合には、安全側のQRAとなる可能性がある。一方で、海上系システムは陸上系システムに比べると、外部負荷が一般的に大きく、この要素は漏えい頻度に反映されていないため、危険側のQRAとなる可能性もある。

このように高圧ガス事故事例DBのみから尤度を取り込んだために、いくつかの考慮不可能な要素があり、この点は課題である。ただし、1章で述べたように、既存のデータベースではアンモニアに関する事故は系統的にまとめられておらず、取り込むに際して何らかの工夫が求められる。関連してLaChance et al.<sup>27)</sup>では、複数のデータベースから得られた尤度をデータ点群として取り込んでいるものの、データ点群がバラつく場合に、90%信頼区間が拡大する事例も示されており、この点も注意が必要である。

報告バイアスにも注意が必要である。Mulcahy et al.<sup>39)</sup>は、ごく小さな漏えい規模の漏えい頻度は検出困難で、かつ報告されにくいことから、推計と実態に乖離が生じうることを指摘している。さらに、彼らは、漏えい頻度の予測結果は慎重に解釈すべきであり、小さな漏えいへの外挿はバイアスを含む可能性があること、かつそのバイアスの方向は明確でない旨を指摘しており、データを単純に追加するだけでは、不確実性が減少しないことを示唆している。

#### 4.3 機器定義に関する整理

当論文で推定した漏えい頻度を参照する際は、名目上の意味と部品の実際の状態を考慮することも重要である。表2と関連して言及したように、機器の指す範囲は出典によって異なる可能性がある。

Joint, Flange, Instrumental connectionについて、類似語ではあるものの異なる機器を指す場合が想定される。実際、我々が日本の高圧ガス事故事例DBを参照した際に、これらを記載情報だけから区別することはできなかった。Davies and Fort<sup>30)</sup>でも“Instrument connections include flanges within the given release frequency”と述べており、同様の困難にあったと想像される。

またPipeについては、一重管か二重管かによって判断が異なる。日本の高圧ガス保安法では、アンモニアなどの有害物質を扱うPipeは二重管が義務付けられているが、漏えいガス拡散防止措置が講じられている場合、一重管も許可されている。ほとんどの施設で防止措置が採用されており、一重管が一般的だとされている。この背景を踏まえ、高圧ガス事故事例DBに記載のパイプはすべて一重管と仮定した。Davies and Fort<sup>30)</sup>でも管の層数に言及したうえで、一般的に一重管が用いられることを示唆しており、方法論としても整合的な仮定と考えた。

#### 4.4 推定頻度の適用可能性

当論文で推定したアンモニアの事故特性を反映した漏えい頻度により、これまでに炭化水素燃料から導出された漏えい頻度<sup>(20) 22)</sup>などを用いたQRA<sup>24) 25)</sup>を更新することが可能であり、よりアンモニアの特性を反映したアンモニア燃料船のQRAを支援できる。当研究で推定したアンモニア燃料船に関する漏えい頻度は、アンモニアの漏えい事故に関する特徴を反映させた最初の研究であり、今後数十年間にわたるQRAの精度と信頼性を向上させる可能性がある。

## 5. 結論

ベイズ更新モデルを構築し、既存データが限られるアンモニア燃料船における機器別（フランジ、ジョイント、パイプ、バルブ）の漏えい頻度を推定する方法を提案した。特に更新2回目の尤度を、日本国内の陸上アンモニア施設における事故事例から推定し、ベイズ更新モデルに取り込むことで、アンモニアの事故特性を反映させた。推定した漏えい頻度の不確実性について、感度解析、先行研究におけるアンモニア燃料船・LNG燃料船のLFと比較、および尤度として取り込んだ高圧ガス事故事例DBの特徴の整理などを通じて考察した。得られた推定結果は、アンモニアの厳格な管理を反映して、既存のLNG燃料船の漏えい頻度よりも低いと考えられた。推定した漏えい規模別・機器別の漏えい頻度を用いることで、定量的なリスク管理枠組み、規制遵守の支援、アンモニア燃料船の運用安全基準の向上に適合している。

## 謝辞

本原稿の執筆にあたりClassNK 柳本 史教様に有益なご助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) N. KOJIMA, K. ONO, M. YOSHIDA, E. KATO, and F. YANAGIMOTO, “Bayesian estimation of ammonia leak frequency for risk assessment of ammonia-fueled vessels,” *Results Eng.*, vol. 26, p. 104650, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.104650.
- 2) International Maritime Organization (IMO), “Second IMO GHG Study 2009.” 2010.
- 3) International Maritime Organization (IMO), “2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships ANNEX 15.” 2023.
- 4) “ClassNK 代替燃料インサイト Version 2.2, 2025.” ClassNK. [Online]. Available: [https://download.classnk.or.jp/documents/ClassNKAlternativeFuelsInsight\\_j.pdf](https://download.classnk.or.jp/documents/ClassNKAlternativeFuelsInsight_j.pdf)
- 5) 内閣官房 et al., “2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略.” 2021.
- 6) International Energy Agency (IEA), “Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach.” 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>
- 7) O. B. Inal, B. Zincir, and C. Deniz, “Investigation on the decarbonization of shipping: An approach to hydrogen and ammonia,” *Fifth Int. Hydrog. Technol. Congr.*, vol. 47, no. 45, pp. 19888-19900, May 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.01.189.
- 8) International Renewable Energy Agency (IRENA), “Innovation outlook renewable ammonia.” 2022. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2022/May/Innovation-Outlook-Renewable-Ammonia>
- 9) F. Y. Al-Aboosi, M. M. El-Halwagi, M. Moore, and R. B. Nielsen, “Renewable ammonia as an alternative fuel for the shipping industry,” *Curr. Opin. Chem. Eng.*, vol. 31, p. 100670, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.coche.2021.100670.
- 10) A. A. Levikhin and A. A. Boryaev, “Low-carbon ammonia-based fuel for maritime transport,” *Results Eng.*, vol. 25, p. 104175, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.104175.
- 11) 厚生労働省 職場のあんぜんサイト, “安全データシート：アンモニア.” 2015. [Online]. Available: <https://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen/gmsds/7664-41-7.html>
- 12) H. Jang et al., “Regulatory gap analysis for risk assessment of ammonia-fuelled ships,” *Ocean Eng.*, vol. 287, p. 115751, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.115751.
- 13) International Maritime Organization (IMO), “SOLAS [WWW document].” [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/ConferencesMeetings/Pages/SOLAS.aspx>
- 14) P. A. Duong, B. R. Ryu, J. Jung, and H. Kang, “A Comprehensive Review of the Establishment of Safety Zones and Quantitative Risk Analysis during Ship-to-Ship LNG Bunkering,” *Energies*, vol. 17, no. 2,

- 2024, doi: 10.3390/en17020512.
- 15) Y. Xie, J. Liu, Z. Hao, Z. Xu, J. Qin, and J. Zhu, “Numerical simulation and experimental study of gas diffusion in a ship engine room,” *Ocean Eng.*, vol. 271, p. 113638, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.113638.
  - 16) S. Lee, “Quantitative risk assessment of fire & explosion for regasification process of an LNG-FSRU,” *Ocean Eng.*, vol. 197, p. 106825, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106825.
  - 17) B. Chu and D. Chang, “Effect of full-bore natural gas release on fire and individual risks: A case study for an LNG-Fueled ship,” *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 37, pp. 234-247, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jngse.2016.11.043.
  - 18) B. Jeong, B. S. Lee, P. Zhou, and S. Ha, “Evaluation of safety exclusion zone for LNG bunkering station on LNG-fuelled ships,” *J. Mar. Eng. Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 121-144, Sep. 2017, doi: 10.1080/20464177.2017.1295786.
  - 19) Health and Safety Executive (HSE), “Hydrocarbon Releases System.” 2006 1992.
  - 20) Health and Safety Executive (HSE), “Offshore hydrocarbon releases 2016-2021. Statistics in offshore oil and gas. [xlsx file].” 2022. [Online]. Available: <https://www.hse.gov.uk/offshore/assets/docs/hcr2016-2021.xlsx>
  - 21) Committee for the Prevention of Disasters (CPR), “Guidelines for Quantitative Risk Assessment ‘Purple book.’” 1999.
  - 22) International Association of Oil & Gas Producers (IOGP), “Risk Assessment Data Directory -Process Release Frequencies-, No. 434-1, Ver. 3.0.” 2019.
  - 23) International association of Oil & Gas Producers (IOGP), “Risk Assessment Data Directory -Process Release Frequencies-, No. 434-1.” 2010.
  - 24) Det Norske Veritas (DNV), “Ammonia Bunkering of Passenger Vessel - Concept Quantitative Risk Assessment Green Coastal Shipping Programme.” 2021. [Online]. Available: <https://grontskipsfartsprogram.no/wp-content/uploads/2021/07/Ammonia-bunkering-of-passenger-vessel-Concept-quantitative-risk-assessment.pdf>
  - 25) M. Yang and J. S. L. Lam, “Risk assessment of ammonia bunkering operations: Perspectives on different release scales,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 468, p. 133757, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.133757.
  - 26) Kyung-Tae Moon, Paul Davies, and Louise Wright, “Ammonia as a marine fuel: likelihood of ammonia releases,” *J. Adv. Mar. Eng. Technol.*, vol. 47, no. 6, pp. 447-454, 2023, doi: 10.5916/jamet.2023.47.6.447.
  - 27) J. L. LaChance, W. G. Houf, L. Fluer, and B. Middleton, “Analyses to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards.,” Sandia National Laboratories, doi: 10.2172/983689.
  - 28) K. M. Groth, J. L. LaChance, and A. P. Harris, “Early-stage quantitative risk assessment to support development of codes and standard requirements for indoor fueling of hydrogen vehicles.,” Sandia National Laboratories, doi: 10.2172/1057251.
  - 29) 木原 武弘・牧野 良次・小野 恭子・佐分利 禎・久保田士郎・恒見 清孝・和田 有司, “有機ハイドライド型水素ステーションの漏洩頻度のベイズ推定,” *安全工学*, vol. 56, no. 4, pp. 245-254, 2017, doi: 10.18943/safety.56.4\_245.
  - 30) P. A. Davies and E. Fort, “LNG as a marine fuel: Likelihood of LNG releases,” *J. Mar. Eng. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 3-10, Sep. 2013, doi: 10.1080/20464177.2013.11020285.
  - 31) 高圧ガス保安協会, “高圧ガス事故事例データベース.” 2023. [Online]. Available: [https://www.khk.or.jp/public\\_information/incident\\_investigation/hpg\\_incident/incident\\_db.html](https://www.khk.or.jp/public_information/incident_investigation/hpg_incident/incident_db.html)
  - 32) J. Spouge, “New generic leak frequencies for process equipment,” *Process Saf. Prog.*, vol. 24, no. 4, pp. 249-257, Dec. 2005, doi: 10.1002/prs.10100.
  - 33) D. Spiegelhalter, A. Thomas, N. Best, and D. Lunn, “WinBUGS User Manual, version 1.4.” 2003.

- 34) K. Kellner and M. Meredith, “Package ‘jagsUI’: A wrapper around ‘rjags’ to streamline ‘JAGS’ analyses.” 2024. [Online]. Available: <https://kenkellner.com/jagsUI/>
- 35) International Association of Classification Societies (IACS), “No.146 (Aug 2016) Risk Assessment as Required by the IGF Code.” 2016. [Online]. Available: <https://iacs.org.uk/resolutions/recommendations/141-160>
- 36) US Chemical Safety and Hazard Investigation Board, “Key Lessons for Preventing Hydraulic Shock in Industrial Refrigeration Systems.” 2015.
- 37) 鈴木則夫, “高圧ガス保安法と液化石油ガス法,” 2017. [Online]. Available: <https://www.khk.or.jp/Portals/0/khk/info/journal/2018/201708-10.pdf>
- 38) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所, “水素ステーションとその周辺のリスク評価書.” 2019. [Online]. Available: <https://riss.aist.go.jp/results-and-dissemin/846/>
- 39) G. W. Mulcahy, D. M. Brooks, and B. D. Ehrhart, “Using Bayesian Methodology to Estimate Liquefied Natural Gas Leak Frequencies.” 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2172/1782412>
- 40) F. Kaneko and T. Yuzui, “A New Function for Frequency Analysis in the Risk Assessment of Offshore Oil-Related Platforms,” *J. Ship Res.*, vol. 67, no. 02, pp. 109-119, Jun. 2023, doi: 10.5957/JOSR.04210009.



# 主機回転数を監視することによって実現する 荒天遭遇時の省エネかつより安全な運航について

宋 玉中\*, 見良津 黎\*, 高木 道雄\*, 若生 拓也\*, 高品 純志\*\*

## 1. はじめに

2023年に国際海事機関（IMO）は、2050年頃までに国際海運における温室効果ガス（GHG）排出量をネットゼロとする目標を設定した。この目標達成に向けて、海運業界では代替燃料の採用や更なるエネルギー効率の向上といった対策が検討されている。特に、エネルギー効率の向上は、カーボンフリー又はカーボンニュートラル燃料の導入後においても、コスト削減の観点から重要である。これは、代替燃料の価格が現行の重油（HFO）と比較して大幅に高騰すると予測されているためである。エネルギー効率の向上は、省エネ装置の導入や運航最適化によって達成可能であり、特に運航最適化は通常ハードウェアの変更を伴わないため、比較的容易に実施できるのが利点である。

本稿では、荒天遭遇時における主機の運転最適化による燃料節約に焦点を当てる。第2章では、様々な海象条件下での主機及び船舶の挙動について概説する。第3章では、最大到達可能主機回転数（Maximum Attainable Main Engine Speed, MAMES）の概念を説明する。第4章では、荒天遭遇時に主機の作動限界により発生する燃料損失量の試算結果を示す。第5章では、荒天遭遇時に燃料を節約するための主機運転方法を示し、第6章では結論をまとめる。

## 2. 各海象条件下における主機と船舶の挙動

船舶が荒天に遭遇すると、船体抵抗が増加するため、一定の船速を維持するには主機の出力を増加させる必要がある。図1は、仮想的なパナマックス型ばら積み貨物船（主機の出力：10,000kW、回転数：80rpm）における主機出力、船速、及び主機回転数の関係を概念的に示したものである。図1の左側は、波高の異なる海象条件下における船速と必要主機出力の関係を示している。図1の右側は、異なる海象条件下における主機回転数と主機出力の関係を示しており、これらの曲線は各海象条件に対応するプロペラ特性曲線に基づいて計算された。通常、船舶は一定の主機（プロペラ）回転数で航行する。したがって、海象が穏やかな状態から荒れた状態へ変化すると、操船者が意図的に操作しない限り主機は指示された回転数に対して、船速 - 出力の運転点が図1左側の破線で示すように移動する。

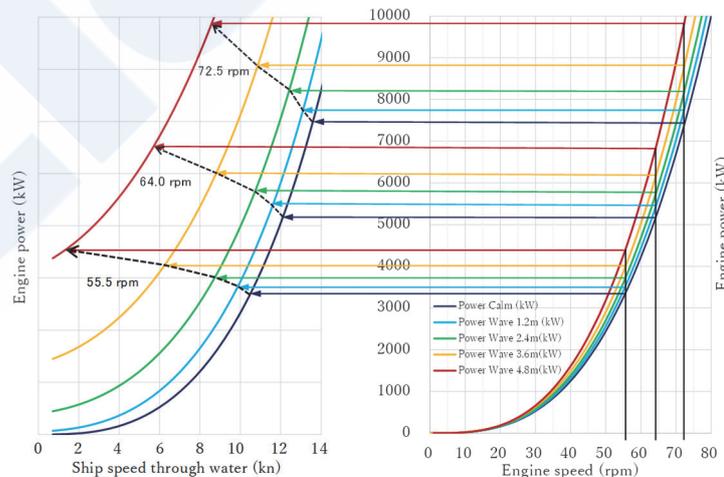


図1 仮想のパナマックス型ばら積み貨物船における主機出力、船速、主機回転数の関係

\* 開発本部 技術研究所

\*\* 総務本部 人材開発センター

この一般的な挙動は、実船計測データとも概ね一致する。図2は、P. Guptaら<sup>1)</sup>が発表した、全長200mの一般貨物船における3年間の実船計測データを示したものである。各プロットは、15分間の平均値である。なお、船体の加速・減速時のデータを除外する前処理を行い、準定常状態にあるとみなせるように処理されている。

図2の各プロットは広範囲に散在しているように見えるが、一部のプロットは特定の傾斜を持つ直線に近い複数の線上に集中していることが分かる。これらの線は、図1の説明で述べたように、特定の主機回転数が頻繁に選択されていることを示している。

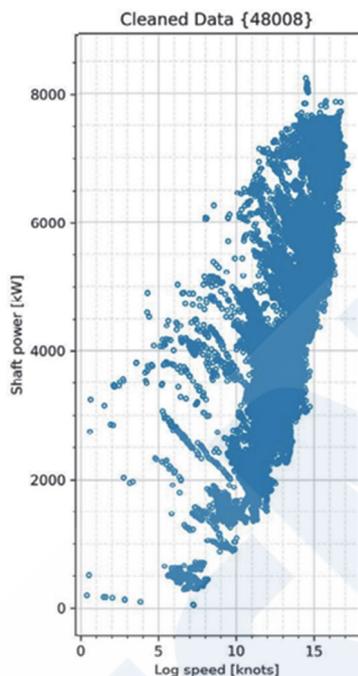


図2 一般貨物船の計測データ<sup>1)</sup>

### 3. 最大到達可能主機回転数 (MAMES)

一般的な検討手法では、指示された回転数を維持するために主機は必要なトルクを自在に供給できる前提で取り扱われることが多い。実際には主機の出力には回転数ごとに限界があり、これは主機の過負荷を避けるため、特定の回転数において発生可能なトルクに制限が設けられているためである。この制限は1サイクルあたりにシリンダーへ噴射される燃料の量を制限することで実現される。1サイクルあたりの燃料噴射量は燃料発熱量、燃焼効率、機械的リンク機構等を介してトルクを決定する支配的ファクターであり、簡易的には発生するトルクと比例関係として取り扱える。このため燃料噴射量制限は本質的には回転数ごとのトルク限界に相当する。

従来、燃料噴射ポンプにおいて、燃料ラックにより1サイクルあたりの燃料噴射量が制御されていたことから、この限界は一般的に燃料ラックリミッターと呼ばれる。図3の右側の図に示す赤の破線の曲線が、この燃料ラックリミッターを表している。

プロペラの負荷曲線が燃料ラックリミッターと交点を持つ場合、主機の駆動トルクがプロペラ負荷トルクを上回れないため、理論上、その交点を超える回転数までプロペラ（主機）を加速することは不可能となる。言い換えれば、この交点がMAMESを決定する。

プロペラ負荷の観点では、最も厳しい条件はボラードプル (bollard pull) であり、船体が静止した状態でプロペラにかかる負荷状態を指す。図3右側の黒の破線がこの状態を示している。ボラードプル時の必要出力を正確に算出することは困難であるが、一般的に軽負荷プロペラ曲線と比較して15~20%のheavy running factorが適用されているため、図3では、20%のheavy running factorを使用している<sup>2)</sup>。ボラードプル状態では、MAMESは通常のプロペラ負荷時（たとえ荒天時であっても）と比較して著しく低くなることから、図3右側から確認できる。

さらに、特定の回転数においてトルク限界により最大利用可能出力が制約されるため、船速も利用可能出力に応じて制限される。例えば、図3左側では、主機回転数64.0rpm及び72.5rpmにおいて、それぞれ遭遇有義波

高 (significant wave height) が3.6m及び2.4mにおいて機関出力が限界に達するためそれを超える波高条件下においては船速が著しく低下することが示されている。この現象は、図2のプロットの連なる線が左に向ってある範囲では上がるが、左縁辺りでは左斜め下方向に変化している様子からも確認できる。

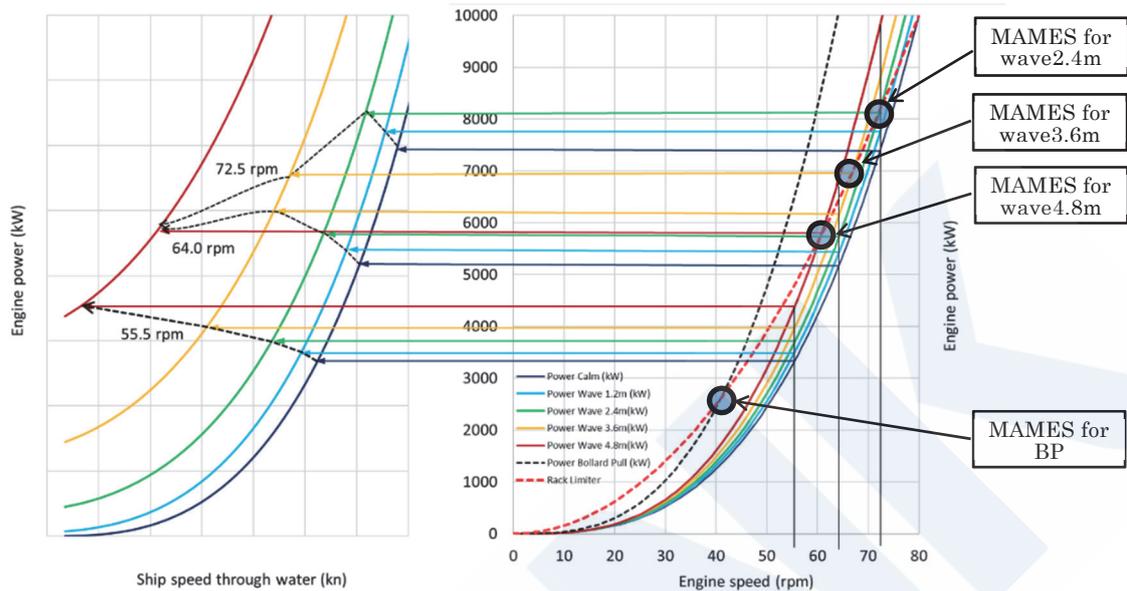


図3 燃料ラックリミッターによるMAMESの概念

パナマックス型ばら積み貨物船の実船計測データでも同様の傾向が確認されており、その結果を図4に示す<sup>3)</sup>。各プロットは1時間の平均値を示す。出力は最大連続出力 (MCR) を基準に、対水船速はサービススピードの値を基準にそれぞれ正規化している。各プロットの色は本船の遭遇した波高を表す。同様の正規化は、図6、図7及び図8においても適用している。

図4より、主機出力が0.2~0.3の低負荷領域の範囲では、プロットは左上に傾くほぼ直線上に集中している。これは、本船がMAMES以下の特定の指示回転数でよく運航されていたことを示している。一方、主機出力が0.4~0.6の比較的高負荷領域の範囲に達すると、サンプリング領域の左側にある一部のプロットでは、データ点の傾きが水平又は左下方向へ変化している。これは、主機のトルクリミットに達したことを示しており、4m程度の比較的高い波高に遭遇していることと対応している。

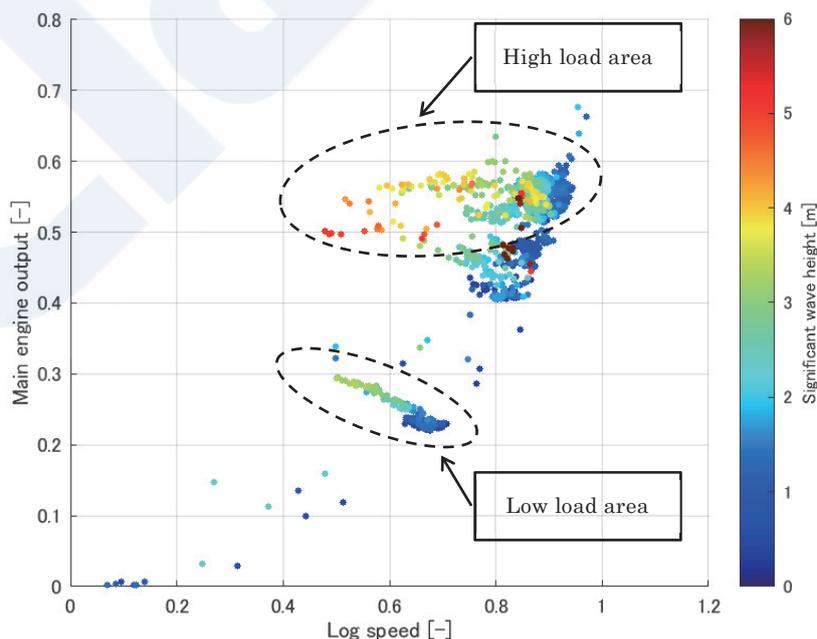


図4 パナマックス型ばら積み貨物船の主機出力と船速の関係を示す実測データ (色:有義波高)

#### 4. 過大な指示回転数による燃料ロスの発生

一般的なディーゼル主機の调速メカニズムにおいては指示回転数に追従するようにガバナーが目標燃料ラック位置を増減する<sup>4)</sup>。主機回転数が指示回転数を下回る状況においては、ガバナーは1サイクルあたりの燃料供給量を増加するよう作動する。しかし、指示回転数がMAMESを超えている場合、燃料ラックリミッター（トルクリミッター）によって理論上、その回転数に達し得ない。この場合、**図5**に示すように、MAMESと指示回転数の差に対応する追加燃料は回転数増加につながらないため無駄となるものと考えられる。

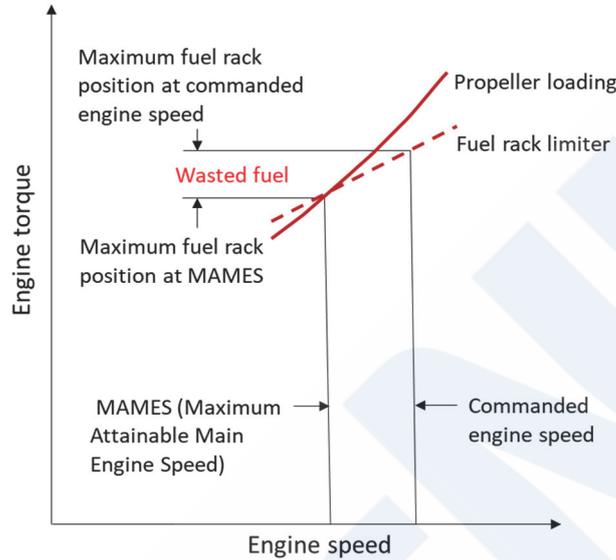


図5 MAMES及び指示回転数と燃料損失の関係

荒天に遭遇し、指示された主機回転数を達成できない状況が実船計測によって確認されている。**図6**は、パナマックス型ばら積み貨物船における約70日間の航海データを基に、主機回転数と指示回転数の関係をFuel indicator（燃料ラック）（左図）及び有義波高（右図）の対比で表したものである。このケースでは、主機回転数と指示回転数の差は最大で約3.0rpmとなり、特に指示回転数が0.79及び0.85付近で顕著であった。**図6**左側で注目すべき点は、主機回転数が指示回転数を下回ると、指示回転数の高さに関係なく1サイクルあたりの燃料噴射量（Fuel indicator）が増加することである。これは、本章冒頭で述べた通り、ガバナーが主機回転数と指示回転数の速度差を検知すると、機関を加速し速度差を埋めようとするために燃料供給量を増やすためである。しかし、速度差を埋めることができない場合、燃料ラックは高止まり状態が続くが、増速につながらないため燃料ロスが生じるものと考えられる。

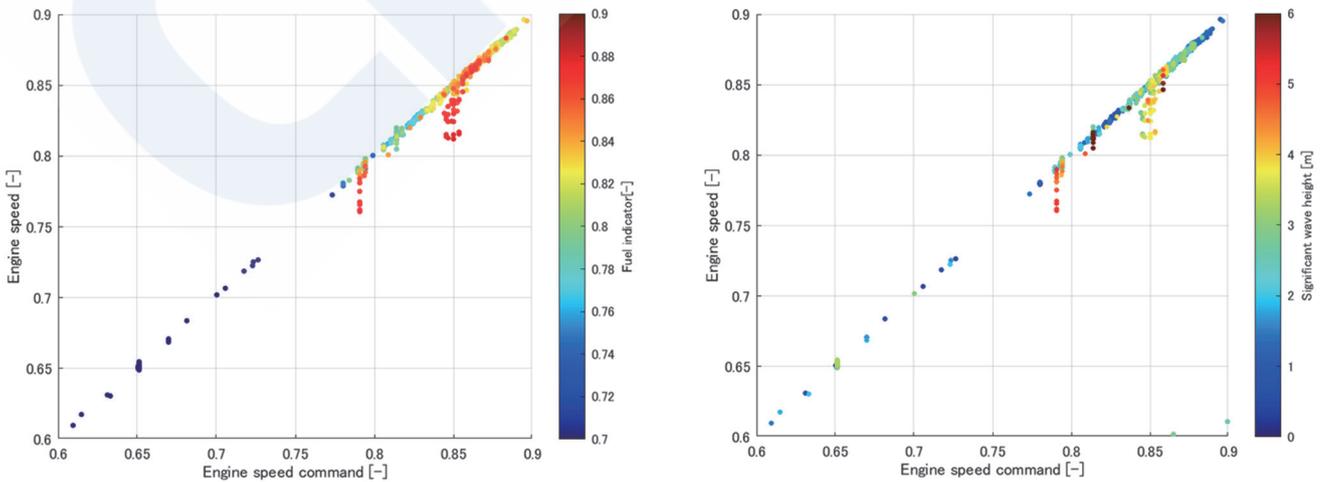


図6 パナマックス型ばら積み貨物船の主機回転数と指示回転数の関係  
（左側の色：Fuel indicator，右側の色：有義波高）

図7は前述の実船計測データを用いて、Fuel indicator（燃料ラック）と指示回転数の関係を示し、更に機関の製造工場でのShop test時のデータと比較するものである。プロットの色は有義波高を表す。指示回転数比が0.79及び0.85付近で高い波高に対応して主機回転数と指示回転数の差が生じ、Fuel indicatorがShop test時の値を上回っていることが示されている。これは、主機が指示回転数に到達できないためガバナーが燃料供給をラックリミッターまで増やしたものと考えられる。

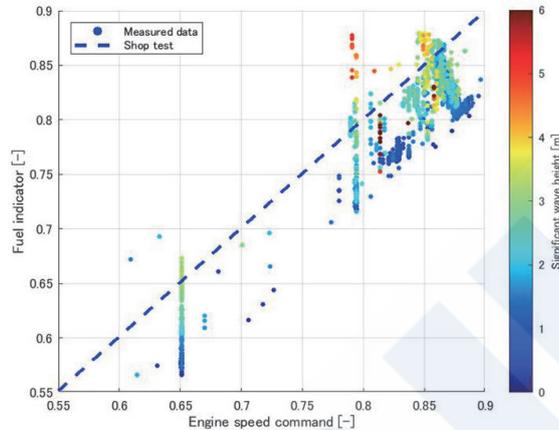


図7 パナマックス型ばら積み貨物船のFuel indicatorと指示回転数の関係

燃料ロス量は、MAMESと主機回転数及び指示回転数の差によって決まる。船舶の朽化に伴い、船体及びプロペラの汚れが増し、推進効率が低下し、先の図1で示した特性曲線は負荷増加方向へ変化するため、同じ海象条件においてもMAMESは低下する傾向がある。そのため、船舶の老朽化により、主機回転数及び指示回転数の差がより生じやすくなり、燃料ロス量は増加すると考えられる。

表1に、仮想の主機（10,000kW，80rpm）に対する異なるMAMES及び主機回転数と指示回転数の速度差による燃料ロス量の推定値を示す。左端の列「N/N<sub>MCR</sub>」は、MAMESと最大連続運転出力（MCR）の回転数比を示している。表から分かるように、速度差が大きいほど燃料ロス量は増加する。一方、MAMESが上昇すると、燃料ロス量は増加するが、燃料消費量全体に占める割合は減少する。

黄色で示した行は、MAMES比率が0.79及び0.85であり、これらは前述のパナマックス型ばら積み貨物船で速度差が観測された回転数に対応している。このMAMES比率において、速度差が3rpm発生すると、燃料ロス量はそれぞれ9.8%及び9.0%に達し、1日あたりそれぞれ1,943kg及び2,260kgの燃料ロスがあると試算される。

表1 仮想の主機（10,000kW，80rpm）に関する燃料ロス量の試算

N/N <sub>MCR</sub>	Load (%)	Speed gap (1 rpm)		Speed gap (2 rpm)		Speed gap (3 rpm)	
		Wasted fuel (kg/day)	Wasted fuel (%)	Wasted fuel (kg/day)	Wasted fuel (%)	Wasted fuel (kg/day)	Wasted fuel (%)
0.70	34	504	3.6	1,017	7.3	1,540	11.0
0.71	36	522	3.5	1,054	7.1	1,594	10.8
0.73	38	541	3.5	1,091	7.0	1,650	10.6
0.74	40	559	3.4	1,128	6.9	1,707	10.4
0.75	42	579	3.4	1,167	6.8	1,764	10.3
0.76	44	598	3.3	1,206	6.7	1,823	10.1
0.78	47	618	3.3	1,245	6.6	1,882	9.9
0.79	49	638	3.2	1,285	6.4	1,943	9.8
0.80	51	658	3.1	1,326	6.3	2,004	9.6
0.81	54	679	3.1	1,367	6.2	2,067	9.4
0.83	56	699	3.1	1,410	6.2	2,130	9.3
0.84	59	721	3.0	1,452	6.1	2,194	9.2
0.85	61	742	3.0	1,496	6.0	2,260	9.0
0.86	64	764	2.9	1,540	5.9	2,326	8.9
0.88	67	787	2.9	1,584	5.8	2,393	8.8
0.89	70	809	2.8	1,629	5.7	2,461	8.6
0.90	73	832	2.8	1,675	5.6	2,530	8.5

図8に、パナマックス型ばら積み貨物船の一航海の時刻歴データを示している。赤で囲まれた箇所は、主機回転数と指示回転数の速度差が発生した時間帯であり、有義波高4mを超える横波に遭遇した際に、指示回転数を意図的に下げたことが確認されている。しかし、指示回転数を下げた後も、主機回転数との差が約8時間継続し、最大約2.5rpmの速度差が確認された。この速度差による燃料ロスを、指示回転数と実際の回転数の差が最大(約2.5rpm)の場合と、差がない場合の2つのケースでのFuel indicatorの差を基に計算した。その結果、推定された燃料ロス量は2,286kg/日であり、これは総燃料消費量の12.2%に相当する。

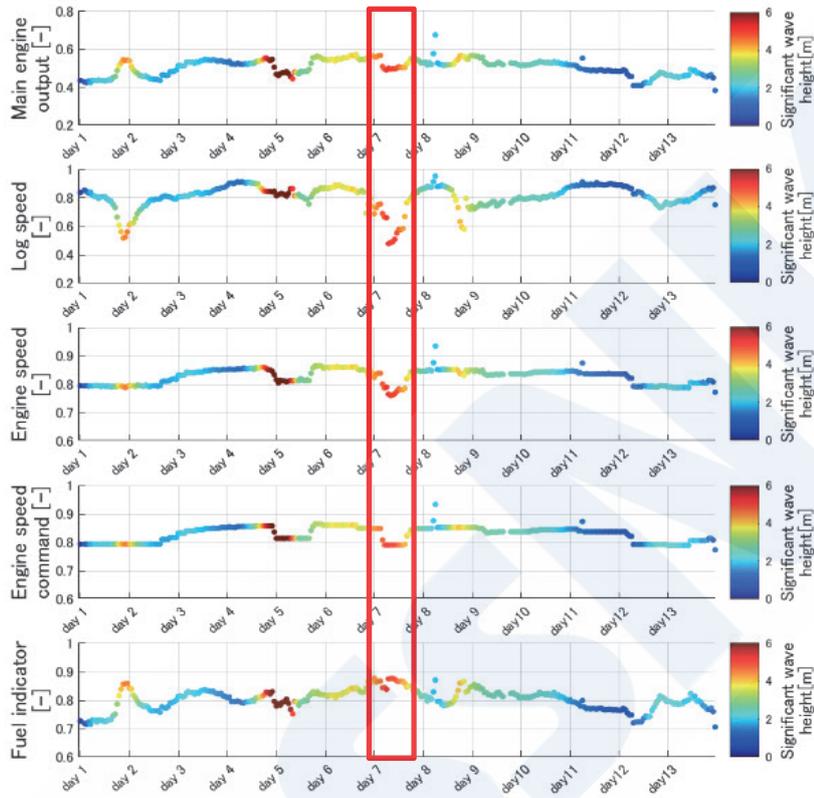


図8 パナマックス型ばら積み貨物船の関連項目の時系列データ

主機回転数と指示回転数との速度差による燃料ロス量は、船舶が荒天に遭遇する確率に依存していると考えられる。表2は、代表的な航路ごとに、1年間に遭遇波高が4.5mを超える時間とその比率を示し、それらの期間中に2.5rpmの速度差を継続した場合の燃料ロス量とコストを推定したものである。パナマックス型ばら積み貨物船の代表的な航路は、図9に示すAISデータを基に選定した。各航路の仮想的な遭遇海象データは波浪追算(ERA5)と荒天回避モデルを用いて算出した<sup>5) 6)</sup>。船舶の運航率は80%、燃料価格(VLSFO)は600USD/MT、C重油の比重は0.96と仮定した。

表2によると、年間で4.5mを超える波に遭遇する確率は、アジア・オーストラリア航路で81時間、アジア・米国西岸航路で901時間、米国東岸・ヨーロッパ航路で1,196時間と推定された。また、波高4.5mを超える期間中に2.5rpmの速度差が継続した場合、1年間で発生する燃料ロスは8~114MT、対応するコストは5,000~71,000USDと推定された。なお、これらの試算は、パナマックス型ばら積み貨物船を対象とし、さまざまな仮定の下で算出したものである点に留意が必要である。

表2 各航路で1年間に遭遇波高が4.5mを超える時間、燃料ロス量及びコスト

Route	Time (h)	Time ratio (%)	Wasted Fuel (MT)	Wasted Fuel cost (USD)
Asia-Australia	81	0.9	8	5,000
Asia-US West Coast	901	10.3	86	54,000
US East Coast-Europe	1,196	13.7	114	71,000

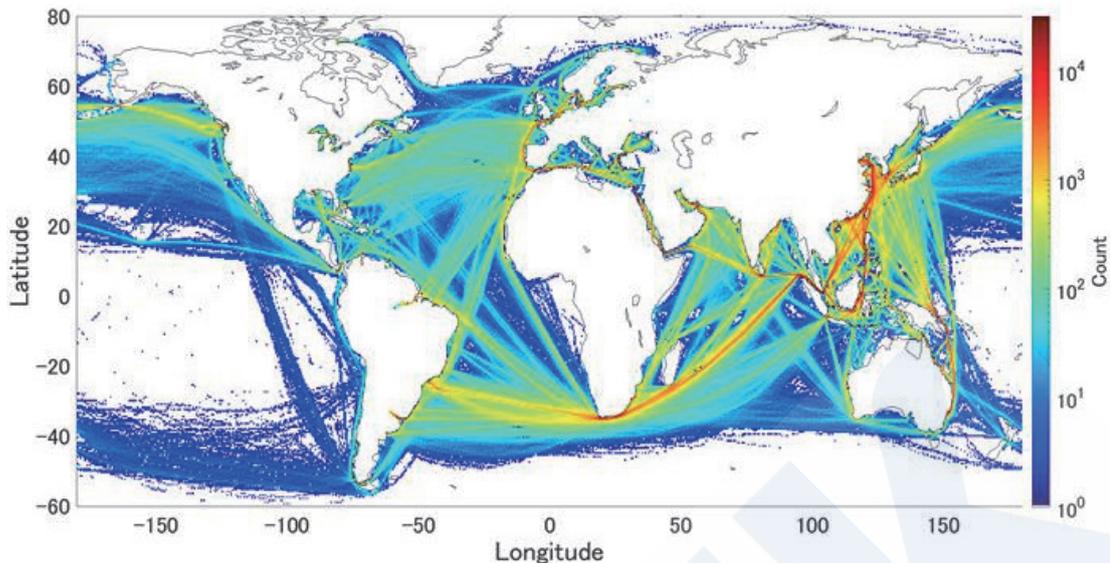


図9 AISデータに基づくパナマックス型ばら積み貨物船の航路

経済的な視点に加え、安全性の観点も重要である。速度差が存在する間は主機が速度差を埋めようとし続けるため、常に加速状態に置かれる。この状態では、過給機の回転体の慣性により、空燃比が定常状態よりも低下する傾向がある。空燃比が低下すると、完全燃焼が達成されず、一時的に高密度の黒煙を排出する可能性がある。排気ガス中の不完全燃焼粒子（すす）は過給機タービンブレードに付着し、不均衡を生じさせる（図10）。この不均衡により振動が生じローターやベアリングの急速な摩耗を引き起こす可能性がある<sup>7)8)</sup>。

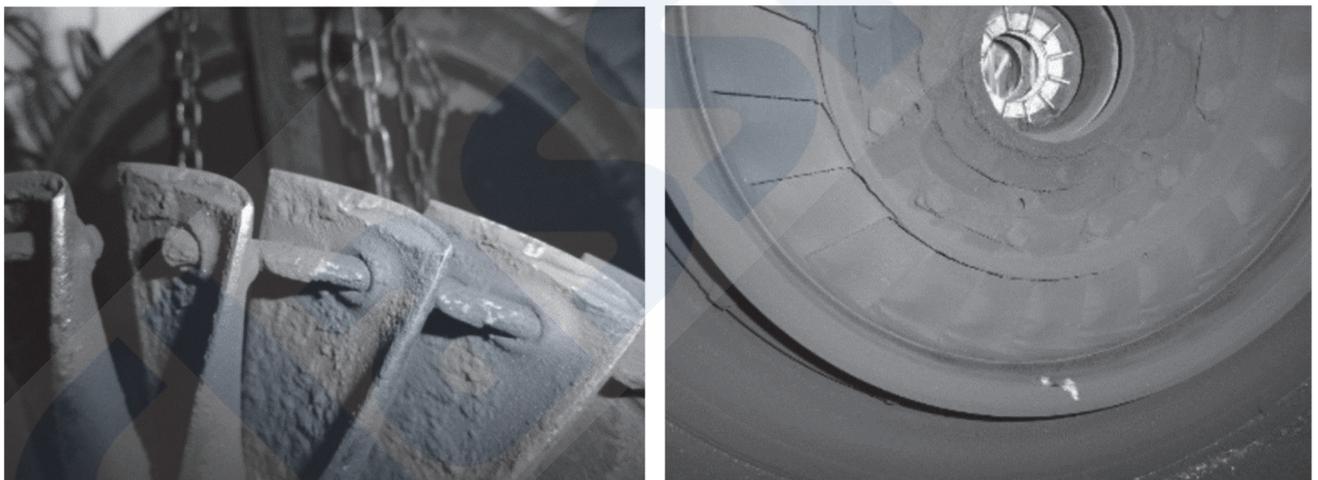


図10 過給機部品のすすによる汚れ。タービンブレード（左）とタービンノズル（右）

## 5. 荒天遭遇時における燃料ロスの改善方法

海運業界では、荒天遭遇時に指示回転数を下げることは一般的な慣行である。しかし、指示回転数をどの程度下げるべきかは、通常、船員の経験に任されている<sup>9)</sup>。前述の通り、荒天時に指示回転数を下げたにもかかわらず、実際の回転数は数時間にわたり指示回転数を下回っていたケースも確認されている。これらの事実は、船員が主機回転数と指示回転数の速度差が生じていることに気づいていなかったことが示唆される。

したがって、実際の主機回転数と指示回転数の差を監視し、速度差が継続する場合は、速度差が解消されるまで指示回転数を調整することが推奨される。船舶管理会社においては、これらの現象が船上で発生していないかを確認するため、過去の運航データの詳細な分析を実施することが強く推奨される。主機回転数の速度差が確認された場合、燃料ロスが発生している可能性があるため、指示回転数の調整により改善できる余地がある。

## 6. おわりに

船舶が荒天に遭遇すると、主機回転数と指示回転数の間に速度差が生じることがあり、この速度差は天候が回復するまで数時間続く可能性がある。この現象は、パナマックス型ばら積み貨物船の実船計測データによって確認され、その発生メカニズムを理論的に考察した。長時間続く速度差は燃料ロスを引き起こし、主機回転数や速度差の大きさによっては、通常の数値差がない運転時の燃料消費量の約10%に達することがある。また、これらの速度差は、不完全燃焼を引き起こし、過給機のタービンブレードやノズルにすすが付着する原因となる。タービンへの付着物はローターの不均衡を招き、振動やローター及びベアリングの急速な摩耗を引き起こす。

荒天遭遇時に主機回転数を適切に設定し、速度差を解消することで、燃料を節約することが可能である。これにより、経済的な利益だけでなく、過給機や排気ガスにさらされるその他の部品の故障リスクも低減できる。また、船舶の老朽化や船体・プロペラの汚れは、主機回転数と指示回転数の間に速度差が生じやすくなる要因となるため、特に老朽化した船舶には十分な注意が必要である。

### 参考文献

- 1) P. Gupta et al., Ship performance monitoring using machine-learning, *Ocean Engineering* 254, 2022.
- 2) Oil Companies International Marine Forum (OCIMF), Compliance with EEXI Regulation: Risks associated with Power Limitations, 2024. (<https://www.ocimf.org/doclink/compliance-with-eexi-regulation/eyJ0eXAiOiJKV1QiLCJhbGciOiJIUzI1NiJ9.eyJzdWIiOiJjb21wbGlhbmNILXdpdGgtZWV4aS1yZWd1bGF0aW9uIiwiaWF0IjoxNzIxNzUxNTM3LCJleHAiOiJlE3MjE4Mzc5Mzd9.QzIXk7Gkah5FfnF3u7NbquGVyiFovwPglzc8HCJd6Ys>)
- 3) 見良津他：実船計測データ解析による実海域での船速低下に関する検討，第94回マリンエンジニアリング学術講演会，2024.
- 4) P. Mizythras et al., Numerical study of propulsion system performance during ship acceleration. ([https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/71024557/Mizythras\\_etal\\_OE\\_2017\\_propulsion\\_system\\_performance\\_during\\_ship\\_acceleration.pdf](https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/71024557/Mizythras_etal_OE_2017_propulsion_system_performance_during_ship_acceleration.pdf))
- 5) H. Hersbach et al., The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020;146:1999–2049. (<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/qj.3803>)
- 6) W.Fujimoto et al., Analyzing AIS and wave hindcast data for global wave scatter diagrams with seasonality, *Ocean Engineering* 314, 2024.
- 7) 川合：過給機の損傷事例と原因，日本マリンエンジニアリング学会誌，第51巻，第2号，76-82，2016. ([https://www.jstage.jst.go.jp/article/jime/51/2/51\\_208/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jime/51/2/51_208/_pdf/-char/ja))
- 8) 林：船用過給機のタービン部における浸食損傷の発生状況に関する調査報告，日本船用機関学会誌，第25巻，第7号，49-60，1990.
- 9) Anish Wankhede, What to do When Ship Encounters Rough Weather, *Marine Insight*. (<https://www.marineinsight.com/marine-safety/what-to-do-when-ship-encounters-rough-weather/> [Accessed 1st April 2025])

# AISデータ活用事例紹介

見良津 黎\*

## 1. はじめに

近年、衛星等により船舶自動識別装置（Automatic Identification System, AIS）の情報を取得することで、従来は困難であった船舶の動静情報の把握が可能になってきている。AISとは、洋上を航行する船舶同士が航行情報を交換するための装置であり、近年の衛星打ち上げ数の増加に伴い、地球全体の船舶のAIS信号の取得が可能となり、その活用範囲は年々広がっている。和田らのAISデータに関するレビュー論文<sup>1)</sup>では、AISに関する既往研究として、海上貨物輸送量の推計、海運市況の分析と予測、造船需要の予測、船舶航行における環境影響分析、クルーズ分野への適用、海運ネットワークの分析とその時系列的変化に関する研究事例についてまとめられており、その研究対象は多岐に亘る。図1に示す通り、船舶のAISに関する論文は増加傾向にあり、近年手に入るようになった海上物流のビッグデータに対して、様々な角度から研究が行われている。

また、産業界においてもAISデータを活用して船舶の運航を最適化する取り組みが多数実施されている。例えば、デジタル技術活用により船舶の目的地到着時間を最適化するプラットフォーム「Blue Visby Solution」があげられる<sup>2)</sup>。Blue Visby Solutionでは、港湾の混雑状況や天候に加え、AISデータを用いて同じ目的港へ向かう船舶の位置や針路を考慮した上で、最適な航行速度を提供しCO2排出量を削減する取り組みであり、平均16%のCO2排出を削減できる可能性が示唆されている。

本会でもAISデータを船級規則の開発へ活用した実績がある。より安全かつ合理性の高い船体構造設計及び強度評価を可能とする鋼船規則C編の全面改正やコンテナ固縛ガイドライン改正において、船舶の設計荷重の合理化を図るためにAISデータと波浪統計値を活用した<sup>3) 4)</sup>。従来は経験則や限られた情報に基づいて定められた規則に対して、実際の船舶の航行実態を示す定量的なデータを用いることで、より高精度かつ透明性の高い規則開発を実現した。

前述の通り、学術及び産業界でAISデータの利活用の領域が広がってきており、本会も全球のAISデータを取得し、規則開発をはじめとした各種サービス開発へ活用してきた。本稿では、具体的なAISデータ活用事例を紹介し、海事関係者へ広く情報提供を行うことを目的とする。全体構成としては、2章でAISの概要について説明し、3章でAISの活用事例として、船種・サイズ別の航行実態、東京湾に寄港する外航船の諸情報、紅海の情報悪化に伴う航行形態の変化に関する分析結果についてそれぞれ紹介し、4章で総括を行う。

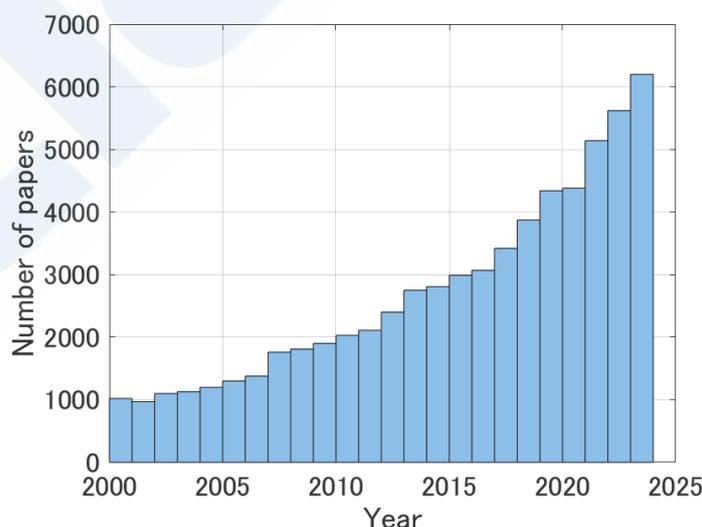


図1 船舶のAISに関する論文数の推移（参照：Google Scholar）

\* 開発本部 技術研究所

## 2. AISとは

AISは主に船舶の衝突防止や通過船舶とその積荷情報の把握及び船舶運航管理業務を支援する目的で、IMO（国際海事機関）が2002年に発効したSOLAS条約（海上における人命の安全のための国際条約）第V章に基づき、一定の基準を満たす船舶（国際航海に従事する300総トン以上の全ての船舶，国際航海に従事しない500総トン以上の貨物船，全ての旅客船）に対して搭載が義務付けられた<sup>5)</sup>。技術的根拠としてITU-R M.1371を，装置の規格としてIEC 61993-2 Ed.1を採用している。近年はAISの上位互換となる航海機器として，AISの機能に加え，より高いデータ通信能力を有するVDES（VHF Data Exchange System）導入について，IMOで審議が行われている。

船舶に搭載されたAISの電波は，水平方向には60～80kmまで届き，当初は，船舶同士や陸上局がAIS信号を受信していた。一方，垂直方向に高度400～500kmまで達するという性質を用いて，衛星によりAIS信号の取得が可能となり，2008年以降の人工衛星打ち上げ数の増加に伴い，外洋を航行する船舶からのAIS信号の取得が可能になった<sup>6)</sup>。

AISで取得可能な代表的な情報を図2に示す。航行する船舶の識別番号などの静的情報に加え，位置・速度・針路等の動的情報が含まれており，さらに喫水や目的地といった航海関連情報も取得できる。AISから得られる情報と海象データとを組み合わせ可視化した事例を図3に示す。図中の色は有義波高の大きさを表しており，平穏な海象と荒天海象という2つの条件下における船舶の位置情報を示している。平穏な海象下では基本的に船舶は最短経路となる大圏航路を航行しているが，荒天海象下においては図の中央の有義波高15m級の低気圧を明らかに避けている様子が確認でき，AISと海象データを活用することで，世界中の船舶の遭遇海象や航行実態を把握できる。前章で述べた通り，本会はこれらの遭遇海象データを規則開発に活用している<sup>3)4)</sup>。

動的情報	静的情報	航海関連情報
<ul style="list-style-type: none"> <li>緯度/経度</li> <li>時刻</li> <li>船首方位</li> <li>対地船速</li> <li>対地針路</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>MMSI/IMO番号</li> <li>呼出符号と船名</li> <li>船の長さ幅</li> <li>船種</li> <li>測位アンテナの位置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>喫水</li> <li>目的地</li> <li>到着予定時刻</li> <li>危険貨物(種類)</li> <li>航路計画</li> </ul>

図2 AISにより取得可能な情報（例）

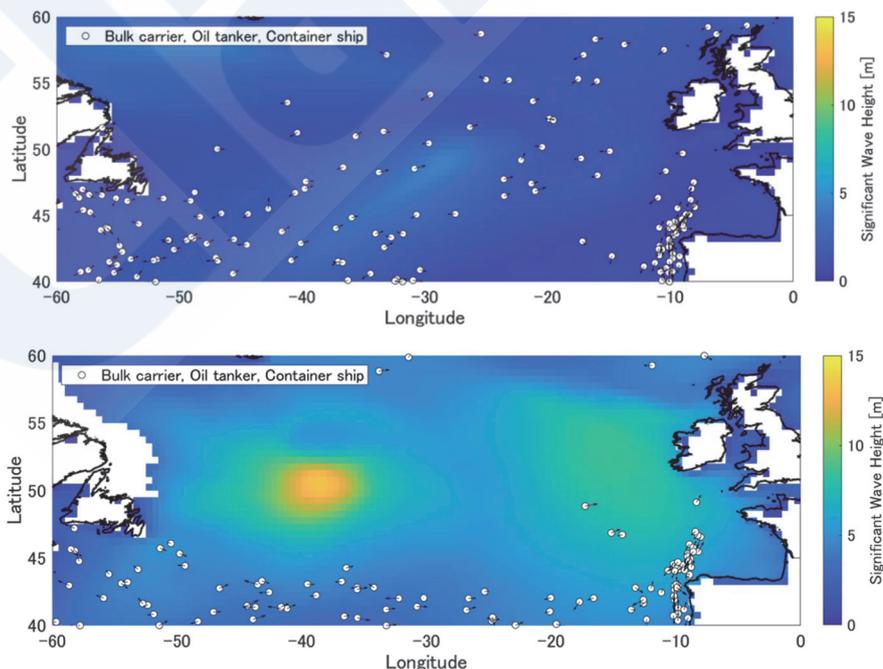


図3 北大西洋における船舶の位置（上図：平穏な海象，下図：荒天海象）

### 3. AISデータ活用事例紹介

本章では、Kpler社が提供する全球のAISデータ及びClarksonの船舶データベースを用いた分析結果を3件紹介する。使用したAISデータの対象期間は2022年1月1日から2024年12月31日であり、時間間隔3時間に前処理したデータを使用した。

#### 3.1 船種・サイズ別の航行実態

AISデータを活用することで、船種やサイズ別の航路を把握することが可能となる。図4にコンテナ船、図5にばら積み貨物船のサイズ毎の航跡を示す。期間は2022年から2024年を対象としており、船速2knot以下のデータを除外している。航行頻度が高いほど色が濃く表示されており、例えば図4の3,000TEU以下のコンテナ船は沿岸エリアを広範に航行している一方、17,000TEU以上の大型コンテナ船はアジア-欧州航路の割合が大きくなっていることがわかる。また、8,000～11,999TEUのコンテナ船と12,000～16,999TEUのコンテナ船を比較すると、前者は北大西洋航路を相対的に多く航行している。図5のばら積み貨物船は、どのサイズも全球を万遍なく航行しているが、DWT（載貨重量トン数）が100,000トン以上のVLOC（Very Large Ore Carrier）及びケープサイズはアジア-ブラジル航路が濃くなっており、これは、南米の鉄鉱石をアジアへ輸送する船舶の航跡を示している。

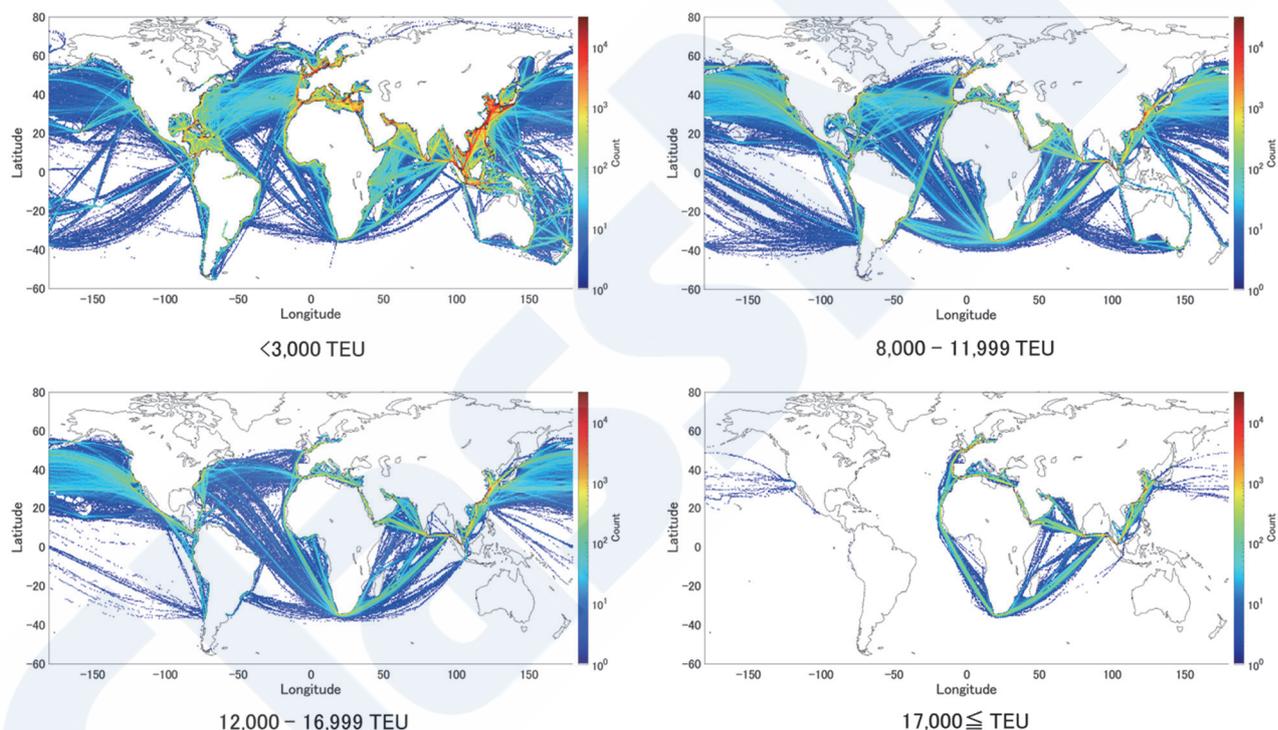


図4 コンテナ船の航跡図（2022～2024年）

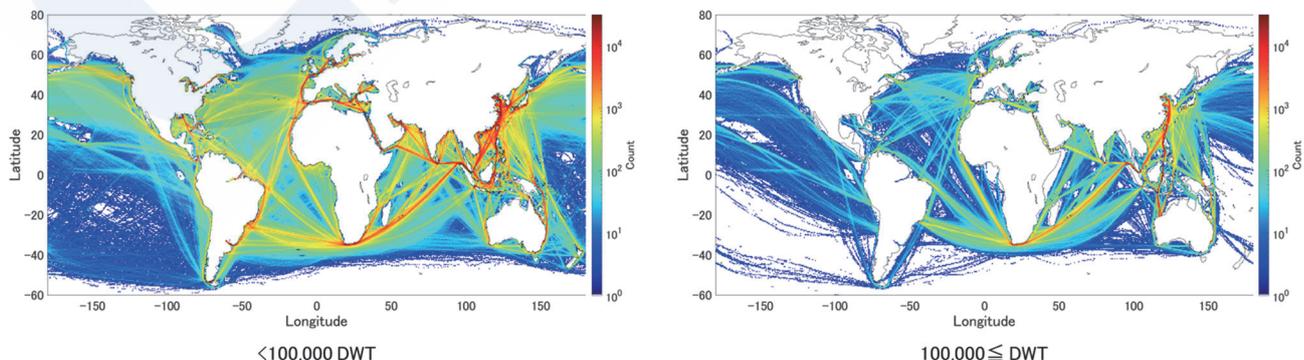
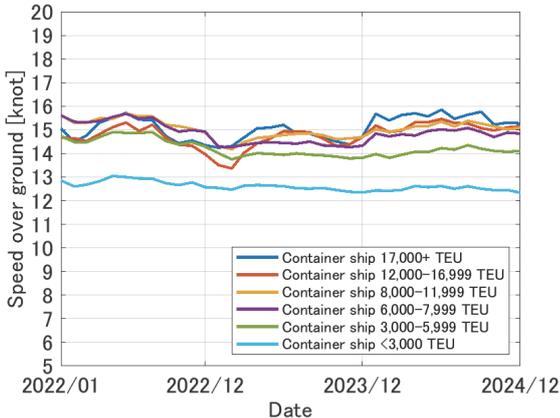


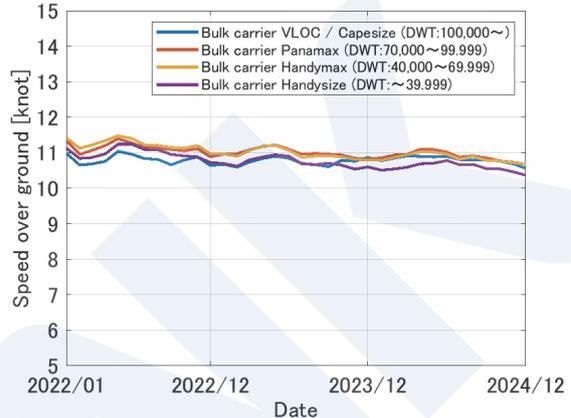
図5 ばら積み貨物船の航跡図（2022～2024年）

図6に船種・サイズ別の対地船速の月ごとの推移（平均値）を示す。なお、LNG運搬船及び自動車運搬船はサイズ別の分類を行っていない。また、2knot以下の船速は平均値の算出から除外している。

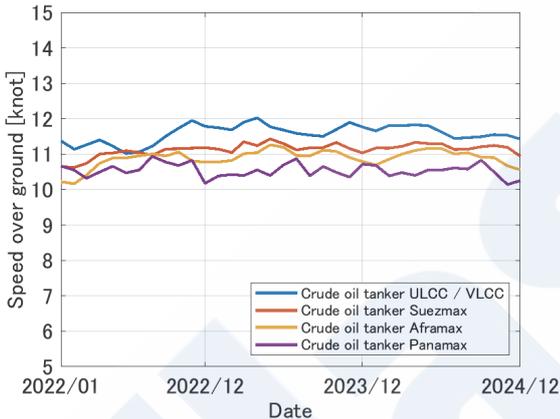
6,000TEU以上のコンテナ船に関しては、2022年9月から2023年2月にかけて船速が減少している。これは荷動き急減による船腹需給の弛緩に伴い、船速を一定程度減速しているものと推測される<sup>7)</sup>。また、2023年11月頃から平均船速が増加している。詳細は3.3節で後述するが、これは紅海の情勢悪化に伴い、コンテナ船の一部が紅海を回避し、喜望峰を經由したことで航続距離が長くなり、結果として平均船速が増加したものと推測される。その他の船種については、平均船速は概ね横ばい、または微減の傾向が確認された。



コンテナ船



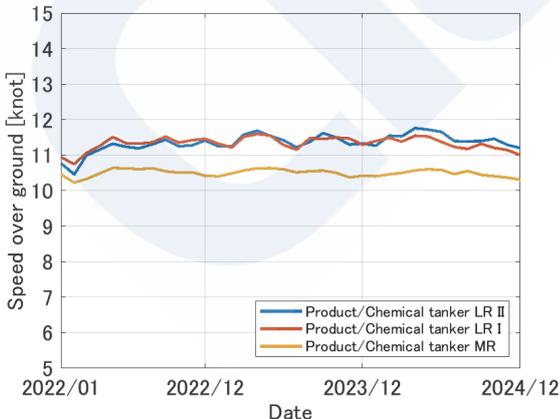
ばら積み貨物船



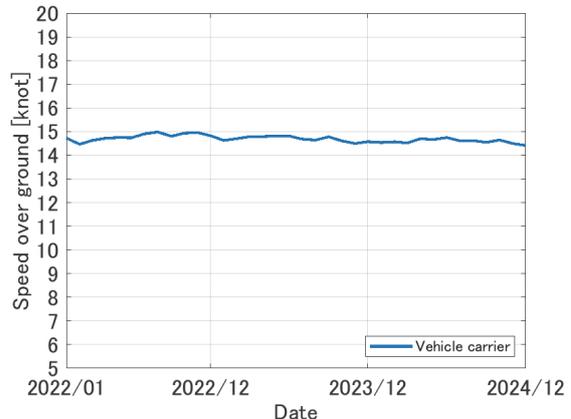
油タンカー



LNG運搬船



プロダクト・ケミカルタンカー



自動車運搬船

図6 船種別平均船速の推移

### 3.2 東京湾に寄港する外航船の諸情報

AISデータとClarksonの船舶データベースを組み合わせることで、ある特定の港湾に寄港する船舶の情報を把握できる。本節では、一例として東京港に寄港する船舶の諸情報を紹介する。本節では、**図7**の青色のエリア内で、船速2knot以下の状態が6時間継続した船舶を寄港とみなしている。また、今回は外航船を対象としており、東京湾へ寄港する前後の寄港地が日本以外の場合を集計している。

**図8**に、2023年における船種別の東京湾寄港回数を示す。コンテナ船（4,343回）、一般貨物船（1,681回）、Ro-Ro船（1,256回）の順で寄港回数が多い。東京都港湾局によると、2023年の外航コンテナ船の寄港回数は4,753回であり、今回の分析結果では全体の約91%を特定できていることがわかる<sup>8)</sup>。



図7 東京港の位置（参照：東京都港湾局）

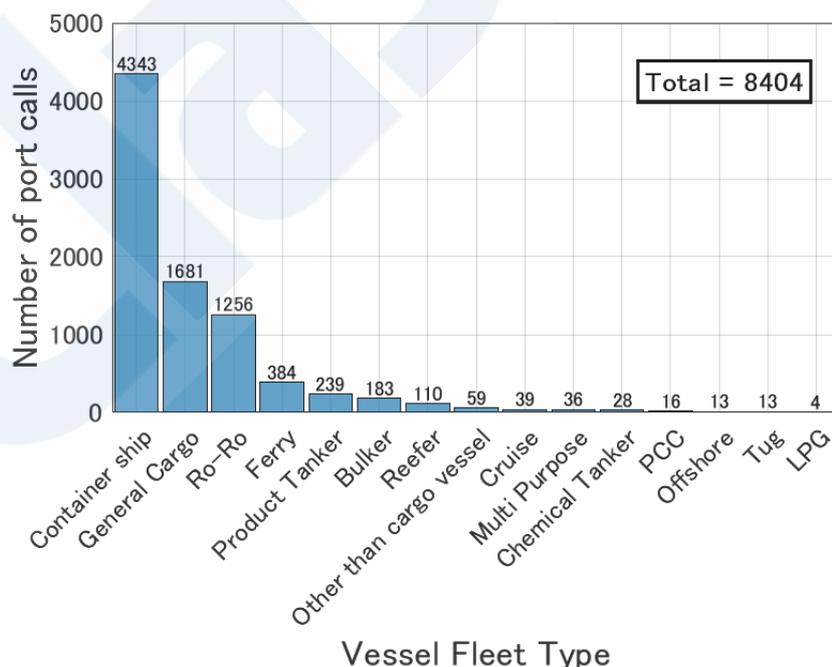


図8 東京港の船種別寄港回数（2023年）

図9に、東京湾に寄港する船舶の出発港、目的地、燃料の種類（主機）、船の長さ、船主国籍、旗国に関する統計値を示す。AISデータとClarksonのデータベースを組み合わせることで、東京港に寄港する燃料の種類（主機）、主要目、船主国籍、旗国も把握できる。出発港と目的地は、中国、韓国、台湾の順であり、とりわけ中国の割合が大きい。また、東京港に寄港する主機燃料タイプは、ほとんどがIFOで占められていることがわかる。例えば、これらの分析を世界中の港に拡張することで、Dual Fuel船がどの港に頻繁に寄港しているか把握できる。なお、Dual Fuel船が実際にどの燃料を使用しているかは、AISからは判断が困難であるため、別のデータソースと組み合わせる必要がある。

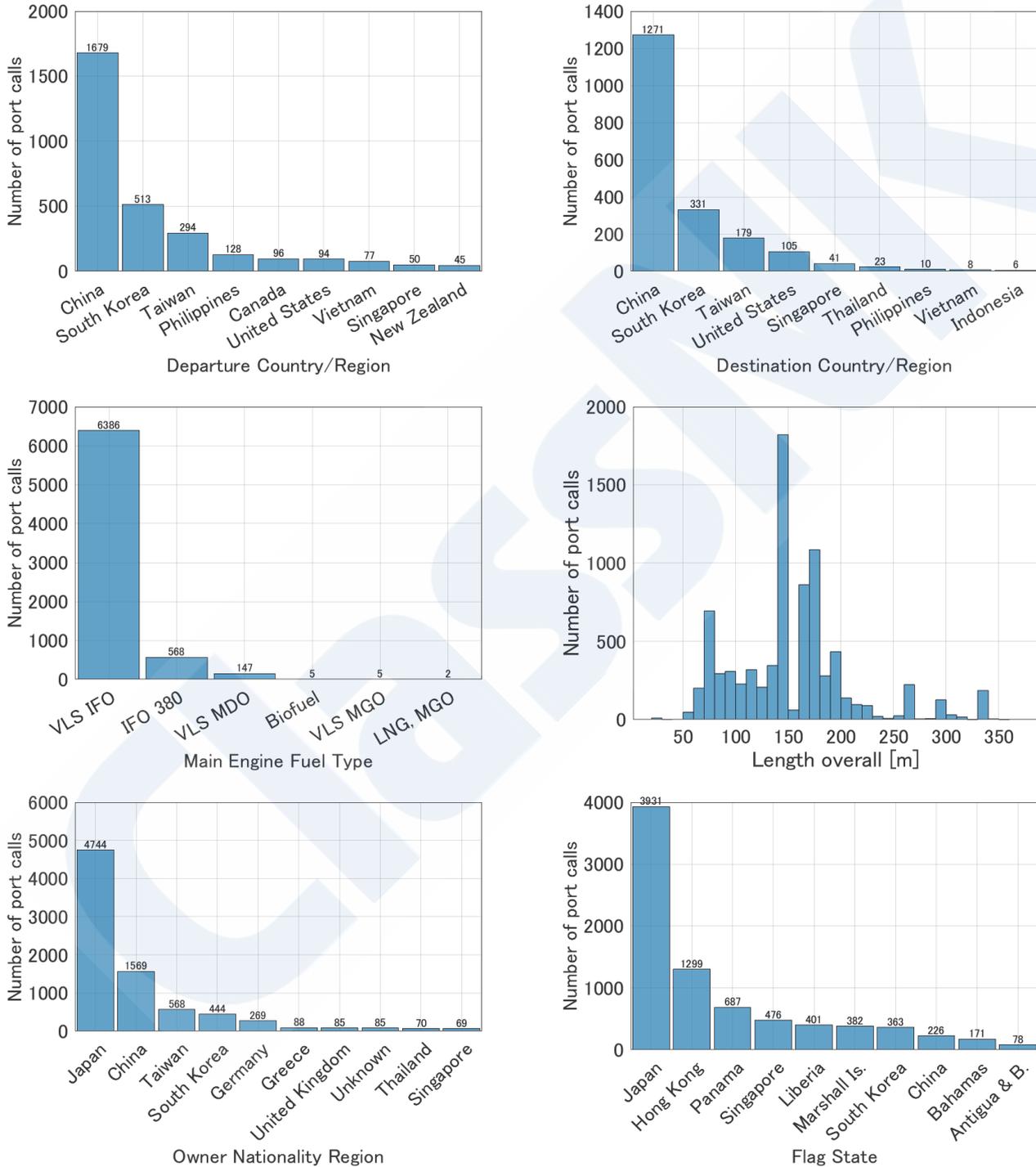


図9 東京港に寄港する船舶の諸情報（2023年）

### 3.3 紅海の情勢悪化に伴う航路形態の変化

紅海地域の地政学的な情勢悪化は、国際海運における重大な課題の一つである。本節では、紅海航路回避の影響を定量的に分析することを目的とし、マクロ的な航行隻数の変化に加えて、船種、オーナー及び管理会社の国籍別の動向について分析した。本検討では、AISデータを用いて、ある期間内に紅海と喜望峰の図10の青丸で示す範囲（紅海：中心座標から半径2度（約220km）、喜望峰：中心座標から半径4度（約440km））を1回でも航行した船舶の数をカウントした。

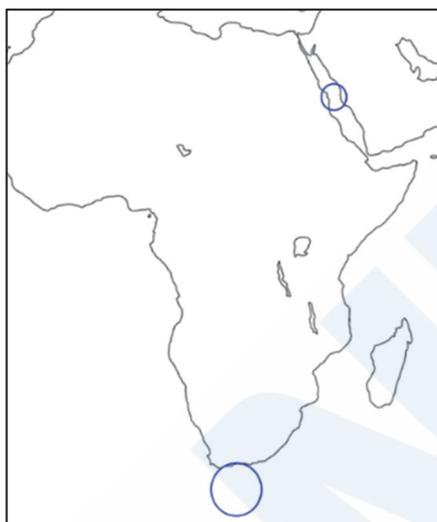


図10 紅海及び喜望峰を航行する船舶の判定エリア

図11より、2023年11月以降の紅海情勢の悪化に伴い、紅海航路を選択する船舶が大幅に減少し、喜望峰航路を選択する船舶が大幅に増加している傾向が確認された。紅海を航行する船舶は、紅海情勢の悪化に伴い半数以下に減少した一方、喜望峰を経由する船舶は2024年1月頃から急増し、2023年に比べて2倍以上に増加している。また、図12より、2023年11月以降、紅海航路を航行するコンテナ船の船速が低下し、喜望峰航路を航行する船舶の船速が増加していることがわかる。喜望峰航路を航行する船舶の船速が増加している理由としては、紅海から喜望峰経由の航路に変更することで約2週間の追加航行時間が発生し、スケジュールを守るために平均船速を上げる必要があるためと推察される。

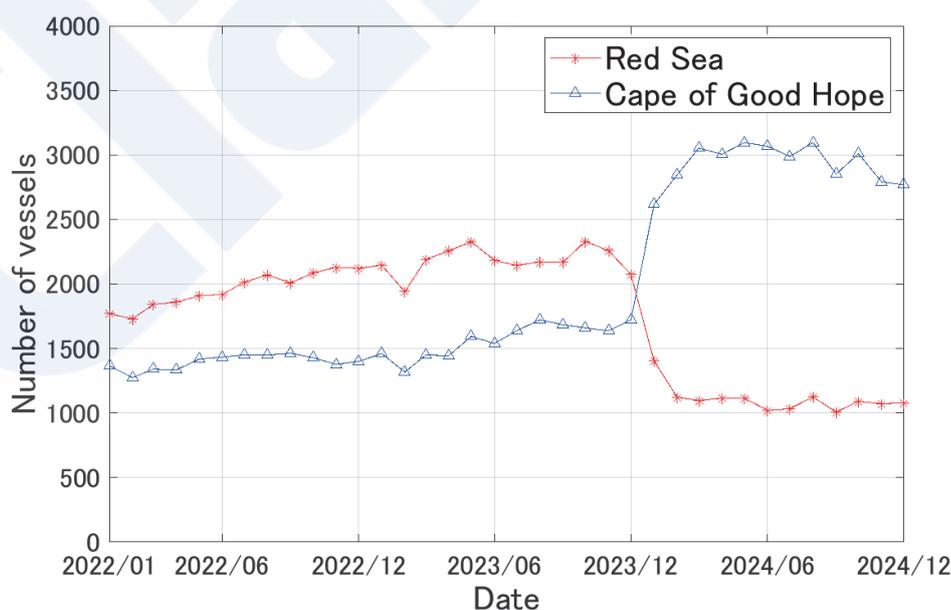


図11 紅海及び喜望峰を航行する隻数（月別）

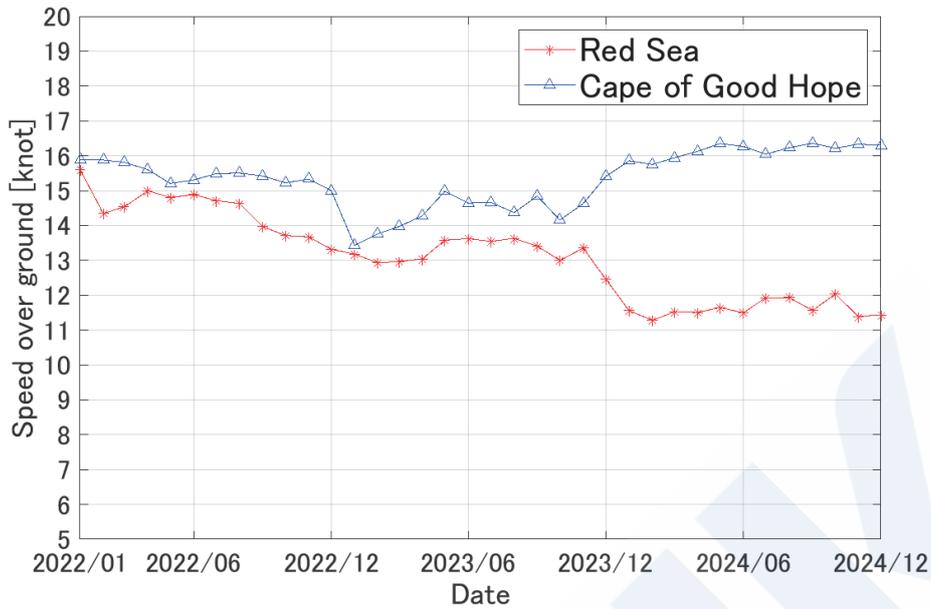


図12 紅海及び喜望峰を航行するコンテナ船の平均船速（月別）

次に、紅海の情勢悪化の前後の月（2023年9月及び2024年9月）に、紅海及び喜望峰を航行した船舶の属性について分析を行った。

図13に紅海及び喜望峰を航行する船舶の船種別の隻数を示す。図13に示す全ての船種で紅海を航行する隻数が減少している一方、喜望峰については、全ての船種で航行隻数が増加しており、特にコンテナ船、LNG運搬船、LPG運搬船でその傾向が顕著である。なお、紅海と喜望峰を航行する船舶の総和は紅海の情勢悪化の前後で顕著な違いは確認されなかった。

図14及び図15は、紅海と喜望峰を航行する船舶について、船主及び管理会社の国籍／地域ごとに取りまとめた結果である。紅海では、日本、ノルウェー、韓国船主や、シンガポール管理会社の船が紅海航路を回避する傾向にあることがわかる。一方、喜望峰では、全ての船主及び管理会社の航行隻数が増加しているものの、紅海を避ける傾向が顕著な日本、ノルウェー、韓国船主や、シンガポール、日本、韓国などの管理会社の船が特に増加しており、紅海の航行を避けた船の多くが喜望峰を経由したことにより生じた傾向と推定される。

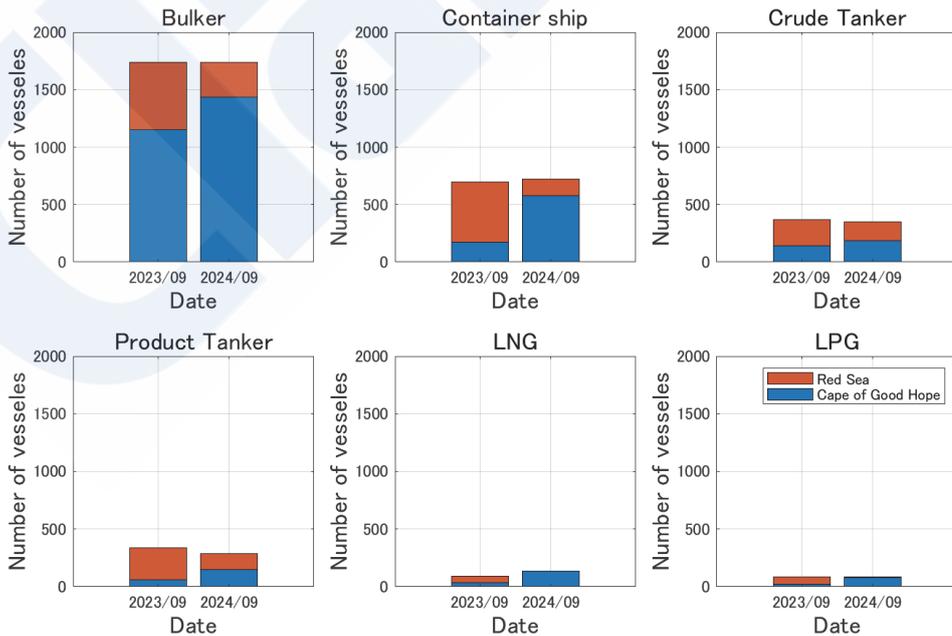


図13 紅海及び喜望峰を航行する船種別統計（橙色：紅海，青色：喜望峰）

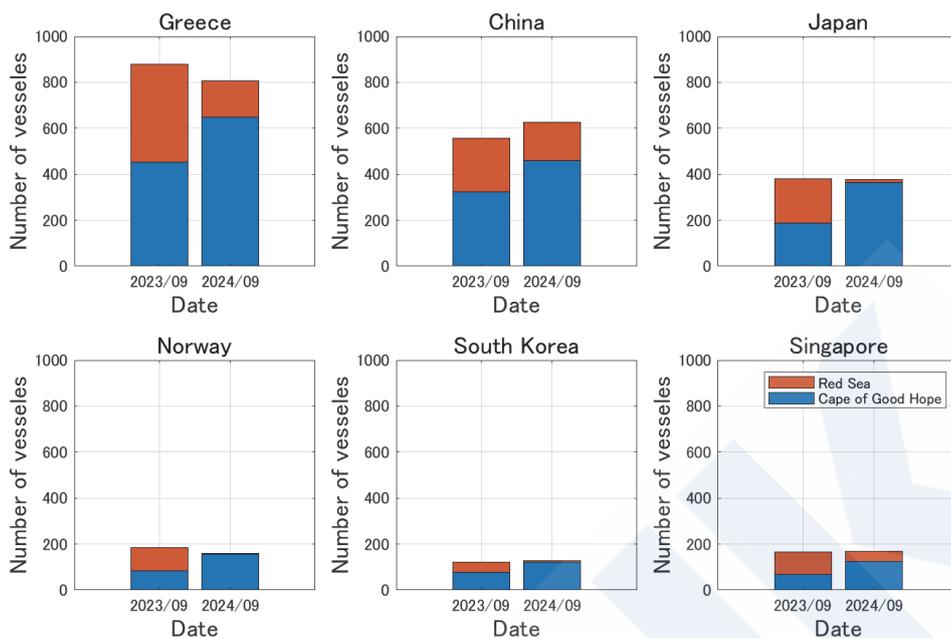


図14 紅海及び喜望峰を航行する船舶の船主国籍／地域（橙色：紅海，青色：喜望峰）

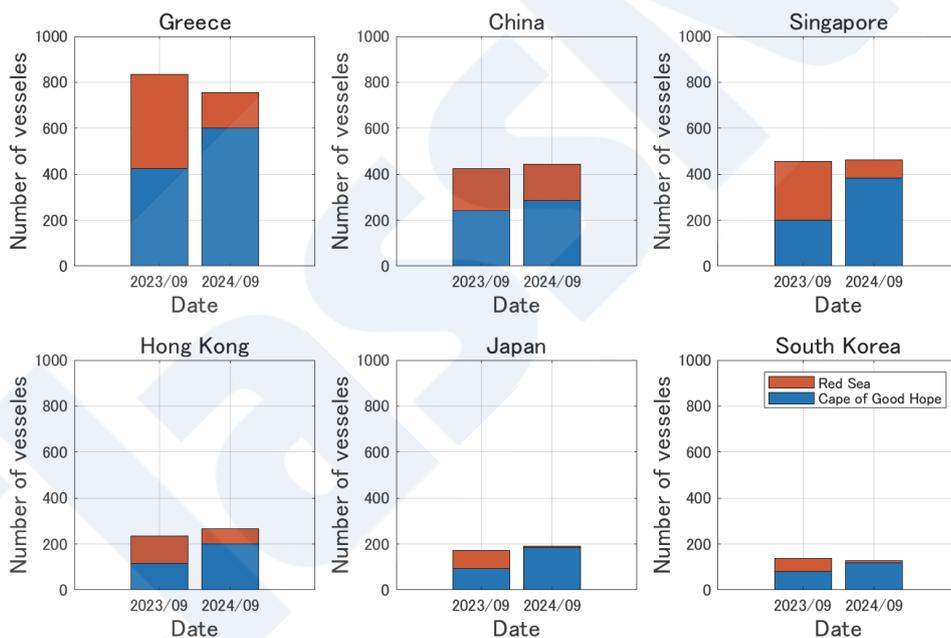


図15 紅海及び喜望峰を航行する船舶管理会社の国籍／地域（橙色：紅海，青色：喜望峰）

#### 4. まとめ

本稿では、AISデータの活用事例として船種・サイズ別の航行実態、東京湾に寄港する外航船の諸情報、紅海の情勢悪化に伴う航路形態の変化に関する分析結果を紹介した。本会は、2015年以降の本会登録船及び、2022年以降の全てのAISデータを取得し、主として規則開発や船級サービスへ活用してきた。AISデータは、本会のサービス開発以外にも、様々な用途での活用が見込まれるため、今後は業界関係者のニーズを踏まえながら、定期的にAISデータから得られる情報を取りまとめ、公開していく予定である。

## 参考文献

- 1) 和田他：AIS等の船舶動静データの物流・海運・造船・環境・クルーズ分野における利用に関する研究レビューと今後の展望，日本船舶海洋工学会論文集，第32号，145-154，2021.
- 2) Blue Visby Solution™： <https://bluevisby.com> [Accessed 5 March 2025]
- 3) 見良津他：実海域での船舶遭遇海象における操船影響の定量的評価に関する研究（第3報），日本船舶海洋工学会論文集，第33号，129-132，2021.
- 4) Fujimoto et al., Analyzing AIS and wave hindcast data for global wave scatter diagrams with seasonality, *Ocean Engineering*, 314, 2024.
- 5) IMO：SOLAS CONSOLIDATED EDITION 2020, Part 1, Chapter V, 2020.
- 6) 荒谷他：衛星AISデータの特性及び利用法に関する検討，日本船舶海洋工学会論文集，第20号，453-455，2015.
- 7) 日本郵船株式会社：コンテナ輸送業界の現状と見通しについて，2023.
- 8) 東京都港湾局：令和5年（2023年）東京港港勢（速報値），2024.

# IMOの動向

## — IMOでの主な審議内容・結果の紹介 —

開発本部 国際部

### 1. はじめに

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

前号では、2024年3月に開催された第81回海洋環境保護委員会（MEPC 81）及び2024年5月に開催された第108回海上安全委員会（MSC 108）の審議内容を紹介した。

今号では、2024年9月30日から10月4日に開催された第82回海洋環境保護委員会（MEPC 82）及び2024年12月2日から12月6日に開催された第109回海上安全委員会（MSC 109）の主な審議結果を紹介する。

### 2. MEPC 82の審議結果—海洋環境保護関連—

#### 2.1 温室効果ガス（GHG）関連

地球温暖化対策の観点から温室効果ガス（GHG）排出削減が世界的な課題となっている中、国際海運からのGHG排出削減対策はIMOにて検討が進められており、IMOではこれまでにエネルギー効率設計指標による規制（EEDI/EEXI）、船舶エネルギー効率管理計画書（SEEMP）の所持、燃料消費実績報告制度（IMO DCS）及び燃費実績（CII）格付け制度が導入されている。また、2023年7月に開催されたMEPC 80では、IMOの掲げるGHG排出削減目標（表1）とGHG排出削減策の候補を盛り込んだ「IMO GHG削減戦略」の改訂版が採択され、以降、国際海運としての目標達成を目指して関連する様々な議論が行われている。

表1 MEPC 80で採択されたGHG排出削減目標

目標年	GHG排出削減目標（2023年版）
2030年	<ul style="list-style-type: none"> <li>輸送効率最低40%改善（2008年比）</li> <li>GHG総排出量の最低20%削減（30%削減を目指す）（2008年比）</li> <li>ゼロエミッション燃料等の最低5%普及（10%普及を目指す）</li> </ul>
2040年	<ul style="list-style-type: none"> <li>GHG総排出量の最低70%削減（80%削減を目指す）（2008年比）</li> </ul>
2050年	<ul style="list-style-type: none"> <li>遅くとも2050年頃までにGHGネット排出ゼロ</li> </ul>

今回のMEPC 82では、GHG排出削減のための中期対策に関する議論に加えて、短期対策（EEXI関連規制及びCII格付け制度）の検証や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の実用化に向けた議論などが行われた。

#### 2.1.1 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排出削減目標を達成するための中期対策として、燃料の単位エネルギー当たりのGHG排出量（GHG強度）を段階的に規制する「技術的手法」とGHG排出等に応じた課金及び還付を行う仕組みである「経済的手法」を組み合わせた中期対策案（Basket of measures）を検討することが掲げられている。

中期対策については、2027年の発効を目指して次に示す通り作業を進めることがMEPC 80にて合意されている。

表2 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

前回の会合では、条約改正の枠組み案を示す文書（IMO net-zero framework）が合意され、同文書を用いて各国・業界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ることとなった。

また、包括的影響評価については、UNCTAD（国連貿易開発会議）などにより実施された包括的影響評価の報告書が今回の会合に提出され、報告結果を踏まえた中期対策案の審議が行われることとなった。

今回の会合では、IMO net-zero frameworkを基に中期対策の論点が条約改正案として整理されたが、中期対策案の最終化にまでは至らなかった。依然として、ライフサイクルベースのGHG排出量の算定方法やGHG強度基準・課金額の設定水準、課金等により得られた収入の管理・分配方法など、多くの項目が争点として残されている。これらの争点の収束による中期対策の2027年の発効に向けて、今後も継続して議論されることになった。

包括的影響評価については、中期対策の実施が輸送コストの中でも特に食糧の輸送コスト上昇に与える影響についての懸念が共有され、食糧安全保障の観点からも影響評価を追加実施することが合意された。

### 2.1.2 GHG排出削減のための短期対策の検証

IMOによるGHG排出削減のための短期対策として導入されているEEXI（就航船のエネルギー効率指標）規制及びCII格付け制度は、2026年1月1日までにその有効性を評価し、検証しなければならないことがMARPOL条約上で規定されている。

また、CII格付け制度については、船舶の種類や運航形態による有利・不利等の懸念点を解決すべく、各国・業界団体から数多くの提案文書が提出されており、短期対策の検証の際にあわせて検討することとなっている。

今回の会合では、短期対策の検証に際し、利用可能なデータ及び各国・業界団体からの提案に対する初期評価が実施されるとともに、短期対策の課題やその解決策の候補、検討の優先度等を取り纏めた今後の議論のベースとなる文書が作成され、通信部会及び中間作業部会において引き続き検討が行われることとなった。

### 2.1.3 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）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（CH<sub>4</sub>）や亜酸化窒素（N<sub>2</sub>O）といったCO<sub>2</sub>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、MEPC 80で採択されたLCAガイドラインの改正版が2024年版LCAガイドラインとして採択され、専門家による科学的レビューとアドバイスを求めるために、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た。

今回の会合では、GESAMP-LCA WGが各燃料の排出係数のデフォルト値を検討できるように、加盟国に対しGESAMP-LCA WGにデフォルト値を申請するよう要請されることとなった。さらに、GESAMP-LCA WGが燃料の認証スキームを検討できるように、加盟国及び国際機関に対しMEPCに認証スキームの枠組みを提案するよう要請されることとなった。

### 2.1.4 燃料消費実績報告制度のデータ収集に関するガイダンス

前回の会合にて、IMO DCSで報告が要求される、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、燃料を使用する機器ごとの合計燃料消費量や、実際の貨物輸送量など、より詳細な項目を報告することが求められることとなった。本条約改正は2025年8月1日の発効とされているが、2025年1月1日より早期適用することが旗国に推奨されている。

一方、IMOへ報告されるデータはカレンダー暦年ごとに集計されるため、本条約改正の発効日以前と以降で収集するデータの項目に差が生じる可能性の指摘があった。

今回の会合では、2025年を通じて同じデータを報告するために、就航船に対して本条約改正に基づくデータ収集を実質2026年1月1日から開始することを認めるガイダンスが採択された。なお、本ガイダンスは、本条約改正の任意の早期適用を妨げるものではないことが確認された。本件に関する具体的な適用スケジュールや必要な手続き等については、本会テクニカルインフォメーションTEC-1339を参照のこと。

### 2.1.5 第5次IMO GHGスタディの検討開始

IMOでは国際海運からのGHG排出量を推定するスタディが定期的実施されている。直近では、2020年に実施された第4次IMO GHGスタディにおいて、2012年から2018年の排出量及び運航量当たりのGHG排出量などが纏められている。ただし、これらのGHG排出量はいずれも船上からの排出（Tank-to-Wake）のみ考慮したものとなっている。

今回の会合の直前に開催された第17回GHG中間作業部会（ISWG-GHG 17）にて、第5次IMO GHGスタディの内容に関する検討が開始された。審議においては、国際海運のGHG排出のベースラインとなる2008年における排出量だけでなく燃料中の炭素濃度を明確にすべきとの意見や、排出量はWell-to-Wakeベースで計算すべきなどの多くのコメントが表明された。

そのため、次回会合において、これらの意見やコメントを踏まえ、第5次IMO GHGスタディの内容に関する詳細な検討を継続して進めることとなった。

## 2.2 バラスト水管理条約関連

### 2.2.1 型式承認取得後のバラスト水処理装置の改造

バラスト水処理装置を船上に搭載後、BWM条約D-2規則を満たさないケースなどが散見されることから、バラスト水処理装置の改造やモデルの改良を行う事例が多く発生している。これらの改造や改良には、フィルターの除去だけでなく、UV照射システムの変更や活性物質注入量の変更が含まれる。このような改造及び改良に伴い新規の型式承認が必要かどうかについては旗国の判断が異なる場合が多いため、業界より統一すべきとの指摘があった。

本会合においては、バラスト水処理装置内の具体的な構成要素を例示し、型式承認を必要とするかを明確にした内容を含む、型式承認手続きに係るガイダンスの改訂版（BWM.2/Circ.43/Rev.2）が採択された。

### 2.2.2 バラスト水管理条約の見直し

MEPC 80にて作業が開始されたバラスト水管理条約（BWM条約）の見直し作業について、今回の会合ではその作業を任命されている通信部会の進捗の報告及び議場での対面議論が実施され、その後引き続きMEPC 83への報告に向けて作業が継続することとなった。

BWM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、MEPC 80にて優先改正事項を含む条約レビュー計画（CRP, Convention Review Plan）が採択された。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、前回のMEPC 81にて、条約本文、BWMSコード、関連ガイドライン及びガイダンスにおいて改正が必要となる事項のリストが合意された。

今回の会合では、主に以下の内容について対面議論が実施され、通信部会の作業を円滑に進めるための共通理解及び論点が整理された。

- ・メンテナンスに関わる基準
- ・BWMSデータログの標準化
- ・型式承認試験における処理速度と定格処理容量の整理
- ・殺傷確認試験における試験時間
- ・試験水中の添加物濃度及び添加生物濃度
- ・更新検査における殺滅性能確認のための試験方法

なお、活性物質による処理の際に発生する消毒生成物質を将来規制対象にする提案についてはその具体的内容が充分でないとして、通信部会における議論に含めないこととなった。

## 2.3 その他の審議事項

### 2.3.1 シップリサイクル条約

船舶の解撤が安全かつ環境汚染を伴わない適切な管理下で実施されることを目的として、シップリサイクル条約（2009年の船舶の安全かつ環境上適正な再資源化のための香港国際条約）が2025年6月26日に発効する予定となっており、条約締約国を旗国とする総トン数500トン以上の船舶が適用対象となっている（本会テクニカ

ルインフォメーションTEC-1311参照)。一方で、1992年に発効したバーゼル条約（及び1995年改正）では、有害廃棄物の廃棄を目的とした越境移動が原則禁止されている。

前回の会合では、シップリサイクル条約に適合する船舶であってもバーゼル条約によって最終航海を実施できない可能性について懸念が挙がり、両条約の相互関係性について検討されることとなった。

今回の会合では、シップリサイクル条約とバーゼル条約の両条約の締約国に対して、リサイクルする船舶にシップリサイクル条約の要件が適用され、条約に従って承認された船舶リサイクル施設でリサイクルされる場合、バーゼル条約の規定が当該船舶の越境移動に影響を及ぼしてはならないことをバーゼル条約事務局に通知することについて検討を求める暫定IMOガイダンスが採択された。また、シップリサイクル条約の履行について引続き情報共有に努めるよう各国及びIMO事務局へ要請されることとなった。

## 2.4 採択された強制要件

### 2.4.1 NOx並びにSOx及びPM排出規制海域（ECA）の追加

カナダ北極海域及びノルウェー海海域を新たにNOx並びにSOx及びPMのECAとして指定し、またIAPP証書の追補の様式に船舶の建造日等に関連する詳細を追加するMARPOL条約附属書VIの改正が採択された。この改正は2026年3月1日より発効となる。

本改正により、2027年3月1日以降、これらの海域を航行する船舶に対して燃料油中の硫黄分濃度を0.10%に制限するSOx及びPM排出規制が適用される。また、同海域を航行する以下の船舶に対してNOx三次規制が適用される。

表3 NOx三次規制の適用

カナダ北極海ECA	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>
ノルウェー海ECA	<ul style="list-style-type: none"> <li>2026年3月1日以降に建造契約が行われる船舶</li> <li>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</li> <li>2030年3月1日以降に引渡しが行われる船舶</li> </ul>

## 3. MSC 109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 109で採択された主要な義務要件は以下の通り。

#### (1) IGCコードの改正

アンモニア燃料船の就航を見据え、安全措置を講じた上で毒性プロダクトを燃料として使用可能にするためのIGCコード16章の改正が採択された。また、併せて本改正の早期実施を促すMSCサーキュラーが発行された。

#### (2) IGFコードの改正

燃料タンクの船底外板からの保護距離の要件におけるサクシオンウエルの取扱い、管装置の圧力逃し弁からの放出を燃料タンクに導く要件、開放甲板上の燃料タンクに面する居住区域等の防熱の要件の要件、危険場所（Zone 1及びZone 2）の定義等に関するIGFコードの改正が採択された。

### 3.2 承認された条約及び関連コードの主要な改正

今回の会合で承認された主要な義務要件は以下の通り。これらは、2025年6月に開催されるMSC 110にて採択される見込みである。

#### (1) HSCコードの改正

高速旅客船における幼児用及び体重140 kgまでの大人用の救命胴衣の数量に関する1994HSCコード及び2000HSCコードの改正が承認された。

#### (2) IGCコードの改正

タイプCタンク及び0.07MPaを超える設計圧力のタイプBタンクについて98%を超える積付制限値とする場合の要件の強化、LNG以外の貨物を燃料として使用する際の要件、CO2貨物の特別要件等に関するIGCコード1~5, 8~13及び15~19章の改正が承認された。

#### (3) SOLAS条約II-1章の改正

IGFコードの適用対象に低引火点燃料に加えて引火点によらずガス燃料を含めるSOLAS条約II-1章56の改正が承認された。

### 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) SOLAS条約III章20.8.4及び20.11並びに決議MSC.402(96)の統一解釈  
SOLAS条約III章20.11並びに決議MSC.402(96)は膨張型救助艇にも適用される旨のSOLAS条約III章20.8.4及び20.11の解釈。
- (2) SOLAS条約II-2章4.5.6.1及びIBCコード3.1.2, 3.1.4及び3.5.3の統一解釈  
タンカーの貨物タンク用ガスフリー管装置の貨物エリア外への設置に関するSOLAS条約II-2章4.5.6.1及びIBCコード3.1.2, 3.1.4及び3.5.3の解釈。
- (3) SOLAS条約II-2章の統一解釈
  1. タンカーの貨物タンクの二次的通気手段に関するSOLAS条約II-2章4.5.3.2.2及び11.6.3.2の解釈。
  2. A類機関区域の頂部の定義に関するSOLAS条約II-2章11.4.1の解釈。
- (4) SOLAS条約II-1章の統一解釈  
単一の不可欠な推進機関の要素の信頼性に関するSOLAS条約II-1章26.2の解釈。

#### 3.3.2 ガイドライン及び指針等

- (1) タンカーの貨物タンクの火炎侵入防止装置の設計、試験及び設置に関する基準の改正  
これまでの改正 (MSC.1/Circ.1324) の取入れ及び参照の追加修正を行うタンカーの貨物タンクの火炎侵入防止装置の設計、試験及び設置に関する基準(MSC.1/Circ.677)の改正。
- (2) アンモニア燃料船に対する暫定ガイドライン  
IGFコードの見直し及び低引火点燃料に関するガイドライン検討作業の一環として検討された、アンモニアを燃料として使用する船舶（貨物としてのアンモニアを燃料として使用する船舶を除く）に対する暫定ガイドライン。

### 3.4 目標指向型新造船構造基準 (GBS)

SOLAS条約II-1章3-10に規定されるGBS (Goal-Based Standard) により、船の長さが150m以上である油タンカー及びばら積貨物船は、GBSの機能要件に適合した船級協会の規則に従って、設計・建造することが要求される。GBSでは、各船級協会の規則がGBSの機能要件に適合していることを確認するための適合監査が要求されており、GBS適合検証ガイドライン (MSC.454(100)) に基づき、IMOにより定期的な適合維持監査が実施される。

今回の会合では、IACS共通構造規則 (CSR) の基礎として使用される波浪発現頻度表を規定するIACS Recommendation No.34の2022年改正 (Rec.34/Rev.2) に対するGBS監査報告及びIACSの対応について議論が行われ、波浪データのより詳細な説明を加えることが合意された。

### 3.5 自動運航船関連要件の検討

船舶の自動化に関する研究が進んでいる中で、自動運航船に適用するべき条約要件についてMSCで検討を行っている。現在、目標及び安全性・オペレーション・セキュリティー等の項目毎の機能要件を規定した、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ている。

今回の会合では、2024年9月に開催された中間作業部会 (ISWG) の報告等に基づき、リスク評価 (7章)、コネクティビティ (12章)、遠隔操船 (18章) の各章が最終化された。また、今後の作業計画についても見直しが行われ、2025年後半に新たに中間作業部会を開催し、2026年開催予定のMSC 111にて非強制コードを最終化することが合意された。なお、強制コードの策定に向けた作業スケジュールに変更はなく、非強制コードの策定後、2030年までの採択を目標に検討が行われる予定となっている。

現時点において、非強制コードの構成は概ね以下ようになる予定。

Part 1: 序章 (コードの目的, 適用等)

Part 2: 自動運航船及び自動運航船の機能の主要原則 (認証と検査, 認証プロセス, リスク評価, 運用上の背景, 人的因子等)

Part 3: 目標, 機能要件及び期待性能 (航行の安全, 遠隔操船等の項目毎に規定)

### 3.6 温室効果ガス（GHG）排出削減に向けた新技術及び代替燃料

MSC 107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。リストの作成作業がコレスポンデンスグループにて行われており、2025年6月開催予定のMSC 110に報告される予定となっている。

また、2024年9月に開催された貨物運送小委員会（CCC 10）において、ガス燃料について引火点によらずIGFコードの適用対象とすべき、との提案があった。今回の会合で審議した結果、IGFコードを低引火点燃料だけでなく、全てのガス燃料に適用するためのSOLAS条約II-1章56の改正案が承認され、次回のMSC 110で採択される予定となっている。

### 3.7 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、非強制の海事分野サイバーリスクマネジメントに関する決議MSC428(98)と本決議実施につき参照すべきガイドライン（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た当該ガイドラインの改正案が承認された。この後、このガイドライン案は2025年3月開催の第49回簡易化委員会（FAL 49）にて承認され、MSC-FALサーキュラー（MSC-FAL.1/Circ.3/Rev.3）として発行された。

また、今回の会合では、海事サイバーセキュリティを高めるための次のステップとして、船舶及び港湾施設を対象とした新しいサイバーセキュリティ基準の必要性について合意され、次回以降のMSCにおいて議論するため、本議題の目標完了年を2026年まで延長することが合意された。

## 2024年にClassNKが発行したガイドライン

開発本部 技術研究所

2024年にClassNKでは、表1に示す10のガイドラインを発行している。ここでは、これらのガイドラインの概要を紹介する。

表1 2024年発行のガイドライン

タイトル	使用言語	発行年月	問い合わせ先
環境ガイドライン（第4.1版） Environmental Guidelines (Edition 4.1)	日・英	2024年2月	開発部
オープントップ型船舶に対するガイドライン （第1.0版） Guidelines for Open-top Ships (Edition 1.0)	日・英	2024年3月	開発部
代替燃料船ガイドライン（メタノール／エタノール ／LPG／アンモニア／水素）（第3.0版） Guidelines for Ships Using Alternative Fuels (Edition 3.0)	日・英	2024年7月	技術部
風力を利用した船舶補助推進装置に関するガイド ライン（第2.1版） Guidelines for Wind-Assisted Propulsion Systems for Ships (Edition 2.1)	日・英	2024年7月	技術部
人員移動設備に関するガイドライン（第1.0版） Guidelines for Offshore Access Systems (Edition 1.0)	日・英	2024年7月	開発部
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） Guidelines for Cyber resilience of ships (Edition 1.0)	日・英	2024年7月	機関部, 認証・海技部
液化水素運搬船ガイドライン（第3.0版） Guidelines for Liquefied Hydrogen Carriers (Edition 3.0)	日・英	2024年9月	技術部
浮体式洋上風力発電設備建設のための浮体曳航及び 係留施工ガイドライン（第1.0版）	日	2024年9月	交通物流部
船上の居住・労働環境に関するガイドライン （第1.1版） Guidelines for Excellent Living and Working Environment (Edition 1.1)	日・英	2024年10月	開発部

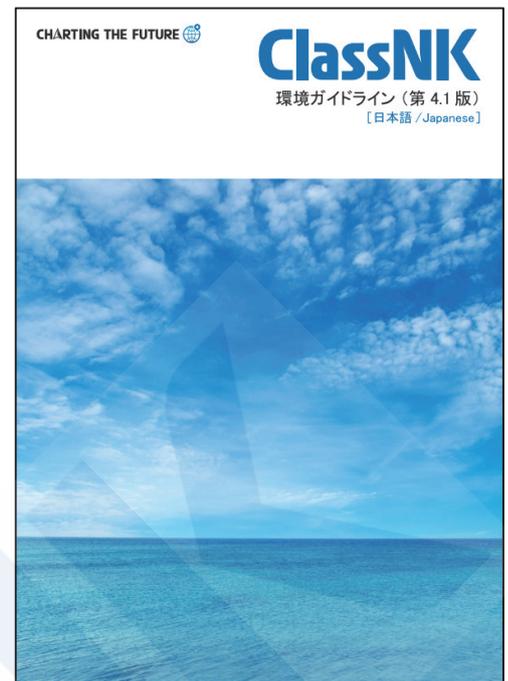
タイトル	使用言語	発行年月	問い合わせ先
電気自動車安全輸送ガイドライン (第2.0版) Guideline for the Safe Transportation of Electric Vehicles (Edition 2.0)	日・英	2024年12月	材料艙装部

ClassNK

## 環境ガイドライン（第4.1版）

環境問題への対応は全産業界で世界的に取り組まれており、海運業界もその例外ではない。企業の社会的責任（CSR）の高まり及び持続可能な開発目標（SDGs）に対する取組みもあり、海洋汚染防止や大気汚染防止などの様々な分野において、国際条約の遵守は当然のことながら、それ以上の環境問題への取組み（環境対策）が実施されている。本会では、船舶に適用した環境対策を、その種類に応じて船級符号への付記（ノートーション）として表示する取扱いを定めた「環境ガイドライン」を2008年に発行した。その後、関連規定の見直しに伴い数度の改正を行い、2021年に発行した第4.0版では、先進的な環境対策が講じられた船舶に対する取扱いについても新たに規定した。

第4.1版では、昨今の地球温暖化対策において、鉄鋼業をはじめ、建設業、自動車業などの各産業分野でも注目されているグリーン鋼材、すなわち鉄鋼の製造プロセス（原材料から製鋼までの全体の製造プロセス）の全部又は一部において実質的に二酸化炭素の放出量を低減又はゼロとする技術を活用することで製造される鋼材を、船体構造等に使用する場合の取扱いや、海洋生物等への悪影響が懸念されているマイクロプラスチック（海中のプラスチックごみのうち長さ5mm未満のもの）を回収するための装置の設置に関する取扱いを新たに規定した。



## オーパントップ型船舶に対するガイドライン（第1.0版）

近年、洋上風力発電設備等の大型貨物の輸送のため、コンテナ船や一般貨物船等においてハッチカバーを省略した状態での貨物輸送の需要が高まっている。

ハッチカバーを省略した状態での貨物輸送の指針としては、1994年にIMOよりガイドライン【IMO MSC/Circ.608/Rev.1 “Interim Guideline for Open-Top Containership”】が発行されており、模型試験の実施手順や貨物倉からの排水、消火設備等の要件が規定されている。

今般、上記ガイドライン及び本会の知見に基づき、対象船を一般貨物船等まで拡張したうえで、ハッチカバーを省略した状態での貨物輸送に対するガイドラインを制定した。本ガイドラインには、関連条約の適用免除について旗国から承認を取得する必要があること、規定される手順に従い模型試験を実施する必要があること等が規定されている。



## 代替燃料船ガイドライン（メタノール／エタノール／LPG／アンモニア／水素）（第3.0版）

本ガイドラインは、代替燃料を利用する船舶の安全要件を定めるもので、初版を2021年に発行している。その後、代替燃料種類の追加、あるいは実船舶でのガイドライン運用から得られた知見をもとに改正を重ね、今般、第3版（2024年8月）を発行した。本版では、水素燃料に関する安全要件を新設するとともに、アンモニア燃料に関する安全要件の一部改正を行った。

水素燃料及びアンモニア燃料は、船上におけるGHG削減効果が高い燃料として注目を集めている一方で、IMOが定める国際条約にはその安全基準が示されておらず、本ガイドライン第3版を発行した2024年8月時点で、暫定的なガイドライン開発を行っている最中である。このため、水素燃料及びアンモニア燃料の導入を検討している船舶において、一定の安全基準を提供すべく本会独自で安全要件を定めガイドラインとして発行している。

今後、IMOでは2024年末にアンモニア燃料の暫定ガイドライン、2025年末に水素燃料の暫定ガイドラインの最終化が計画されており、本ガイドラインもIMO暫定ガイドラインに沿って改正する予定である。



## 風力を利用した船舶補助推進装置に関するガイドライン（第2.1版）

現在、EEXI規制・CII格付け制度への対応や燃料費節減へのソリューションとして風力を利用した船舶補助推進装置の実装が加速している。

船舶の安全は国際条約や国内法、関連する規格等によって保証される一方で、風力推進装置について規定した条約類は存在しないのが現状である。そのため、本会では、2019年に「風力を利用した船舶補助推進装置の設計に関するガイドライン（初版）」を発行し、本ガイドラインを参照することで、風力補助推進システムの設計において考慮すべき設計要素を押さえることが可能になった。

さらに、実プロジェクトを通じて得られた知見を反映し、2024年7月に第2.1版として更新した。第2.1版では、参照規則の更新（鋼船規則X編の新設）および要件の詳細化及び明確化を主な目的としており、風力補助推進装置の設計、また船舶への搭載にあたって検討すべき点も包括的に確認できるものとなっている。

なお、引き続き風力推進装置の採用実績及び知見が蓄積された段階で逐次アップデートを行っていく予定である。



## 人員移動設備に関するガイドライン（第1.0版）

近年、世界各国では再生可能エネルギーの利用拡大が進んでおり、その手段のひとつとして欧州を中心に洋上発電設備の利用が始まっている。洋上発電設備の稼働開始を受けて保守作業も始まっており、長期間の稼働に伴う設備の保守・管理作業を支援することを目的とした特殊船舶が導入されている。

これらの船舶には、洋上施設上で保守・管理作業等を行う作業者が船舶から洋上施設へ安全で効率的にアクセスするため人員移動設備が備えられている。

また、洋上施設上で作業を行う人員が乗船する船舶に対する要件であるIP CodeがIMO第106回海上安全委員会にて採択された。IP Code上、人員移動設備に関する規定はあるものの、詳細な要件は規定されず、人員移動設備の設計、製造、試験及び設置は船級協会の要件によることになっている。

本会が発行した「人員移動設備に関するガイドライン」では、人員移動設備の設計に関する要件並びに製造時、船舶への搭載時及び船舶への搭載後の検査の要件等を規定した。また、要件に適合した人員移動設備を搭載する船舶に対する、人員移動設備の分類に応じた船級符号の付記について定めた。



## 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）

近年、船用システムは従来の物理的な接続から、コンピュータやインターネットを通じたデジタルな接続へと変化しており、それに伴ってサイバー攻撃のリスクも高まっている。サイバー攻撃を受けた場合、海上における人命と財産の安全確保及び海洋環境の汚染防止に影響を及ぼすおそれがある。

こうした状況を受けて、IACSは、サイバー攻撃に対する耐性＝サイバーレジリエンスを確保するための対策について検討を重ねた。その結果、2022年4月にUR E26およびUR E27という2つの統一要件を発行し、必要な対策を定めている。

このうち、UR E26は船舶を対象とした要件であり、本会ではこの内容を「鋼船規則X編5章」に取り入れた。2024年7月1日以降に建造契約が結ばれる船舶に対して、当該規則が適用される。

本ガイドラインは、「鋼船規則X編5章」に定められたサイバーレジリエンス要件についてわかりやすく説明する。特に、要件への対応が求められる船主や造船所（統合者）を対象としており、実務的な理解と対応の一助となることを目指している。構成は全5章で、概要、適用範囲、プロセス、提出資料、立会検査について解説する。

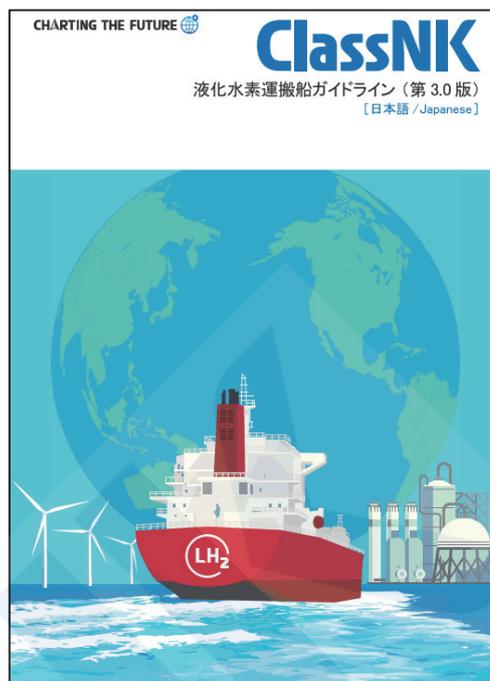


## 液化水素運搬船ガイドライン（第3.0版）

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

IMOでは、マイナス253度という極低温での液化ガス輸送に従事する液化水素運搬船の安全要件整備の検討が行われており、2016年には「液化水素ばら積み運送のための暫定勧告」が採択された。以後、液化水素運搬船の開発は進展し、既存の実証航海船とは異なる設計の貨物格納設備を備えた、より大型の船舶が建造される運びとなった。これに対応する形で、IMOでは2021年より本暫定勧告の改正の議論が行われ、2024年5月のMSC108にて改正を採択した。

本会は当該改正及び関連のプロジェクトを通じて得られた知見を反映し、2017年に初版発行した「液化水素運搬船ガイドライン」を第3.0版に更新した。今回の更新では、実証航海船とは異なる設計の貨物格納設備のための安全要件を新設するとともに、将来的な適用範囲の拡張も見据えたガイドライン構成の改良を行った。また、液化水素運搬船に適用可能な金属材料の選定基準をより明確化すべく、水素装置機器に使用される金属材料の選定に関する指針を附属書として追加した。



## 浮体式洋上風力発電設備建設のための浮体曳航及び係留施工ガイドライン（第1.0版）

政府が推進する2050年のカーボンニュートラル実現のため、洋上風力発電のさらなる普及が期待されているが、遠浅海域に限られる国内では発電量を確保するために、深い海域においても設置可能な浮体式洋上風力発電の導入拡大が重要になっている。浮体式洋上風力発電設備は、アンカー及び係留チェーン（また、将来的には繊維ロープなど）で構成される係留システムによって、現地海域で位置保持されることが一般的であり、船舶による浮体曳航や係留施工作業が必要となる。

当該ガイドラインは、浮体式洋上風力発電設備の浮体曳航や新たな係留施工技術の社会実装と国際展開を促進し、それらを安全かつ効率的に計画・遂行するための標準的な指針として、本会独自に取りまとめたものである。要件としては、海外の洋上作業現場で広く活用されている「GOMOガイドライン」、本会発行の「HSEマネジメントシステム導入のためのガイドライン」、及び国内外の事例などを参考としており、実プロジェクトにおける作業の計画、遂行の各段階において、当該ガイドラインが安全かつ効率的なプロジェクト開発の一助になることを期待している。



## 船上の居住・労働環境に関するガイドライン（第1.1版）

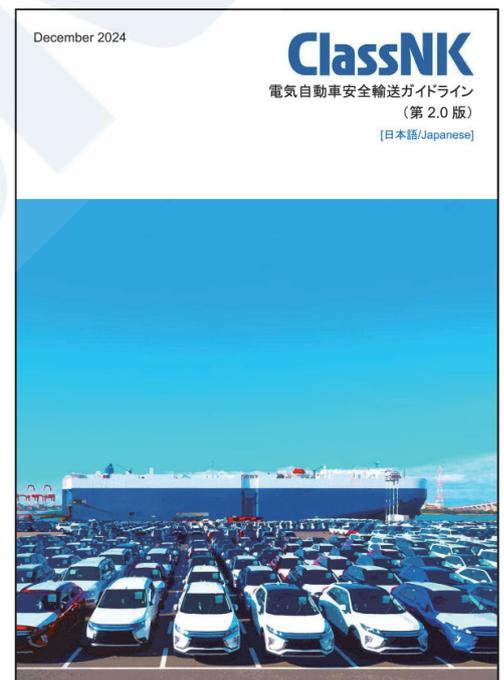
船上で働く船員の労働環境について、2013年に海上労働条約（MLC，2006）が発効し、国際的に改善の取組みが行われている。近年では、船舶が船員にとって魅力的な職場となるよう、海上労働条約によって要求される以上に労働環境・居住環境の改善に力を入れた船舶が登場している。「船上の居住・労働環境に関するガイドライン」は、このような船舶を識別できるように、ノーテーションとして**Excellent Living and Working environment**（略号：ELW）を船級符号に付記するために、2022年に発行したものである。

第1.1版では、労働環境改善の取組みとして、野菜等を概ね自動的に栽培できる水耕栽培装置を居住区に備えて、新鮮な野菜等を船員の食事に提供する船舶が増加していることを受けて、このような装置を備える船舶についてもこのノーテーションを付記できるよう改正を行った。



## 電気自動車安全輸送ガイドライン（第2.0版）

世界的な電気自動車の登録台数の大幅な増加に伴い、自動車運搬船での電気自動車の輸送台数も増加する事が予想される。電気自動車はリチウムイオンバッテリー（LIB）に蓄えられた電気エネルギーが駆動源であり、LIBから出火した場合、もしくはLIBに類焼した場合、火災を鎮火するためにはガソリン車とは異なった対応が必要となる。2023年8月には電気自動車の火災時の特徴や留意点を示し、有効と考えられる火災安全措置の注意すべきポイントを示した「電気自動車安全輸送ガイドライン」を発行した。第2.0版では自動車運搬船の車両積載区域から出火した場合を想定し、船員が安全に船舶から脱出するためにどういった所にリスクがあるか、考えられる対策は何かに焦点を当てた改正を行った。自動車運搬船は他の船種とは異なり車両積載区域の上に居住区や救命設備が位置していることから他の船種とは異なるリスクが存在する。リスクおよび対策を議論するため、国内の関係者の意見を取り入れながらリスク評価を行いリスク評価レポートにまとめた。改正版ガイドラインとともにリスク評価レポートも同時に公開している。有効と考えられる対策を講じた船舶にその旨を船級符号に付記できるようにしている。





---

## ClassNK 技報

No.11 (2025 年 ( I ))

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。

© 2025 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](http://www.classnk.or.jp)