

ClassNK 技報

No.9 2024年（I）

特集記事： 自動車運搬船火災への取組み



—目 次—

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

特集記事 「自動車運搬船火災への取組み」

電気自動車海上安全輸送について	技術本部 材料機装部.....	3
-----------------------	-----------------	---

世界的な電気自動車の登録台数の大幅な増加に伴い、海上輸送される電気自動車の割合も増加していくことが予想される。電気自動車の駆動源であるリチウムイオン電池から出火した場合もしくはそれに延焼した場合、鎮火させるためにはガソリン車とは異なった火災対応が必要となる。IMOでも電気自動車を含む新エネルギー車を輸送する船舶に関する火災安全措置について議論が開始されたが、その規則策定までに数年はかかる見込みである。本会ではこれら状況を鑑み、電気自動車火災の特徴、対処方針等について検討し「電気自動車安全輸送ガイドライン」として纏めた。本稿ではガイドラインの内容について詳しく解説していく。

自動車運搬船の高膨張泡消火設備

.....	一般財団法人日本船舶技術研究協会 太田 進.....	15
-------	----------------------------	----

Ro-Ro旅客船を除く自動車運搬船の貨物区域（車両区域）の多くは高膨張泡消火設備で保護されているが、こうした貨物区域の火災において消火に奏功しなかった例が近年複数報告されている。同様の事故の再発を防止するため、国土交通省安全政策課は2021年に通達により高膨張泡消火設備の早期の起動を推奨し、一般財団法人日本船舶技術研究協会は2023年度に作動の信頼性向上に係る検討を実施し、さらに株式会社カシワテックは日本海事協会等の補助の下、実験的な研究により設備の有効性を確認しているところである。本稿では、高膨張泡消火設備の概要を紹介するとともに、これら研究の概要を紹介する。

技術一般

鉛直方向加振時の粒状貨物による内圧の合理的な推定方法

.....	開発本部 技術研究所, 東京大学 生産技術研究所 桑野研究室.....	23
-------	-------------------------------------	----

ばら積乾貨物による内圧の合理的な推定法に向けて、貨物粒子と底板の運動の相互の影響を考慮した実験的・数値解析的検討を進めている。本稿では、底板の変形に起因してばら積乾貨物による荷重を再分配するアーチ効果と呼ばれる現象について概説した上で、弾性体底板を有する揺動試験装置の構想、並びに、貨物積み高さ、船倉内寸法及び底板の剛性不均一性がアーチ効果に及ぼす影響について検討した結果について紹介する。

船舶へのAIシステム活用における、開発過程の品質管理について

.....開発本部 技術研究所..... 31

近年海事業界においてもAIシステムの開発が進んでいる。機械学習を中心としたAIは大量のデータからパターンやルール等を学習しており、開発過程を通じてAI特有の課題に取り組みつつ、品質を確保するために必要な活動を実施していくことが求められる。このような背景から、本会はAIシステムの開発者が開発時に考慮すべき事項を整理し『船舶へのAIシステム活用に向けたテクニカルガイド -AIシステムの開発過程における品質管理-』として取りまとめることを予定している。本稿ではその内容について紹介する。

ロケット回収船の研究開発と船級規則への対応

.....国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 角 有司..... 37

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）では、H3ロケットの次の基幹ロケットとして、再使用型ロケットの検討を進めている。これは、文部科学省が中心となって設定した革新的将来宇宙輸送システムのロードマップに対応したものであり、2030年頃の初号機打上げを目指し、大幅な低コスト化の実現に向けて開発するロケットである。本報告では、再使用型ロケットを洋上で回収するためのロケット洋上回収船の検討状況と、日本海事協会との共同研究で実施した船級規則との適合性結果について概説する。

2023年にClassNKが発行したガイドライン 45

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

巻頭言

特集「自動車運搬船火災への取組み」発刊によせて

開発本部 技術研究所長 石橋 公也

ClassNK技報No.9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.8）では、2023年7月にIMO MEPC 80（国際海事機関 海洋環境保護委員会）においてGHG削減2023年改定戦略が採択されたことを踏まえ、これまで以上の高い目標達成に向けた国際的な規制強化の動向及びその実現のための関連技術動向や最新の研究開発成果等を報告いたしました。

カーボンニュートラル達成のために国際的に電気自動車の普及率が増加しており、その結果として自動車運搬船による電気自動車の輸送も増加しています。電気自動車の火災発生確率はガソリン車と比べて低いという統計データがありますが、火災発生後の様相が異なることから電気自動車のより安全な輸送に貢献するために本会では「電気自動車安全輸送ガイドライン（第1.0版）」を発行しました。

本技報No.9では、「自動車運搬船火災への取組み」と題する特集を組み、電気自動車安全輸送のための指針及び自動車運搬船における消火技術についてご紹介いたします。さらに、本会が国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）様と取り組んでいるロケット回収船及び本会における最新の技術活動等に係る多彩な記事・論文を掲載しています。

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

今後とも皆様のご理解とご支援をお願い申し上げます。

電気自動車海上安全輸送について

— 電気自動車の火災の特徴と対応指針について —

多羅尾 保允*

1. はじめに

最近、電気自動車が街中で走っているのを目にすることが多くなってきた。電気自動車はリチウムイオン電池がその駆動源として利用されており、ガソリン車のように走行時に二酸化炭素を排出しないため、環境に優しいといわれている。リチウムイオン電池の特徴としてはエネルギー密度と電圧が高く、充電できることである。

図1は国際エネルギー機関が公表している電気自動車の登録台数のグラフである。カーボンニュートラルを達成するために、国際的に電気自動車の普及率は指数関数的に増加しており、就航船を含め自動車運搬船による電気自動車の輸送が開始され、輸送される割合が増加しているのが現状である。では何が問題となっているかという、電気自動車の駆動用のリチウムイオン電池に異常が起こった場合、もしくはリチウムイオン電池から出火した場合の対処方法が特殊であるということである。リチウムイオン電池は出火すると鎮火するまでに多くの時間を要するということが分かっている。自動車運搬船で輸送される自動車は、狭い間隔で車両積載区域に積載される。そのため、自動車から出火すると、隣接した自動車に延焼するリスクがあり、出火した車両に近づいて消火活動を実施することが難しい可能性がある。電気自動車に延焼、もしくはそれから出火した場合、特殊な対応を車両積載区域という特殊な環境の中で実施しなければならない。このように、自動車運搬船の車両積載区域の特徴や自動車の積載状況の特性を考慮して消火活動が実施できるのが課題である。つまり、自動車運搬船でリチウムイオン電池が搭載された電気自動車を安全に輸送するための特別な対応や指針が必要となる。

本稿では、自動車運搬船での電気自動車海上安全輸送に貢献するために本会にて発行した電気自動車安全輸送ガイドラインの内容を解説する。

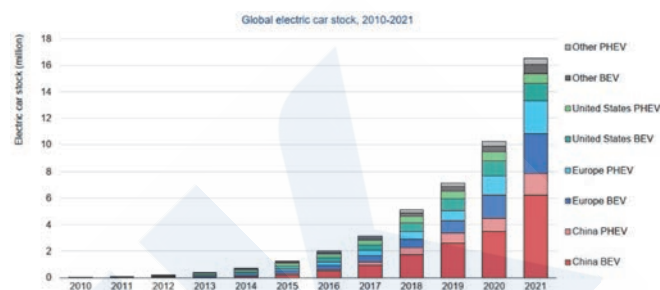


図1 電気自動車登録台数¹⁾

2. 本会の取り組み

ここ最近の自動車運搬船の火災事故を受けて本会では、特に電気自動車を輸送する際の火災安全措置の検討を継続的に進めている。ここで注意したいのは、電気自動車の火災発生確率はガソリン車に比べて低いという統計データがあることと、また自動車運搬船の火災事故の原因として、未だ電気自動車が出火元であると特定された事例はないことである。

しかし、電気自動車は、ガソリン車と異なり、動力源が二次電池（リチウムイオン電池）に蓄えられる電気である。このリチウムイオン電池が内部短絡を起こすと熱暴走が始まり、さらには火災が発生してしまう。リチウムイオン電池は火災が発生すると鎮火させるのが非常に困難であることが分かっている。

また、陸上ではリチウムイオン電池火災の対処方針は既に存在しているが、船舶という特殊な環境下でそれらが実行できるのかが大きな課題の一つである。

そこで、本会では船舶という特殊な環境及び電気自動車火災の特性を考慮し、電気自動車火災の対処方針について2023年8月に「電気自動車安全輸送ガイドライン（第1.0版）」と「電気自動車火災対策検討リスト」を公表している。船舶を所有、運航または管理されている方々ならびに船舶を建造されている造船所の方にこれらを参考にして対策を検討いただき、自動車運搬船の火災被害の低減に繋がればよいと考えている。3章からは具体的に電気自動車海上安全輸送に関して詳細に解説していく。

* 技術本部 材料機装部

3. 電気自動車安全輸送ガイドラインの技術的解説

3.1 電気自動車の特徴とその火災の特徴

3.1.1 電気自動車

電気自動車は電気を動力源とした自動車のことである。電気を動力源とする自動車としては、純電気自動車、プラグインハイブリッド自動車、ハイブリッド自動車がある。それぞれに使用されている電池の種類やシステム、容量は異なるが電気自動車の一種であると考えて差し支えない。ただし、バッテリーセルの種類や電池容量が異なっているため火災発生時のリスクが全くの同一ではないということに留意されたい。

電池容量が一番大きい純電気自動車は、リチウムイオン電池が使われていることが多く、図2の通り車両の床一面に広がったバッテリーパックにリチウムイオンセルがしきつめられている。車両やバッテリーの種類により異なるが数十個から数千個のリチウムイオンセルがバッテリーパックに搭載されている。

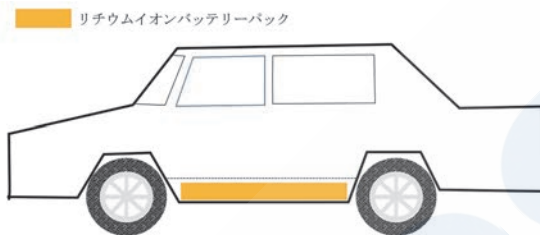


図2 電気自動車の駆動用バッテリーの位置

3.1.2 駆動用バッテリー

電気自動車の走行に必要な電力量を、実用可能なレベルで車載可能とするエネルギー密度をもつ電池は、いまのところリチウムイオン電池しかないといわれている。リチウムイオン電池は電解液に有機溶媒を用いていることで、高い電位（電圧）まで電気分解を起こしにくいという特徴により、高い定格電圧と高いエネルギー密度を実現している。しかし、一度電気分解を起こしガス化してしまうと元には戻らないため、入出力電力からセルの温度まで様々な要素がモニターされている²⁾。

リチウムイオン電池セルの種類は、セルがシート状になっているラミネート型、角型、そして乾電池の形状として馴染みのある円筒型の3種類がある。バッテリーセル自体の特徴は様々あるが、航続距離や冷却器の要否によりどのセルを使用しているのかは車種毎に異なっている。前述の通り電気自動車にはバッテリーパックと呼ばれるリチウムイオンセル

を収容した強固な筐体に取り付けられており、電池の総容量は20 kWhから100 kWh以上である。そして、その電圧は300 Vから400 Vと非常に高電圧である。

3.1.3 電気自動車の安全性

高電圧のリチウムイオン電池を搭載している電気自動車には、以下のような自動車の乗員に対する安全対策が設けられている³⁾。

- 1) 感電に対する対策として、駆動用バッテリーは車両衝突時に乗員が高電圧電池や高電圧部に触れないような位置に配置すると共に、強固な筐体で保護し、衝突時に高電圧回路を遮断する。
- 2) 熱暴走を防止するために、バッテリーマネジメントシステムにより電流・電圧・温度を監視制御し、異常を検知した場合は高電圧回路を遮断する。

しかし、電気自動車の安全性は日々高められており、電気自動車の安全対策はここに言及した事項だけではないことを理解されたい。

3.1.4 電気自動車火災の特徴

電気自動車はバッテリーパックという重量物を搭載しているため、車体自体の軽量化が行われており複合樹脂などが多く使用されている。通常のガソリン車と比べ、可燃性材料が多く使われていることにも留意しなければならない。

さらに、リチウムイオンセルは内部短絡を起こすと熱暴走を起こす。リチウムイオン電池の熱暴走に至る一例を図3に示す。この図は円筒形セルの実験データを示したものである。内部短絡を起こしたバッテリーセルはジュール発熱によりバッテリーセルの温度が上昇していく。その過程で電解液や負極の反応、セパレーターのメルトダウンを起こし、最終的には1000℃を超える発熱反応に至る。この実験結果では1000℃に至るまでの時間はわずか28分足らずである。

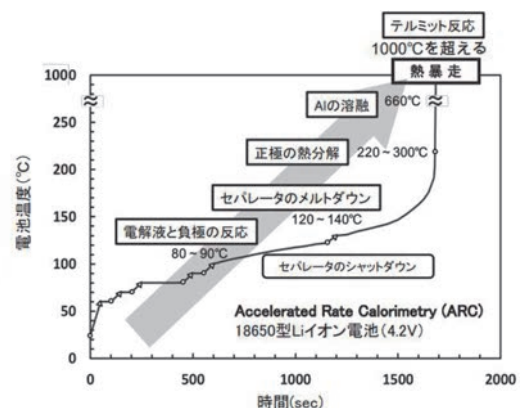


図3 熱暴走に至るまでの温度及び時間の一例⁴⁾

さらに、熱暴走を起こす過程で可燃性ガスが発生することにも留意しなければならない。リチウムイオン電池から発生するガスを分析した結果より、メタンやエタンなどの炭化水素ガスや水素ガスなどの可燃性ガスが発生することが分かっている⁵⁾。つまり、電気自動車積載区域中は可燃性ガス雰囲気になる可能性があり、着火・爆発に注意しなければならない。

また、発生するガスは可燃性ガスだけではなく、毒性ガスであるフッ化水素ガスも発生する。フッ化水素ガスは、リチウムイオン電池の電解液に含まれる六フッ化リン酸リチウムと水との反応や、一般的なバインダーであるポリフッ化ビニリデンの熱分解の過程で発生する人体に有毒なガスである⁶⁾。30分以内に脱出不能な状態や回復不能な健康障害に陥る危険を回避できる限界濃度である脱出限界濃度(Immediately Dangerous to Life or Health; IDLH)は30 ppmである。

そして、感電に対する留意も必要である。前述の通り電気自動車のリチウムイオン電池の電圧は300 Vから400 Vの高電圧であるが、既に内部短絡を起こしているセルに射水しても感電のリスクは非常に低いと考えられる。しかしながら、数十個から数千個のバッテリーセルが電気自動車には搭載されていることを考えると、全てのバッテリーセルが内部短絡を起こしているとは限らず、内部短絡を起こしていないバッテリーセルへの射水によって引き起こされる感電に留意した消火活動を行うことが重要である。

3.2 電気自動車火災への対応指針

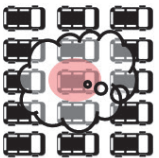
ここまでは電気自動車自体の火災の特徴やその注意点について説明してきた。この後は、それら特徴

や自動車運搬船の車両積載区域の環境ならびに車両積載状況を考慮し、電気自動車火災の際に具体的にどのような対策がとれるのかを解説する。個別に解説する前に、火災発生に至るまでのシナリオを整理した表1を参照されたい。3.1でも説明しているが、電気自動車に搭載されているリチウムイオン電池が内部短絡を起こした場合、熱暴走を起こす。リチウムイオン電池が熱暴走を起こすとジュール発熱によりセルの温度は上昇していき、正極や負極の熱分解や電解液が気化し可燃性ガスが発生する。それらガスがバッテリーパックの安全弁から車両外へ放出されることとなる。それらは白煙として認識可能である。可燃性ガスが車両積載区域中へ放出されることで、車両積載区域中で爆発性雰囲気を形成する可能性がある。ガス濃度が爆発下限界(Lower Explosive Limit; LEL)に達し、着火源により着火エネルギーを与えられると引火し爆発・火災が発生する。その火災が車両の部品に引火し電気自動車の火災が始まると考えられる。電気自動車の火災により隣接車両に延焼したり、可燃性ガスが火災車両とは違った場所で滞留し着火することで意図しない所で火災が発生したりする危険性があり、これらにより車両積載区域中で火災が拡大していくと考えられる。これら火災シナリオを考慮した上で有効と考えられる火災対策について解説していく。

3.2.1 早期発見

電気自動車の火災対策を考える上で最も重要なことの一つは、火災を起こしそうな車両もしくは火災車両を早期に発見することである。図3で内部短絡から熱暴走末期までの時間が非常に短いことを説明した。つまり、火災を起こしそうな車両の隔離、火災車両への対応について少しでも早く行動を起こせ

表1 自動車運搬船の火災拡大のシナリオ

事象の整理				
内部短絡	温度上昇	白煙発生	ガスへ着火 車両部品へ延焼	火災拡大
				
内部短絡等のトリガーによりリチウムイオン電池が熱暴走を起こす	内部短絡を起こしたセルの温度が上昇する。	温度上昇により正極、負極での化学反応等の反応が起こりガス(可燃性ガスや毒性ガス)が発生し、セルもしくはパックの安全弁から吹き出す	可燃性ガスに着火し、車両部品へ着火する	ガスが車両積載区域中で爆発下限界に達し、火災車両以外でも火災を起こす。火元車両に隣接している車両も火災になる。

るようになることが望ましい。これらを解決するためには、図4に示す通り、リチウムイオン電池の熱暴走に至るまでの過程を事象毎に整理し、それらの段階で有効となるような措置をとることが重要である。熱暴走を起こしたバッテリーセルはバッテリーセルの温度上昇が起こる「温度上昇段階」、バッテリーパックから可燃性ガスが噴出する「可燃性ガス発生段階」、そして火災が発生する「火災発生段階」の3フェーズに分類できる。

「温度上昇段階」ではセルの温度上昇を検知できるセンサーをバッテリー近くに設置する対策が考えられる。しかしながら、センサーで感知した温度上昇の信号をどのように送受信するのかなど課題は多い。

「可燃性ガス発生段階」では発火前に発生する可燃性ガス（HC系ガスや水素）をガス検知器で検知する対策が考えられる。リチウムイオン電池から発生する可燃性ガスの総量を考慮して、どの程度の濃度の検知が可能なガス検知器とするのか、車両積載区域内の通風状況によってはガスが拡散してしまい迅速に検知できない可能性があるなどこちらも課題は多い。

「火災発生段階」では、火災探知器や熱探知器、そして煙探知器が効果を発揮する。しかし、火災探知器や熱探知器は、それぞれ炎が見える位置もしくは輻射熱を受ける位置に設置されていないと、それぞれが持つ機能を最大限に発揮することができないため、車両積載区域内への設置台数が著しく多くなることが予想される。また煙探知器の効果を最大限に引き出すためには、火災時に発生した煙を探知器にタイムリーに到達させる必要がある。しかしながら、車両積載区域内の天井部には梁や桁が配置されており、煙の流動に制限をかけているため、煙探知器の設置場所の工夫が必要である。



図4 リチウムイオンセルの熱暴走に至るまでの事象の整理

現時点の技術で「火災発生段階」と「可燃性ガス

発生段階」の両方で効果を発揮する製品がある。それはClosed Circuit Tele-Vision(CCTV)である。CCTVは火災発生時の黒煙はもちろん可燃性ガスの白煙も画像として認識することが可能であり、車両積載区域をCCTVで監視することにより可燃性ガス発生段階から発見することが可能となる。図5にCCTVを車両積載区域に設置した場合に確認できるカメラからのイメージ画像を示す。ただし、車両積載区域を網羅的に監視するためには非常に多くのCCTVを設置しなければならず、それら1つ1つの映像を常時監視することは現実的ではない。そこで、AIによる画像認識技術を用いて煙を認識し警報を発するという技術の採用が有効であると考えられる。



図5 車両積載区域に設置したCCTVからの自動車の見え方（イメージ）

ここまで早期発見に関して様々な対策を解説してきたが、電気自動車から警報を発することも早期発見に寄与すると考える。電気自動車に搭載されているバッテリーマネジメントシステムはバッテリーセルの状態（温度、電圧等）を監視しているため、バッテリーセルの温度上昇を検知したある段階で自動車のライトを点灯させることやクラクションを鳴らすことができれば異常車両の早期発見に大きく貢献するものと考えられる。電気自動車の外部から目視できる異常が現れる前に、内部で起こっている異常を診断できるのは電気自動車に搭載されているバッテリーマネジメントシステムだけである。

3.2.2 二次災害の防止

熱暴走の過程でリチウムイオン電池から可燃性ガス、具体的には水素ガスや、メタン、エタン、プロパンなどのHC系ガスが発生する。それぞれどの程度の量の可燃性ガスが発生するのかは正極、負極の種類、電解液の種類や量、充電率により異なる⁴⁾。可燃性ガスが発生すると車両積載区域中に滞留し、LELに達する恐れがある。さらに、爆発雰囲気中に着火源があった場合、着火エネルギー以上のエネルギーを与えられると引火し爆発・火災が発生する。

例えば図6で示すように梁と桁で形成される空間に、非防爆型の電気機器がある時、滞留した可燃性ガスが100%LELに達すると引火して火災が発生する可能性がある。そのため、可燃性ガスが車両積載区域中のどこに滞留する可能性があるのかを把握し、そもそも滞留しない構造にすることも有効な対策の一つであると考えられる。

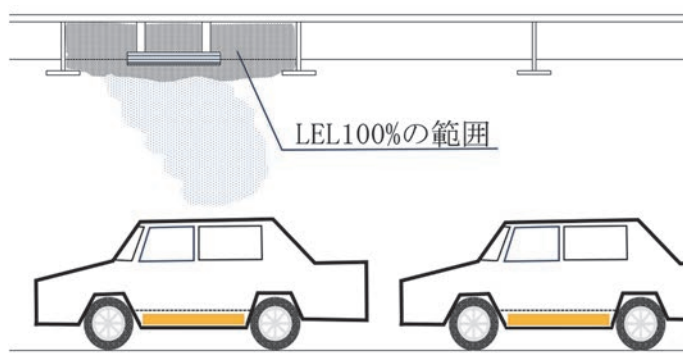


図6 車両積載区域中での爆発性雰囲気形成のイメージ

車両積載区域中で二次災害を防止する方法は大きく分けて以下の2つの手段が考えられる。

- 可燃性ガスが放出されても爆発性雰囲気を形成しないように通風によって、可燃性ガスを船外に排出し、ガスが車両積載区域内に滞留しないような構造とする
- 爆発性雰囲気が形成されても引火しないように車両積載区域内の電気機器は適切な防爆型とする

電気機器の防爆等級は、車両積載区域では、有事の際に可燃性ガスが放出されるため、IEC60079-10で区分されるZone 2での使用に適した防爆構造とし、ガス蒸気グループ及び温度等級については、熱暴走時に発生するガス種を調査した結果に基づき、ガス蒸気グループIIC、温度等級T2が適当である。なお、これはリチウムイオン電池から発生するガス種のみを考慮した防爆等級であり、ガソリン車や天然ガス自動車、水素自動車、危険物などを積載する場合はそれぞれに要求される防爆等級を考慮しなければならないことに留意されたい。

3.2.3 延焼防止

単一車両から火災が発生した場合、車両はDoor to Doorで10cm、Rear to Bumperで30cmの隙間で積載されているため、火災時の輻射熱で隣接車両へ延焼するという事は容易に想像できる。そのため、火災が発生した後に、火災車両と隣接車両を隔離するための延焼防止措置を実施することが極めて重要である。延焼防止を行う手段としては様々なものが

考えられるが、比較的知られているものはウォーターカーテンとファイヤーブランケットである。

ウォーターカーテンはノズルから噴霧する水により水のカーテンを形成するもので、火災車両から発生する輻射熱を遮断することができる。固定式のウォーターカーテンシステムは存在するが、図7に示すような持運び式のウォーターカーテンホースという消火ホースを応用した製品がある。ウォーターカーテンホースは固定式のウォーターカーテンシステムとは異なり、固定配管やノズルは不要で、消火ホースに特殊な形状の穴が開いている。車両積載状況に応じてウォーターカーテンを形成したい箇所に設置しておくことが可能であるため、有効な手段の一つであると考えられる。

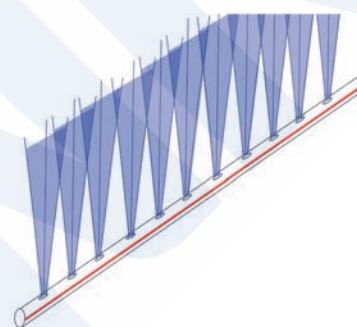


図7 ウォーターカーテンホースイメージ図

ファイヤーブランケットは、本来は火災車両を包み込み、ブランケット内で酸欠状態を作り出して消火するものであるが、自動車運搬船ではラッシングホールが空いているため火勢は弱まる可能性はあるものの鎮火には至らないと考えている。しかしながら、ファイヤーブランケットの優れた耐熱性から延焼防止手段としても利用可能と考えている。ファイヤーブランケットは図8に示す通りに本会職員2名でも展開できる一方で、車両積載状況を考慮すると、車両積載区域内でファイヤーブランケットを展開するための工夫が必要であろう。



図8 ファイヤーブランケット
(協力：日本特装株式会社)

3.2.4 消火手順

リチウムイオン電池の消火手順として大切なのは

「バーニングアウト」の考え方を理解することである。「バーニングアウト」とは燃える材料がなくなり燃え尽きてしまうことを意味する。例えばガス火災が発生した場合、消火したとしてもガスは漏れ続けることとなり区画内に可燃性ガスが充満しそれに再引火すれば爆発を起こすこととなる。この場合はすぐに消火せずにガスの供給元を遮断し、ガスを燃やしつつすることが消火手順となる。その間は延焼を防止することに努めることとなる。

バッテリー火災も同様であり、バッテリーからの火災を消火したとしても熱暴走を起こしたバッテリーは電極間の電位差がなくなるまで化学反応は続き、発熱やガスの発生は継続する。ガスの発生元からの供給を遮断することはできないため、熱暴走を起こしたバッテリーの温度を下げ化学反応を緩やかにし、化学反応が終わるまで周囲に延焼しないような措置を講じ続けることに専念する必要がある。

バッテリーを冷却するための手段としては、船内に配置されている消火栓からの放水が有効である。電気自動車のバッテリーは車両下部に配置されているため、単に車両の上から水をかけているだけでは、バッテリー自体を冷却できない。図9に示す水噴霧放射器を使用し車両下部から放水しバッテリーを冷却することや貫通型ノズルを用いてセルを直接冷却することが有効である。感電防止のために、貫通型ノズルに関しては内部短絡を起こしていないセルに貫通することのない位置にノズルを安全に挿入できる場合に限る。

バッテリーを冷却する上で重要なことは、熱暴走を起こしたバッテリーの冷却を止めてしまうと再び温度が上昇し可燃性ガスが発生し再燃することである。バッテリーの冷却を止めても温度が上昇してこないかをサーマルカメラ等を用いて都度確認することも重要である。



図9 水噴霧放射器
(Marine Fire fightingより引用)

バッテリーの冷却は非常に重要ではあるがバッテリーは高電圧であるがゆえに感電に対して留意して消火活動を行わなければならない。通電したグリッドに対し直射水及び噴霧した際に、どの程度の距離をとればホースを持っている人に電気が流れないかを実験した結果⁷⁾がある。水の流量約28.35 m³/hで0.21 MPaの圧力のもとでは、直射水であれば11.5 ft(約3.45 m)、30度の噴霧角度の場合は1.5 ft(約0.45 m)、90度の噴霧角度の場合は0.5 ft(約0.15 m)離れれば電流値は0 mAとなった。つまり、感電に対して配慮するには噴霧を利用することが重要であることを示している。

3.2.5 消火活動

ここでは消火活動をする上で重要な点を解説する。消火活動を行う場合安全性を確保するために少なくとも2人1組(Two buddy system)で火災に立ち向かうことが基本原則である。1人に何か危険が起きたとしても他方の消防員で対応が可能となる場合がある。また、1人では見過ごすような危険な状況に対しても2人であれば見過ごす確率が低下する。

火災が発生すると当然の如く煙が発生する。煙は浮遊固体(すす、繊維及びほこり)、液体粒子(炭化水素及び水)及びガス(一酸化炭素、シアン化水素等の有毒ガス)が混合された気体であり、人体に有害である。火災発生区画ではこのような煙が発生し、視界不良に陥る。故に、消火活動を行う前に火災時に発生した煙を排気すること、つまり通風を行うことが重要である。通風制御については次項で詳しく解説する。通風により煙を火災発生区画から排除することで視界を確保することができる。視界を確保することで火元の特定に繋がり、適切な対処ができると共に、火災拡大ルートも推定することができる。また、煙を排気することで消防員の安全につ

いても確保することができる。つまり通風作業というのは消火活動において最も重要な要素の一つである。

バッテリー火災の鎮火には冷却を完了させる必要があるため非常に長い時間を要することが分かっている。SOLAS条約で規定されている消防員用の呼吸具は一般的に使用可能時間が20分から30分程度である。そのため、消火活動を長時間継続できるような呼吸具を備えることや通風作業を適切に行い呼吸具なしでも消火活動を行えるような環境にすることが極めて重要である。

そして消火の際に延焼防止措置や消火活動で使用した消火水を適切に排水することも重要である。火災の熱で溶けた樹脂等がスカッパに詰まってしまうと適切に排水できず船の復原性に影響を与える危険性がある。消火活動の最中にスカッパから適切に排水ができていないか、詰まりがないか等は都度確認する必要がある。

3.2.6 通風制御

前項では通風の重要性について解説してきたが、通風によって新鮮空気を車両積載区域内へ流入させることは火災を拡大させることに繋がるという懸念があるため、火災時には火災を封じ込めるために通風を遮断するべきであるという声が多くある。しかしながら、車両積載区域のような大空間で数台の火災車両が消費する酸素量程度では車両積載区域内が酸欠状態になる可能性は低く、かえって煙を充満させ危険な状況を作り出す可能性がある。消火栓を用いた消火活動を行う上では火災時の煙を効果的に排除し、消火活動を行える空間を作ることの方が極めて重要である。排煙作業の目的について整理すると下記の通りである。

- 1) 消防員の視界を改善し、火元の確認や逃げ遅れ者を発見し易くすること
- 2) 高温の可燃性ガスや有毒ガスを排出し、それらの危険性を低減すること
- 3) フラッシュオーバーやバックドラフトの発生の可能性を軽減すること

通風の基本原則は図10に示すような消防員がアクセスしやすいような空気の流れを作ることである。しかしながらファンの配置やスロープの位置、通風ダクトの開口の向きによっては空気が滞留する所が存在する。そのような状況では効果的に排煙することはできない。故に、個船毎に通風状況について調査し、滞留しやすい箇所を特定しておくことが大切である。空気が滞留している箇所については火災時に効果的に排煙できるようにポータブルファンを用いて強制換気を行うか、区画内を正圧にして煙を効率良

く排出する方法が考えられる。

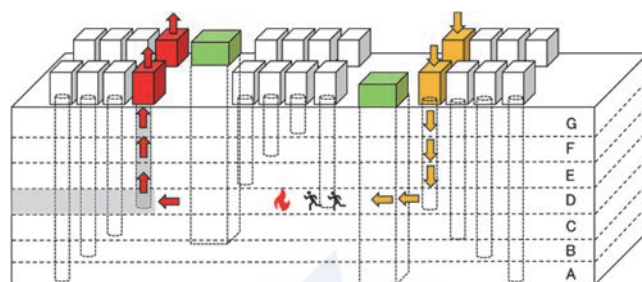


図10 艙内通風制御の概念図

3.2.7 固定式消火装置

いままで解説してきたような早期発見、延焼防止、二次災害防止及び消火活動の対策は非常に有効であるが、固定式消火装置を迅速に起動することも有効な対策の一つである。火災安全設備のための国際コード（FSSコード）にて自動車運搬船の車両積載区域に設置が認められている固定式消火装置は、水系消火装置、高膨張泡消火装置及び炭酸ガス消火装置の3つである。水系消火装置にあっては搭載が現実的ではないため、自動車運搬船においては高膨張泡消火装置または炭酸ガス消火装置が主流となっている。固定式消火装置は消火手段として最後の砦と考えられるが、電気自動車火災を対象とした場合は少し様相が異なってくる。それぞれの消火装置の効果を簡単に記載すると表2に示す通りである。

表2 固定式消火装置の消火原理の整理

装置名	消火原理
高膨張泡消火装置	泡で火災対象を包み込むことで酸欠状態及び冷却効果で消火する
炭酸ガス消火装置	保護区画の酸素濃度を燃焼が継続できなくなるレベルまで下げることで消火する
水系消火装置	冷却することで可燃性ベーパーの発生を防ぎ火災を継続できなくする

電気自動車のリチウムイオン電池が熱暴走を起こした場合、火のある所は有酸素燃焼であるが、バッテリーの発熱反応は酸素を必要としない化学反応である。炎を消すのであれば表2に示すいずれかの固定式消火装置による効果が期待できる。

水系消火装置であれば、電気自動車のバッテリーは車両下部に配置されているためバッテリーを直接は冷却できないが、水自体の冷却効果は非常に高く火災周囲車両も水膜で覆うことができるため水自体

は非常に優れた消火剤である。

しかし、高膨張泡消火装置や炭酸ガス消火装置に化学反応を緩やかにする冷却効果が期待できるのかといえば、必ずしもそうではない。冷却効果が期待できないということは固定式消火装置を起動しただけでは、化学反応を緩やかにして鎮火することが難しいことを意味する。

具体的には、高膨張泡消火装置であれば泡はいずれ消滅することになり、窒息効果がなくなって再発火に至る可能性がある。そして、炭酸ガス消火装置の炭酸ガスはそれ自身に冷却効果はない。また、区画に隙間があると炭酸ガスは外部へ漏れ、区画内の酸素濃度が上昇することにより再発火に至る。

つまり、固定式消火装置でも達成できることとできないことを理解し、それらを補うような対策を検討することが必要である。例えば、炭酸ガス消火装置であれば、冷却効果を補うために炭酸ガス放出後に、炭酸ガス放出ノズルから散水するという方法が考えられる。

また、火災が長引くという観点から固定式消火装置の消火剤の投入可能回数も重要な要素である。高膨張泡消火装置であれば、保護区画を泡で満たすのに必要な量の5倍の泡原液を保持しているため区画へ泡を再投入することが可能である。しかしながら、炭酸ガス消火装置であれば区画に対し1回分の放出量しかないため、再発火した場合のリスクは高膨張泡消火装置と比べて高い。

水系消火装置は海水を利用するため消火剤がなくなるということはないが、水系消火装置を自動車運搬船に搭載することは給水ポンプの配置やノズルの配置、コスト面を考慮すると非常にハードルが高いものとなっている。

3.2.8 固定式消火装置の作動信頼性の向上

固定式消火装置は前述の通り全体消火装置とも呼ばれ区画全体を消火剤で埋め火災を鎮火もしくは抑制する効果を期待するものである。火災発見段階もしくは初期消火段階を経て火災を抑制できなくなった際に起動するものであり、最後の砦であるといっても過言ではない。それほどまでに大切な消火装置がいざという時に起動できないのでは退船を余儀なくされてしまう。

高膨張泡消火装置は、高膨張泡を保護区画へ放出するために非常に多くの機器やセンサーを使用していることからそれら機器の保守及び管理は非常に重要である。センサー類については例えば二重化し、一方が故障した際でも起動シーケンスがスムーズに進むようにするなどの措置を講じることが重要である。

また、炭酸ガス消火装置であれば、放出弁を開放すればタンク内の自圧で放出されるため、作動信頼性は高膨張泡消火装置と比べ高いと考えられる。

搭載している固定式消火装置の種類に応じて構成要素が異なっているため、それぞれの装置に対して起動のためのシーケンスを理解すること、消火剤を区画に放出するためにどのセンサーや機器がキーコンポーネントとなっているのかを把握し強化することも有効な対策の一つである。

3.2.9 その他

自動車運搬船の火災対策措置として、船舶設備の観点から様々なことを解説してきたが、火災発生リスクの高い車両をそもそも積載しないといったことも考えられる。中古車両のリチウムイオン電池がどの程度劣化していて、危険な状態であるかを判定する指標というものは現時点ではないが、今後バッテリー診断技術が向上すれば、車両積載前に火災発生リスクの高い車両を排除することが可能となる。

もう一つの問題は、電気自動車とガソリン車の区別がつかないことである。実際に火災を起こしている車両を目撃したとしても、それが電気自動車なのか否かが分からなければ適切な対処はできない。例えば、Stowage planに電気自動車はどこに配置しているのかを明記する、ラベル等で車両に表示するなどの措置を講じることが有効であると考えられる。

3.2.10 消火戦術の構築

いままで説明してきた火災の特徴やその注意点、対処方針を参考にし、電気自動車火災発生時の対処方針について消火戦術としてまとめておくことが大切である。

実際に火災が発生した場合、その場でいろいろなことを考えて行動することは非常に難しいため消火戦術として図11に示すように流れをまとめ、それらを乗組員に周知しておくことが大切であり、日ごろの訓練で体に覚え込ませておくことが大切である。

電気自動車火災であれば、バッテリーから出火し

ていない発熱のみの段階、単一車両から火災が発生している段階、複数車両から火災が発生している段階に分け、それぞれの段階に応じた対処方針を整理することが大切である。

3.2.11 ノーテーションについて

本会が2023年8月に公表した電気自動車安全輸送ガイドラインに基づき、船舶に講じられた火災安全措置に応じて表3に示すようなノーテーションを船級符号に付記することができる。本ガイドラインでは具体的な設備要件を規定しておらず、どのような対策を講じるのかを提案してもらうものとしている。その理由は2つある。

1つ目は、火災安全措置をどのような目的で、どのような効果を期待してその機器を設置するのかを理解しておくことこそが一番重要であり、それができていないといざという時に最大限の効果が発揮できない可能性があるためである。各社がそれらを検討することで、目的や重要性を一番理解することができ、自動車運搬船の火災被害低減に繋がると考えている。

2つ目は、電気自動車火災に対して有効となる技術は世の中に幅広くあり、また、今後開発される技術も期待できるためである。そのため、本会としては、これら技術の使用に制限を設けることなく、さらに海事業界から他業界に伝達することで、火災対策として必要な技術は何であるかを伝えることがで

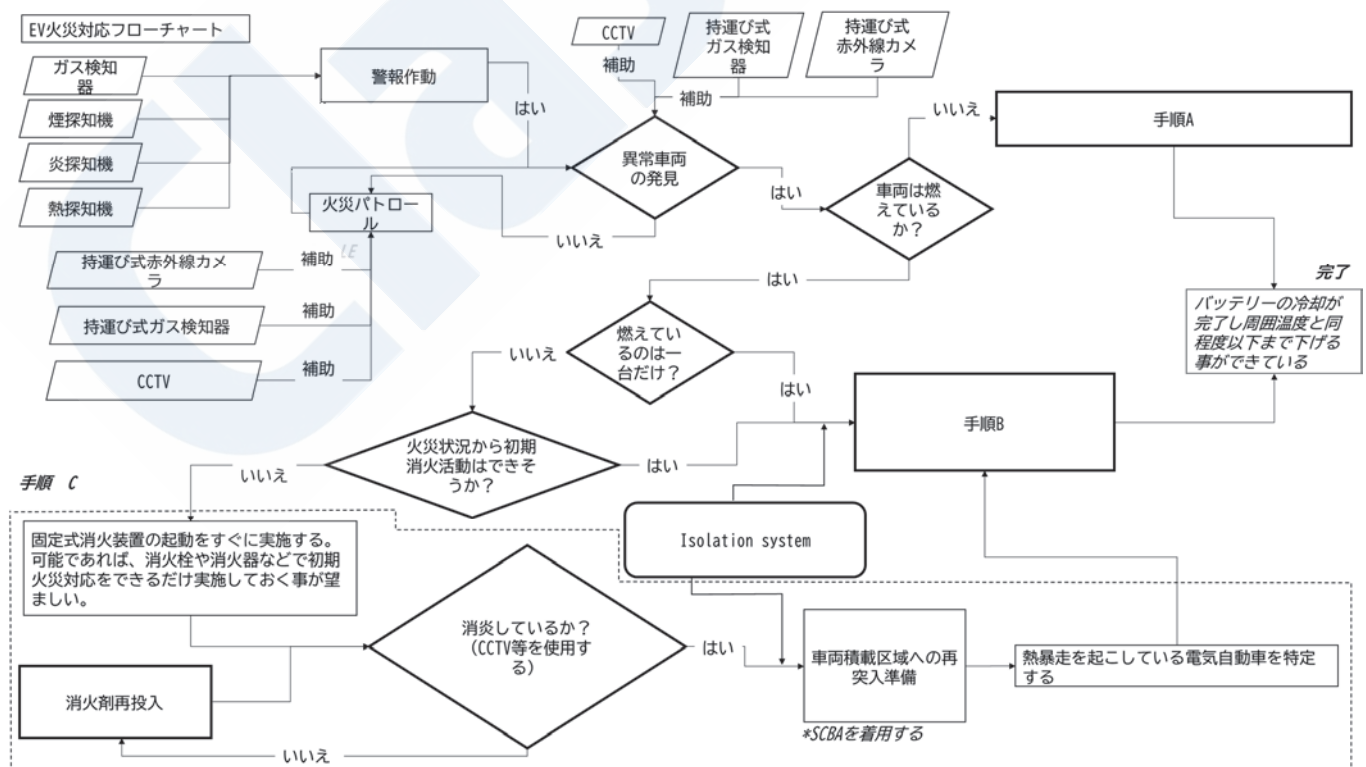


図11 消火戦術フローチャート（イメージ）

表3 追加火災対策の付記符号

付記符号	詳細
AFVC(FD)(EV)	Additional Fire-fighting Measures for Vehicle Carrier (Fire Detection)(Electric Vehicle) バッテリーに異常のある車両は火災発見に寄与する対策を講じた船舶に付記する
AFVC(PS)(EV)	Additional Fire-fighting Measures for Vehicle Carrier (Prevention of Secondary Fire)(Electric Vehicle) バッテリー火災に伴い発生した可燃性ガスに伴う二次災害発生の防止に関する対策を講じた船舶に付記する
AFVC(PFS)(EV)	Additional Fire-fighting Measures for Vehicle Carrier (Prevention of Fire Spread)(Electric Vehicle) 単一火災車両からの火災の延焼に対する対策を講じた船舶に付記する
AFVC(FF)(EV)	Additional Fire-fighting Measures for Vehicle Carrier (Fire Fighting)(Electric Vehicle) 電気自動車火災の消火・鎮火に関する対策を講じた船舶に付記する
AFVC(EFF)(EV)	Additional Fire-fighting Measures for Vehicle Carrier (Enhanced Fixed Fire-extinguishing system)(Electric Vehicle) 固定式消火装置の能力強化や作動信頼性を向上される対策を講じた船舶に付記する

きると考えている。

ガイドラインの発行を通じて、非常に優れた技術が出てくることを期待するとともに、各社の火災安全措置の検討が加速することを願うところである。

4. 今後の展望や課題

本会では継続して自動車運搬船の火災安全措置の検討を進めている。ガイドライン公表後に本会へ頂いた意見を踏まえガイドラインをブラッシュアップする予定である。さらに、ガイドライン発行までに調査が及ばなかった業界の技術についての調査も継続し、船舶に応用することで火災安全措置の効果が期待できるものがないかを調査しアップデートしていく予定である。

加えて、本会では火災時における脱出に関する検討も進めている。自動車運搬船で前述のような火災安全措置を講じていたとしても、最終的に退船を余儀なくされる状況もありうると考える。まずは、リスクアセスメントで退船時にどのようなリスクがあるのかを洗い出し、そのようなリスクに対して船員が安全に救命艇までたどり着き、脱出できるような対策を検討しガイドラインに反映させる予定である。

5. IMOの動向と国際的な動向

現在、国際海事機関（IMO）では、電気自動車を含む新燃料自動車の輸送時の火災安全措置の規則改正に関して、2027年完了を目途に第10回船舶設備小委員会（SSE10）より議論を開始している。今後、新燃料自動車の火災特性、各国で実施されている実験結果や有識者の意見等を集約して国際条約として要求する設備を検討する予定である。

日本の船主は運航隻数を見ても数多くの自動車運搬船を運航していることから、電気自動車を輸送する上で安全でかつコストエフェクティブな対策を日本からIMOへ積極的に提案していき、これら対策がグローバルスタンダードとなるように努めていく必要があると考えている。

また、国内の自動車業界とも積極的に意見交換を行い、日本全体として本件に対処していく必要がある。

6. おわりに

電気自動車の火災時の特徴や注意点、そしてそれらを踏まえた火災安全措置について解説してきた。火災時の被害を低減するためにとられた火災安全措置は、検討したその人がその効果を最大限に発揮できる利用方法を熟知している。その設備が設置されている意図や目的を誰もが理解しておくことこそが火災事故を低減させるために一番必要なことである。一旦、国際条約や本会鋼船規則で設備要件として規定されてしまうと、その設備が要求されている技術的背景の理解が薄れてしまい、本来発揮すべき最大限の効果を発揮できない可能性もある。海事産業にかかわる人が長い時間検討を重ねて構築した火災安全措置が宝のもち腐れにならないよう、本会では火災事故低減に向け継続的に取り組み、ステークホルダーに火災時に有効な手段や対処指針などの情報をタイムリーに提供していきたいと考えている。

また、各社が独自に取り組まれている自動車運搬船の火災安全措置を踏まえて、最も効果的で合理的な火災安全措置がグローバルスタンダードとなるように尽力していきたいと考えている。

謝辞

本稿やガイドラインをまとめるにあたり様々な業界の方々のご意見を頂き、また様々な文献を参考とさせていただいた。この場を借りて御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Global EV Outlook 2022, issued by IEA(International Energy Agency)
- 2) Motor fan illustrated vol.192 電気自動車の正体, 株式会社三栄
- 3) 火災便覧 第四版, 共立出版株式会社
- 4) 向井 孝志, 境 哲男, 柳田 昌宏「リチウムイオン電池の熱暴走メカニズムと高安全性技術」, 一般社団法人表面技術協会 表面技術 第70巻6号 小特集 製品の品質と安全性を支える信頼性評価試験 p.301-307
- 5) Austin R. Bird, Erik J. Archibald, Kevin C. Marr, Ofodike A. Ezekoye, “Explosion Hazards from Lithium-Ion Battery Vent Gas”
- 6) 薦島 真一：リチウムイオン電池の安全性と要素技術, 科学情報出版株式会社
- 7) E.H. Bolander, J.T. Hughes, T.A. Toomey, H.W. Carhart, J.T. Leonard, “Use of Seawater for Fighting Electrical Fires”
- 8) “Marine Fire fighting”, issued by IFSTA
- 9) “Marine Fire fighting for land based fire fighter”, issued by IFSTA
- 10) Ola Willstrand, Roeland Bisschop, Per Blomqvist, Alastair Temple, Johan Anderson RISE Research Institutes of Sweden, Division Safety & Transport Borås, Sweden “Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles”
- 11) Theory of Fire Tactics, 消火戦術理論, イカロス出版株式会社

自動車運搬船の高膨張泡消火設備

太田 進*

1. はじめに

ある種の消火設備である種の火災が消えるか否かと聞かれれば、「消えたり消えなかったりする」としか答えようがない。なぜなら、火災とは制御されていない燃焼であるため、その性状は千差万別であり「同じ火災」というものは存在し得ないからである。そのため消火設備の性能は、実際の火災ではなく、再現性を有する「試験火災」を消火できるか否かで評価することになる。一方で、自動車運搬船の貨物区域を想定した試験火災は、国際的には規定されていない。

電気自動車の火災の性状については、本特集の「電気自動車海上安全輸送について—電気自動車の火災の特徴と対応指針について—」で言及されているが、高膨張泡消火設備の有効性という観点では、自動車の火災と電気自動車の火災を分けて論じるほど、詳細は分かっていない。そのため以下では、電気自動車の火災に特化せず、自動車運搬船の貨物区域における火災に対する高膨張泡消火設備の有効性について、現時点で得られている情報を記載する。

近年、高膨張泡消火設備が搭載された自動車運搬船の貨物区域の火災において消火に奏功しなかった例が複数報告されている。出火燃焼物が自動車か否か、高膨張泡消火設備が起動されたのか否かを含め、その詳細は不明であるが、こうした事故を契機として、一般財団法人日本船舶技術研究協会（以下「本会」と呼ぶ。）は、これら事故のうち2019年に発生した二件を踏まえ、国内関係者を構成メンバーとする「自動車運搬船の火災事故再発防止検討会」を設置し、当該事故船の構造・仕様や実際の事故情報等を踏まえた上で安全対策の検討を進め、同様の事故の再発防止のため、具体的な安全対策として「固定式泡消火装置の効果的な使用のための改善策」を2021年3月にとりまとめた。その結果は、国土交通省安全政策課の通達¹⁾に反映されている。また、高膨張泡消火設備のメーカーである株式会社カシワテック（以下、「カシワテック」と呼ぶ。）は、日本海事協会等の補助の下、実験的な研究を実施し、設備の有効性を確認しているところである。さらにこ

れらの事故においては、速やかに貨物区域に消火用の泡が供給されていなかった可能性もある。そのため本会は、高膨張泡消火設備の信頼性向上のため「高膨張泡消火設備の作動の信頼性向上に係る検討会」を設置し、保守・点検マニュアルの改善を図った。以下では、これら研究の概要を紹介する。

2. 自動車運搬船の貨物区域における高膨張泡消火設備

2.1 固定式消火設備と防火構造

近年日本で建造された多くの自動車運搬船（Pure Car and Track Carrier：PCTC）の貨物区域（車両甲板）は高膨張泡消火設備で保護されている。ここでは、自動車運搬船として貨物船のみを想定し、いわゆるRo-Ro旅客船については論じない。また、一般に自動車運搬船は、暴露甲板上には貨物区域を有しないので、以下では、閉囲された貨物区域のみについて論じる。

以前のSOLAS条約附属書第II-2章では、自動車運搬船の貨物区域（貨物船のro-ro貨物区域）には、固定式ガス消火設備が要求されていたが²⁾、2002年7月1日に発効したSOLAS条約附属書第II-2章の全面改正³⁾により、固定式ガス消火設備に代えて高膨張泡消火設備を用いることが認められた⁴⁾。この条約改正の際には、併せて国際火災安全設備（FSS）コード⁵⁾が採択され、その後2014年7月1日発効のSOLAS条約附属書改正（第II-2章の改正を含む）⁶⁾により、自動車運搬船の貨物区域はFSSコードを満足する固定式のガス消火設備、高膨張泡消火設備または水系消火設備で保護すべきことが明記された⁷⁾。

自動車運搬船の貨物区域で用いられる固定式ガス消火設備は炭酸ガス消火設備であり、炭酸ガスの量としては、保護する最大の区画の45%の体積が要求される。そのため、保護する貨物区域が広大になり過ぎると、備え付けるべき炭酸ガスが現実的な量ではなくなるため、貨物区域を複数の防火区画に区切る必要が生じる。図1は、炭酸ガス消火設備を用いた船の貨物区域の防火構造の例であり、図中のA～Gが防火区画である。この例では、3～4層に1層

* 一般財団法人日本船舶技術研究協会審議役

の甲板を気密にした上で、船の中央付近に閉鎖できる開口部を有する隔壁が設けられている。甲板を気密にするには、ラッシングホールも気密にする必要がある点に留意されたい。

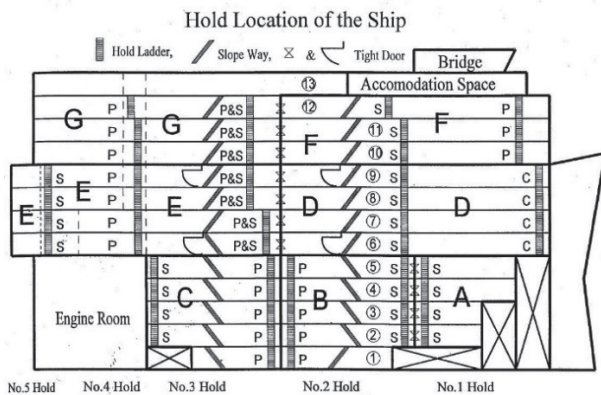


図1 自動車船貨物区域の防火区画化の例

以前はこうした防火区画を構成するための仕切りにはA-0（エーゼロ）級が要求されていた。即ち、鋼構造であれば、特段の防熱措置は要求されていなかった。しかし、前述の2014年発効のSOLAS条約改正により、こうした防火仕切りにはA-30級の防熱が要求されることになった。即ち、鋼構造であっても、水密扉を除いては、断熱材の施工が要求されることになった。そのため今後も、自動車運搬船の貨物区域における固定式消火設備としては、高膨張泡消火設備が多く採用されると考えられる。

2.2 高膨張泡消火設備に要求される性能

SOLAS条約附属書第II-2章が全面改訂された際のFSSコード⁵⁾には、自動車運搬船の貨物区域の消火設備としてではないが、泡消火設備も規定されている。泡（原液）の性状に係る要件を除けば、主要な要求性能は以下の通りである。

- 泡を積み上げる速さ（積泡速度）は毎分1 m以上
- 最大の区画を5回泡で満たせること

なお、固定式ガス消火設備に代わる設備に関するガイドライン⁸⁾も脚注引用されていたが、このガイドラインは、高膨張泡消火設備については、特段の言及はなかった。

2014年発効のSOLAS条約改正に先立って、FSSコード第6章（泡消火設備）が改正された⁹⁾。この改正により、高膨張泡消火設備の性能としては、基本的には保護する最大の区画を10分以内に泡で満たすことが要求されるようになった。また、コードの脚注にあるガイドライン¹⁰⁾では、火災試験も規定されており、例えば、発熱率が5.8MW±0.6MWの油噴霧火災と、油を入れた4m²と3m²の二段のトレ

イの火災を同時に消火する試験が規定されている。

2.3 高膨張泡消火設備の種類

2.3.1 FSSコードに記載されている方式

FSSコード第6章は、発泡方式と発泡器の設置場所の違いにより、表1に示す3種類について規定している^{11) 12)}。

表1 高膨張泡消火装置の種類

発泡方式	発泡器設置場所	FSS第6章の 関係する節
インサイドエアー	保護区画内	3.2
アウトサイドエアー	保護区画外	3.3
	保護区画内	3.5

2.3.2 インサイドエアー方式

図2に示す通り、発泡器に水と消火液を混合した泡溶液を供給し、ノズルから発泡ネットに泡溶液を放射することで周辺の空気を同伴し発泡させる設備である。発泡器を保護する区画内に設置し、区画内の空気を使って発泡することからインサイドエアー方式と呼ばれている。船舶においては機関室や貨物燃料油室で用いられている。

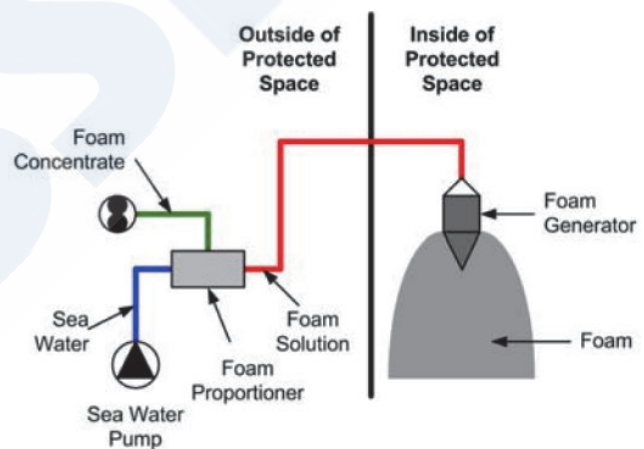


図2 インサイドエアー方式

2.3.3 アウトサイドエアー方式（発泡器：保護区画外）

図3に示す通り、機械送風機を使って消火区画の外の空気を発泡器に供給することで発泡するものであって、発泡器を保護する区画の外に設置する設備である。発泡器で生成した泡は、泡移送用の専用ダクトを通じて保護する区画内に供給される。ダクトが長くなると、ダクト内壁との摩擦によって高膨張泡がつぶれてしまうため、ダクトを長くすることができず、昨今の大型化が進んだPCTCでは効率的ではない方式であり採用されていない。

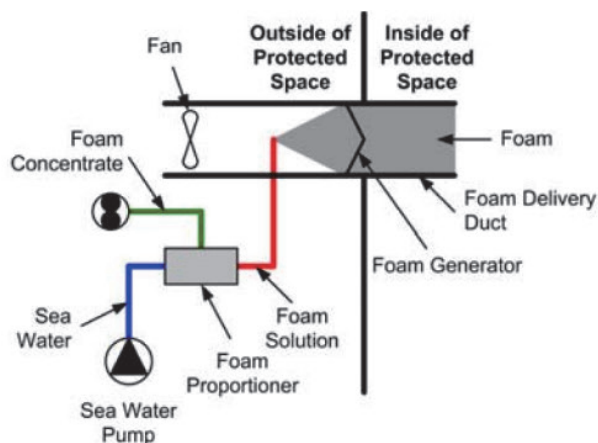


図3 アウトサイドエアー方式（発泡器：区画外）

2.3.4 アウトサイドエアー方式（発泡器：保護区画内）

前述の方式と同様に機械送風機で保護する区画外の空気を発泡器に供給して発泡する原理のシステムであるが、図4に示す通り、発泡器を保護する区画内に設置する点が異なっている。一般にPCTCに採用されているのはこの方式である。機械送風機から発泡器までを繋ぐダクトに空気が流れ、発泡器は消火区画内で泡を生成することから、大型の船舶においても泡の損失が少ない。

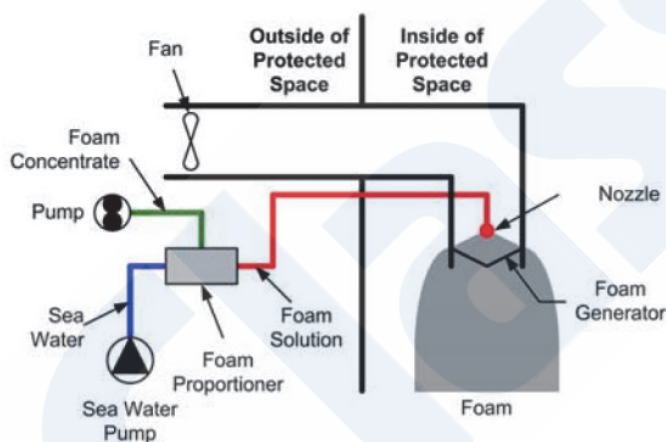


図4 アウトサイドエアー方式（発泡器：区画内）

2.4 固定式消火設備と火災時の対応

消火活動の成否は、火災発生から消火開始までの時間にも関係するため、消火設備は、可能な限り素早く起動すべきである。

火災が発生した際の対応の順序はFIREで表されることがある。即ち、まずは発見（Find）し、次に通知を含め周囲に知らせ（Inform）、火災を抑制し（Restrict）、消火に当たる（Extinguish）のが正しい手順であるとされている。このうちRestrictのためには、通風の遮断が行われる。船舶の乗組員も火災の際には通風を停止し、開口部を閉鎖するよ

うに訓練されている。これに対して、自動車運搬船の貨物区域で高膨張泡消火設備を用いるには、所定の通風ダクト（空気抜きを含む）を開ける必要がある。火災の際に一度通風ダクトを閉めて、初期消火が奏功せず、高膨張泡消火設備を使う段階になって、改めて通風ダクトを開けるという手順では、設備を起動させるまでに時間を要する。そのため、高膨張泡消火設備で保護されている区画については、通風遮断の手順を省くことが推奨される。前述の国土交通省安全政策課の通達¹⁾の中でも、高膨張泡消火設備の起動までの時間を短縮するため、通風筒の蓋の閉鎖を省略すること（常時開放または自動起動化）が推奨されている。

3. 高膨張泡消火設備の作動の信頼性向上に係る検討

既存の高膨張泡消火設備のうち、自動化の程度が高くないものでは、発泡までに以下のうち・で示す手順が必要とされる。

- ・ 船員による火災発生場所と火災規模の確認
- ・ 泡を放出する区画の全ての換気設備の開放を確認
- ・ 「制御盤」（主制御盤または副制御盤）で「システムスタンバイボタン」を押す
 - 自動的に「泡放出警報」が対象区画で鳴り「換気ファン」が停止
- ・ 「制御盤」上で「水圧ランプ」と「泡原液圧力ランプ」の点滅及び主発電機の動作ランプの点灯を確認
- ・ 「泡消火ポンプ」の作動ボタンを押す
- ・ その作動ランプ（緑色）の点灯を確認
- ・ 水圧が上がり「水圧正常」のランプが点灯したことを確認
 - 自動的に「水供給弁」など各種バルブの開放を示すランプも点灯
 - 「泡原液圧力正常」のランプが点灯
 - 「泡放出可能」のランプが点滅
- ・ 泡放出区域に人がいないことの確認
- ・ 「泡放出ボタン」を押す
 - 「泡放出」ランプが点灯
 - 「泡放出弁」が自動的に開放され、「泡放出弁開放」のランプが点灯
 - 各甲板の「泡発生装置」付近の「泡ダンパー」の通風側開口が自動閉鎖され、空気が「泡発生装置」に届く道ができて「泡ダンパー開放ランプ」が点灯
 - 自動で「空気供給ファン作動ランプ」が点灯

⇒ ここまでの手順を経て「泡の放出」開始

- (・ 火災消火の確認後は「停止ボタン」を押す)
- (・ 泡があふれていることを確認(トップデッキの開口から泡があふれていることを目視)し泡放出を停止⇒必要があれば再稼働)

こうした複雑な手順は、スイッチ一つでも故障していれば正しく実施することはできない。近年ではもっと自動化の進んだ設備が主流になりつつあるが、自動化が進んだとしても、個々の部品等の不具合があれば、設備が有効に機能しないことはこれまでの装置と同様である。また、船倉の換気と泡の放出を切り替えるための泡ダンパーは、整備が悪いと、固着してうまく作動しないおそれがあり、且つ、整備も容易ではないので、注意が必要と考えられている。なお、近年では、この泡ダンパーを省いた設備もある。高膨張泡消火設備は、設備の作動に起因する貨物へのダメージを防止するため、最初は清水を用いて発泡させ、その後、海水による発泡に切り替えるものが一般的であったが、信頼性の観点から、最初から海水で発泡させることを検討している船会社もある。いずれにせよ整備は重要であり、乗組員に分かり易いマニュアルの整備も必要であることから、本会は2023年度に調査研究を実施し、保守・点検計画を策定するためのガイドライン(近日公開)を策定した。

4. 自動車一台の火災を想定した消火・抑制実験

4.1 電気自動車火災の消火・抑制実験

カシワテックは、日本海事協会及び船会社の協力の下、2022年10月28日に日本自動車研究所において、リチウムイオン電池(ラミネート型、24kWh)を搭載した電気自動車(BEV)を用いて外気式高膨張泡消火設備による消火実験を実施した^{12) 13) 14)}。全体のセットアップを図5に示す。BEVは泡を通さない網で覆い、横から泡を供給した(図6参照)。最初に一定程度の火勢になるまでBEVを燃焼させ(図7参照)、その後に発泡倍率900倍の泡を積泡速度が毎分1mになる率で供給した(図8参照)。この条件下においてBEVの燃焼は消し止められた(図9参照)。

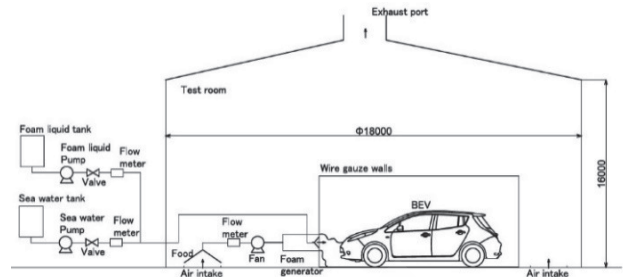


図5 試験のセットアップ (全体)

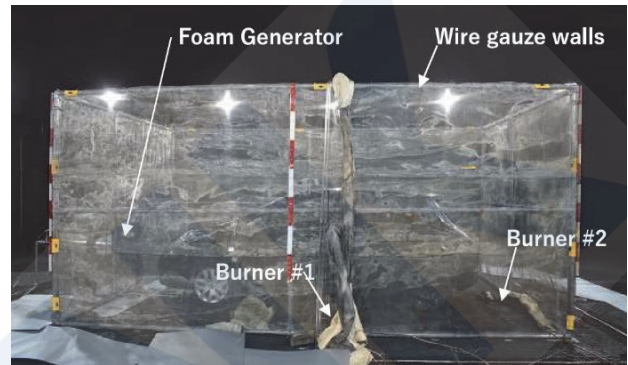


図6 自動車を網で覆った様子

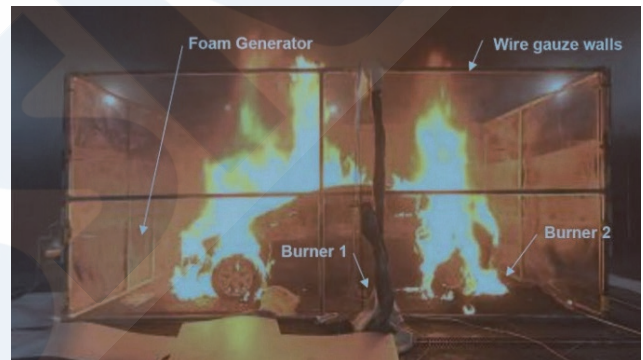


図7 火勢期の様子 (消火設備作動前)



図8 自動車が泡に覆われていく様子



図9 消火後網を取り外したところ

4.2 車両を模擬した試験火災による消火・抑制実験

カシワテックはさらに、試験火災（1台）を用いた消火・抑制実験を実施した¹⁵⁾。各種消火剤の消火・抑制限界は、木材クリブなどの定型火源では、消火剤の供給速度と消火に要した時間の関係（以下、限界供給曲線）で評価されてきた。これに倣って、この実験では、積泡速度を変えて消火までに要する時間を計測し、限界供給曲線を作成した。

試験火災は、自動車を模擬したモックアップで覆った1～3台のトレイ（1.2m²の矩形）にノルマルヘプタンを入れて燃焼させるもので、モックアップは、試験火災としての発熱率を確保するため、空気は通すが消火用の泡は通さないパンチングメタルを用いて製作した（図10参照）。消火を行わずに発熱率を計測したところ、トレイが1台、2台及び3台の場合の平均値は、それぞれ2.7MW、4.5MW及び6.3MWであった。

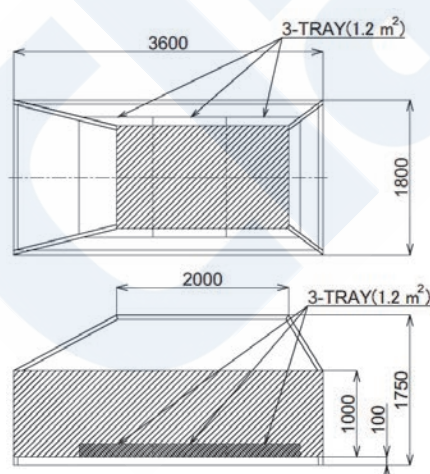


図10 試験火災用車両モックアップ
（天井は鋼板、側面と床面はパンチングメタル）

実験では、トレイの燃料に着火し1分間予備燃焼させた後に泡の供給を開始した。泡を供給し車両模型の前方に泡が積み上がっていくと、車両模型後方

から前方への燃焼空気の流れが形成され、真上に立ち上がっていた炎はフロントガラスを模した開口部分から噴き出すように変化した。車両模型前方に積み上がった泡はフロントガラス開口高さまで到達するとフロントガラス開口から噴き出す熱流に吹き飛ばされる状態となった。泡の供給速度がこの熱流に勝り車両模型の内部に泡が流れ込んでいくとトレイ油面を泡が覆い消火・抑制が奏功した。泡の供給速度が熱流に負けて車両内部に入り込めない平衡状態が数分間続いた場合は消火できないと判断した。発泡倍率が900倍の泡の限界供給曲線を図11に示す。

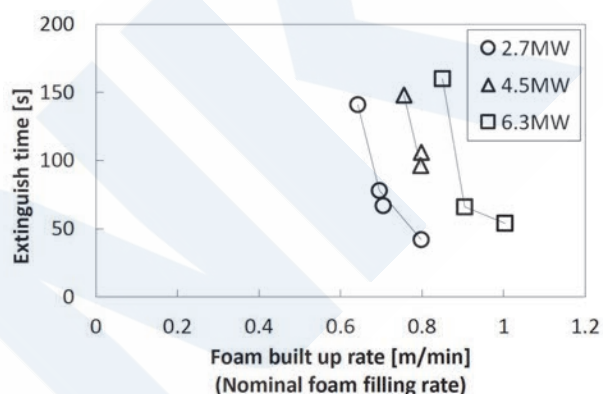


図11 高膨張泡の限界供給曲線

発泡倍率900倍の泡の車両1台規模の火災（4MW）の消火・抑制に必要な積泡速度は図より0.72m/min程度と推定された。実際の船舶の設備は最低1m/minの積泡速度で設計されていることから一定程度の余裕はあるが、この発泡率（積泡速度）で、泡が貨物区域内を流動展伸していく中での消失を補えるか否かの検証は、今後の課題であるとされた。

5. 複数台の自動車を想定した試験火災による消火・抑制実験の計画

カシワテックは日本海事協会の協力の下、複数台の試験火災及びモックアップを用いた消火・抑制実験を行う予定である。セットアップの案を図12に示す。この実験により、より実際に近い条件下での高膨張泡消火設備の有効性が評価できると考えている。

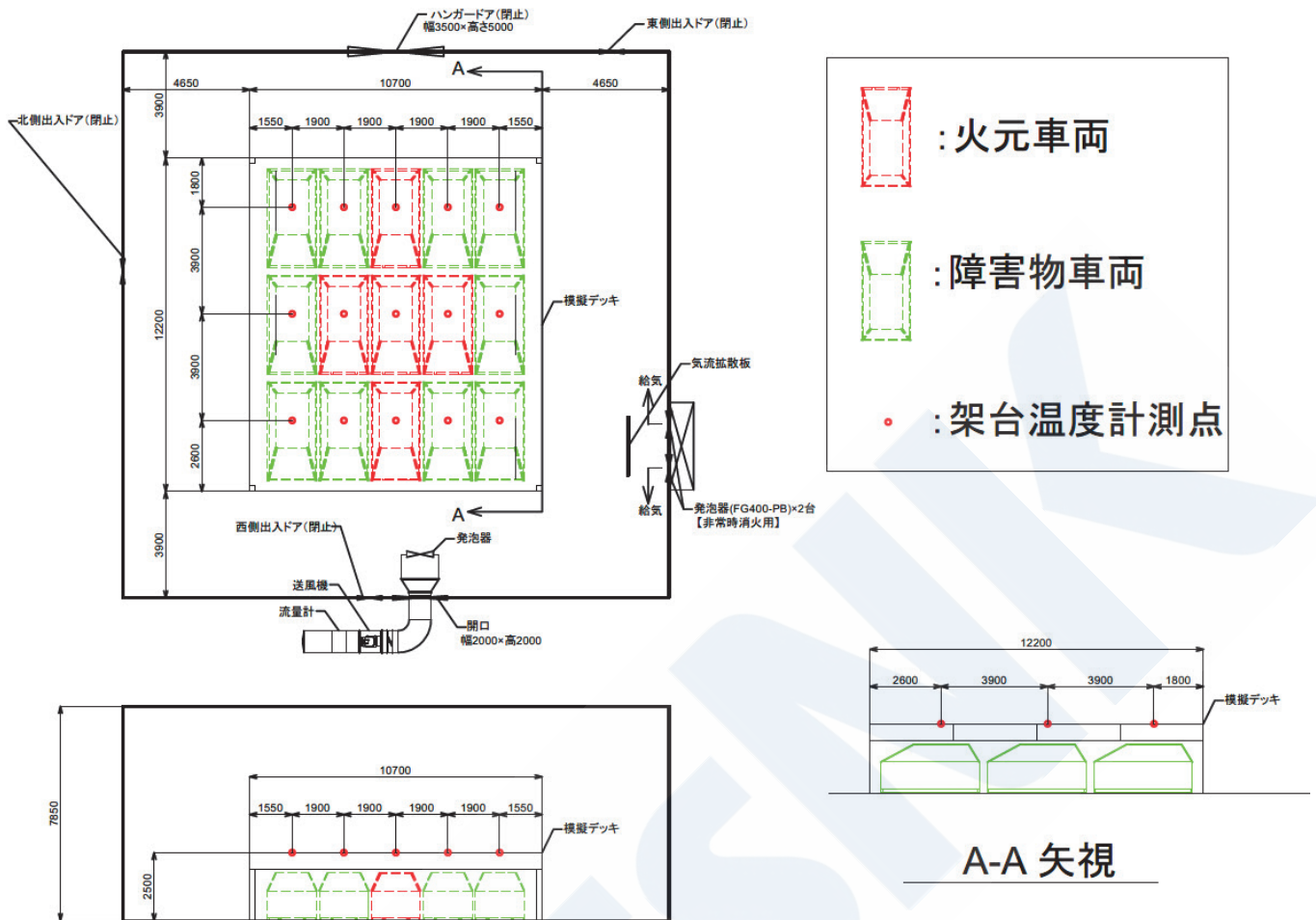


図12 複数台の自動車を想定した試験火災による消火実験のセットアップ案

6. おわりに

高膨張泡消火設備による消火・抑制が奏功するか否かは、火災が発生した貨物区域に発泡するタイミングに依存する。そのため、消火・抑制の成否は、高膨張泡消火設備の単独の性能のみならず、火災探知の能力や、必要な電力の確保（発電機の起動）、通風設備の準備等を含む船舶全体の自動化の程度、さらには運用の適否にもよる。また、高膨張泡消火設備を含む各種安全装置が十分に整備され、素早く運用できる状態が維持されていなければ、消火・抑制は期待すべくもない。今後、ここに示した各種研究の成果が活用され、自動車運搬船の火災安全性が向上することを期してやまない。

参考文献

- 1) 国海安第28号（令和3年6月10日）大型自動車運搬船における火災事故発生時の被害低減に向けた改善措置について～固定式泡消火装置の効果的使用に向けて～
- 2) 旧SOLAS条約附属書第II-2章第53規則第2.2.1項
- 3) 決議MSC.99(73) "Adoption of amendments to the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, as amended", 採択：2000年12月5日，発効：2002年7月1日
- 4) 決議MSC.99(73)で改正されたSOLAS条約附属書第II-2章第20規則第6.1.1.2項
- 5) 決議MSC.98(73) "Adoption of the International Code for Fire Safety Systems", 採択：2000年12月5日，発効：2002年7月1日
- 6) 決議MSC.338(91) "Adoption of amendments to the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, as amended", 採択：2012年11月30日，発効：2014年7月1日
- 7) 決議MSC.338(91)で改正されたSOLAS条約附属書第II-2章第20規則第6.1.1項
- 8) MSC/Circ.914 "Guidelines for the approval of alternative fixed water-based fire-fighting systems for special category spaces", 承認：1999年6月4日

- 9) 決議MSC.327(90) "Adoption of amendments to the International Code for Fire Safety Systems (FSS Code)", 採択：2012年5月15日, 発効：2014年1月1日
- 10) MSC.1/Circ.1384 "Guidelines for the testing and approval of fixed high-expansion foam systems", 承認：2010年12月10日
- 11) IMO文書FP 54/3/4 by the Republic of Korea "Performance testing and approval standards for fire safety systems, High-expansion foam fire-extinguishing system using outside air with generator installed inside the protected space"
- 12) 鈴木陽介・太田垣二郎「電気自動車火災に対する高膨張泡消火装置の効果について」, 日本火災学会誌「火災」386号 (Vol. 73, No. 5, 2023) 2023年10月
- 13) IMO文書SSE 9/INF.4 by Japan "Any Other Business, Experimental test on lithium-ion-battery-powered vehicle fires with outside air high-expansion foam fire-extinguishing system"
- 14) "Experimental study on the effectiveness of outside air high-expansion foam fire-extinguishing system on fires on battery-electric vehicles powered by lithium-ion-battery", 1 FEB. 2023, Kashiwa Tech Co., Ltd. HEA-00499, URL: <https://www.kashiwa-tech.jp/doc/HEA-00499%20BEV%20Fire%20Test%20Report.pdf>
- 15) 鈴木陽介（株式会社カシワテック）「乗用車1台の火災に対する高膨張泡消火装置の抑制限界」2024年度日本火災学会研究発表会講演集（予定）

鉛直方向加振時の粒状貨物による内圧の合理的な推定方法

開発本部 技術研究所, 東京大学 生産技術研究所 桑野研究室

1. はじめに

鉄鉱粉やニッケル鉱等の粒状貨物の輸送において、波浪による外圧に加えて、船殻は船体運動に伴い生じる船体加速度に起因する貨物からの内圧を受ける。粒子間の摩擦によって、粒状貨物はせん断抵抗を有し複雑な挙動を示す。粒状貨物はコンテナ等の固体貨物とは異なり流動性を示す一方で、過去の実船計測における二重底骨部材のひずみが液体貨物とみなした場合に比べて小さくなるという構造応答の変化が示唆された¹⁾。

本会鋼船規則C編¹⁾では鉛直加振時の粒状貨物の荷重について式(1)、(2)の通り規定する(図1)。式(1)、(2)は液体貨物荷重評価式を基に、粒子と船殻内面の間の摩擦影響を考慮して定められた。過去の実船計測結果²⁾や模型試験の結果³⁻⁵⁾によって、粒子の摩擦が粒状貨物による内圧に寄与すると示唆されているものの、メカニズムや影響に関して明らかでない部分が残されていたことから、安全側に規定されている。

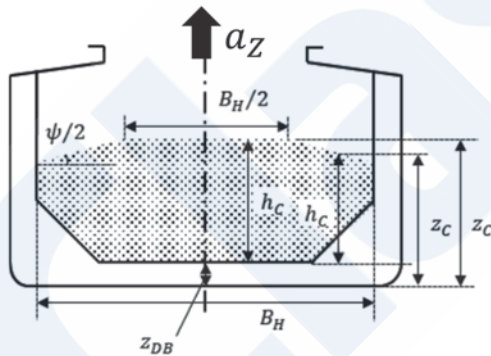


図1 ばら積貨物船¹⁾

$$P = K_c \rho_c (g + a_z) h_c \quad (1)$$

$$K_c = \cos^2 \alpha + (1 - \sin \psi) \sin^2 \alpha \quad (2)$$

P : 粒状貨物を積載する船倉内の圧力,

K_c : 静止土圧係数,

ρ_c : 粒状貨物の密度 (t/m^3),

g : 重力加速度 (m/s^2),

a_z : 鉛直方向船体加速度 (m/s^2),

h_c : 貨物積み高さ (m),

α : 考慮するパネルの水平面に対する傾斜角,

ψ : 粒状貨物の安息角

上記の背景から、本会は粒状貨物による内圧に関して研究を行ってきた。これまでの本会の研究によって、構造応答の変化が「アーチ効果⁶⁻⁸⁾」と呼ばれる荷重の再分配に起因すると示された⁹⁾。アーチ効果は土木分野において知られる現象である。

図2(a) (落とし戸試験) に示すように粒状物質を支持する領域の一部、ここでは床ブロックが降下すると粒子のアーチが形成され、アーチに沿って荷重が再分配される現象である。アーチ効果は以下の流れで生じる。はじめに床ブロックが降下すると、降下する床の上方に存在する粒子のうち、図2(b)のように、床近傍の粒子は床に追従して降下するが、床から離れた粒子は追従せずその高さに留まる。追従しない粒子は粒子同士の摩擦の作用によって支えられることで粒子アーチが形成され、その結果、アーチに沿って荷重が根元へと再分配される。

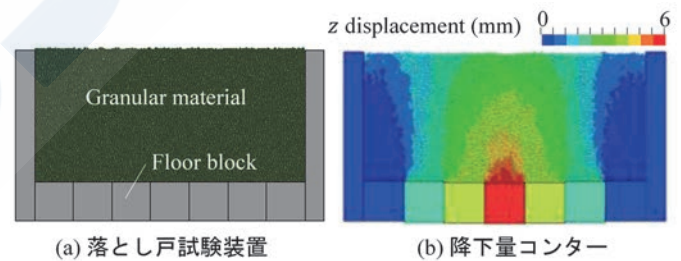


図2 落とし戸試験におけるアーチ効果

しかしながら、船舶分野におけるアーチ効果は以下の点で土木分野とは異なっており、本会は基礎的な実験的検討や数値解析による検討を進めてきた。

- ①船体の運動に伴う内底板のたわみの変化とアーチ効果による荷重再分配との相互の影響を考慮する必要がある
- ②船体運動によって繰り返し外乱を受ける
- ③無限遠の地盤中での現象ではなく、船倉内部に積載された貨物内部の現象であり、二重底や船側等の船体構造の影響を受ける

本稿では、弾性体底板を用いた揺動試験の構想、及び、試験に先立って実施した連成解析の検討について報告する。

2. アプローチ

本稿のアプローチについて、数値解析の原理及び実験的検討を概説する。

2.1 DEM-FEM連成解析

上述の通り、船倉における粒状貨物に生じるアーチ効果を検討するためには、貨物と船体が相互に及ぼす影響を考慮した連成解析を行う必要がある。本稿では貨物粒子の挙動を個別要素法（Discrete Element Method）で求めて、容器の変形を有限要素法（Finite Element Method）で解くDEM-FEM連成解析を用いた。解析には汎用ソフトウェアLS-DYNAを使用した。

個別要素法¹⁰⁾は、貨物粒子を剛体球の離散要素で表し、要素同士の接触力を外力として運動方程式を解いている。法線方向及び接線方向の接触をばね・ダンパモデルで定式化しており、要素の接触に応じたばねの縮みから接触力を算出する。接線方向はクーロン摩擦に基づいた摩擦力が作用する。

有限要素は個別要素から受ける荷重によって変形し、次のステップにおいて個別要素への接触力として伝達されることで、双方向の連成解析が実施できる。

粒子のパラメータは表1に示す値を用いた。事前に実施した解析¹¹⁾において、粒子を充填した容器を傾けたときに粒子が移動し始めた角度として計測した安息角は30.3°であった。また、三軸圧縮試験を模した解析において内部摩擦角が20.0°、粘着力が5.0 kPaであった。

表1 粒子物性値

Property	Value
Coefficient of friction between discrete elements	0.25
Coefficient of friction between discrete elements and shells	0.25
Radius of discrete elements (mm)	3.0
Young's modulus of discrete elements (MPa)	71600
Poisson's ratio of discrete elements	0.23
Density of discrete elements (t/mm ³)	7.6×10 ⁻⁹

2.2 実験的検討

2.2.1 揺動装置

東京大学生産技術研究所との共同研究として、弾性体底板を用いて鉛直揺動に対するアーチ効果を評価するための揺動実験を進めている。本稿では試験装置の構想について紹介する。十分なたわみが生じ、かつ揺動時に塑性変形の生じないように、底板はジュラルミン製厚さ1.0 mmの板を用いる。底板の

変形を阻害しないよう、圧力は受圧面が40.0 mm四方、厚さ0.45 mmの薄膜シート状のセンサを用いて、底板の変形は磁気センサを用いて計測する。

従来の土圧計測では土圧計やロードセルを用いることが多いものの、底板の変形に影響を及ぼす恐れがある。薄膜センサは軽量・薄型かつ、センサ自身も底板に合わせて変形可能なことから、本装置において適切と考える。

鉛直方向での揺動中における弾性体底板での土圧計測例が極めて少ないことから、本装置での実験に先駆けて2.2.2項に述べる落とし戸実験を行った。

2.2.2 落とし戸実験

通常、土木分野では底板の離散的な降下によるアーチ効果の検討が行われるため、船舶における内底板のたわみのような、連続的な底板の降下は検討されていない。そこで、本装置を用いた揺動試験に先立って、落とし戸試験装置を用いてアーチ効果における降下形状の影響を調査した。

落とし戸試験は東京大学生産技術研究所において実施された。本稿では概要のみ紹介するため、詳細についてはHirano et al.(2023)¹²⁾を参考にされたい。

試験装置を図3に示す。アルミ製の剛な床ブロックを底に配置し、モーター駆動によって降下させた。各ブロックの降下量は中央（図4, No.11-15）が6.0 mm、両隣（図4, No.6-10及び16-20）が4.0 mm、端（図4, No.1-5及び21-25）が2.0 mmである。ブロック下に配置するロードセルを用いて荷重を計測した。

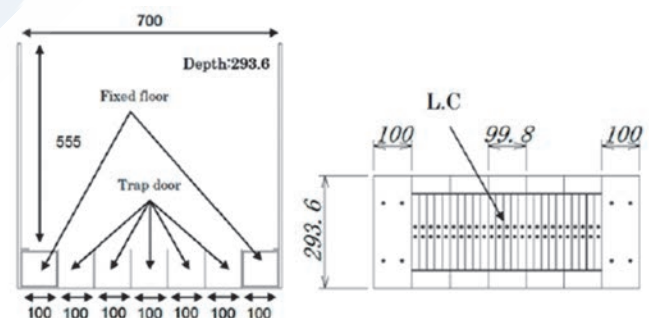


図3 落とし戸試験装置¹¹⁾



図4 落とし戸試験における荷重評価点¹¹⁾

中央ブロックの降下量に対する荷重変化の時刻歴を図5に示す。中央部はブロック降下に応じて荷重が急激に減少する。両隣のブロックでは、降下量2.0 mm前後までは荷重が増加するものの、以降は

減少に転じる。両端部の荷重は徐々に増加する。図6に示す荷重分布の通り、初期状態では位置による荷重の差が見られないが、降下後はアーチ効果が見られ、分布形状は最終状態に依ることが分かった。また、ブロックの境界付近において荷重が増加する様子が見られた。

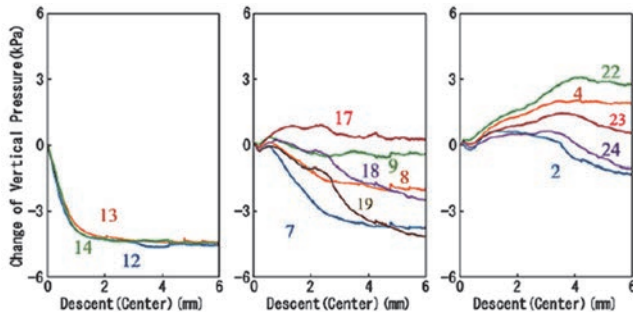


図5 落とし戸実験における荷重時刻歴 (Case C)¹²⁾

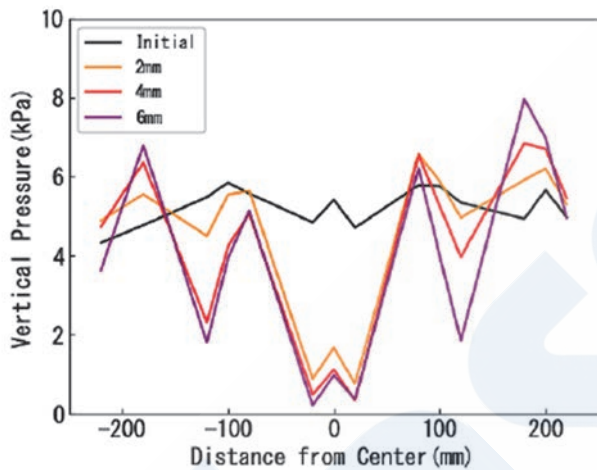


図6 落とし戸実験における荷重分布 (Case C)¹²⁾

上記の検討に加え、アーチ形成条件の因子を調査した。貨物積み高さ h_c と幅 B の関係を調査するために貨物積み高さ h_c を変更したところ、 $h_c/B \geq 0.40$ の場合にアーチが形成された。粒径が小さな場合は僅かな降下量で幅の広いアーチが形成されると示唆された。また、ロードセルと薄膜センサとの土圧の比較を行い、両者に大きな違いがないことを確認した。揺動試験を用いた動的応答の計測に関して継続的に研究を進める予定である。

3. DEM-FEM連成解析

落とし戸実験によって離散的ではあるものの内底板の変形に近い状態でのアーチ効果を確認することができた。別途実施した落とし戸試験を模したDEM解析においても、降下ブロック上にアーチが形成され、荷重が再分配することを確認している。

本章では、DEM-FEM連成解析を用いた弾性体底板におけるアーチ効果の検証結果について紹介する。

3.1 弾性体底板におけるアーチ効果

落とし戸試験装置では、剛な床ブロックを強制的に変位させた場合にアーチが形成される。一方、船舶では、船体運動に伴う貨物からの荷重によって底板の変形が生じる。このような相互影響を考慮するために、弾性体底板を有する容器を用いてDEM-FEM連成解析を行った。本稿では概説に留めるため、詳細はYanagimoto et al. (2022)⁹⁾を参考にされたい。

解析モデルを図7に示す。船倉の微小な長さを切り出した擬似二次元モデルとするため、連続の境界条件となるよう前後に剛体壁を設けた。前後壁と粒子との摩擦係数は0とした。側壁は剛体として、内底板を弾性体でモデル化した。

はじめに自重を载荷して安定させた後に、容器剛体部に鉛直上方向の加速度 a_z を付与して一方向に運動させる。 a_z は重力加速度 g の0.3倍とした。

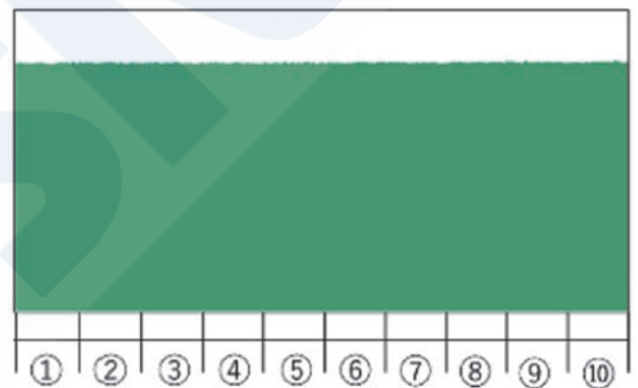


図7 底板部の荷重評価点⁹⁾

荷重分布を図8に示す。図8における荷重は、底板全体の平均圧力に対する評価領域の圧力の比として算出する。最も効果の高い場合において、アーチの内側となる容器中央（図8⑤⑥）では底板平均値の0.85倍、アーチ端部（図8①⑩）では1.2倍が作用する。

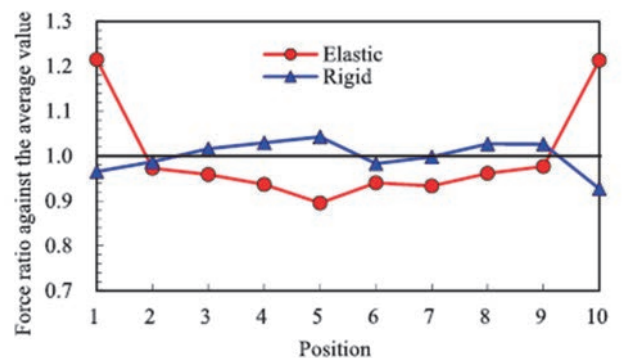


図8 底板における荷重分布⁹⁾

貨物積み高さ h_c と容器幅 B との比について、2.2.2項の落とし戸実験と近い傾向を示しており、 $h_c/B \geq 0.33$ のときにアーチが形成された。 h_c/B が小さくなる程アーチ効果が小さくなる。さらに、貨物粒子の半径が1.5, 2.0, 3.0 mmの場合に差がないこと、底板のヤング率及びポアソン比がアーチ効果に影響しないことを確認した。

3.2 底板の不均一剛性影響

落とし戸試験は剛体床ブロックによる離散的な変形に起因してアーチが形成され、固定床ブロック境界付近への荷重集中が見られた。一方で、3.1節の弾性体底板モデルでは、アーチ内側における荷重集中は見られなかった。3.1節では単純化した底板を用いていたが、実際の船体底板の変形は船倉幅全域での全体変形に加えて、ガーダー間の局部変形が重畳した複雑な形状を示すことから、本章では局部変形に起因するアーチ効果が、全体変形によるアーチ効果に及ぼす影響を調査した。

解析モデルを図9に示す。内底板に加えて、二重底及びガーダーを模した弾性体シェル要素を設けた。重力加速度 g の0.15倍まで単調に増加する a_z を付与した。粒子等の条件は3.1節と同様である。

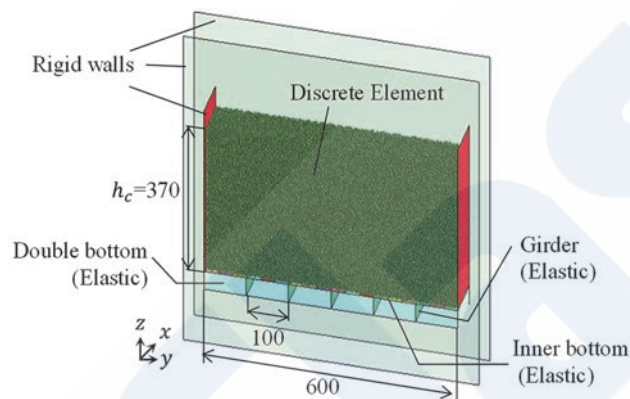


図9 ガーダー付きモデル

解析結果を以下に示す。 $a_z = 0.15g$ における応力鎖コンターを図10に示す。応力鎖 (force chain) とは、周囲の要素との接触力から求まる粒子に作用する主応力方向の力を示す可視化手法である¹³⁾。応力鎖が大きな場合、周辺粒子に対して、主応力方向の大きさと方向に連続性があることを意味する。図10から、船倉幅のスパンを有するアーチが形成され、さらに、船倉幅スパンのアーチの内側にガーダーを跨いだ小さなアーチが形成されると分かる。

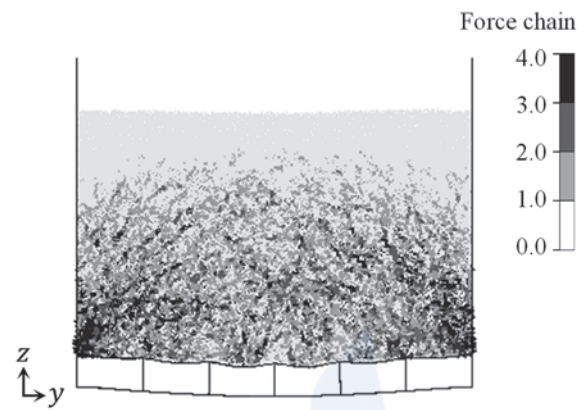


図10 Force chainコンター

図11に示す通り、全体変形と局部変形が重畳した形状のたわみが生じた。ガーダー間の中点では、動的荷重によるたわみの増加量が少なく、中点を根元とした局部アーチが形成されたものと考えられる。図12の荷重分布において、局部的なアーチの根元が位置すると考えられるガーダー間の中点では、ガーダーの真上よりも荷重が集中している。これは、応力鎖と底板のたわみに基づく推測と一致する。

さらに、図12の荷重分布において、全体アーチによる荷重分配と局部アーチによる分配の効果が重畳すると示唆される。したがって、実際の船体構造のような複雑な形状においても、アーチ効果が発生し、重畳した状態で発現すると推察される。

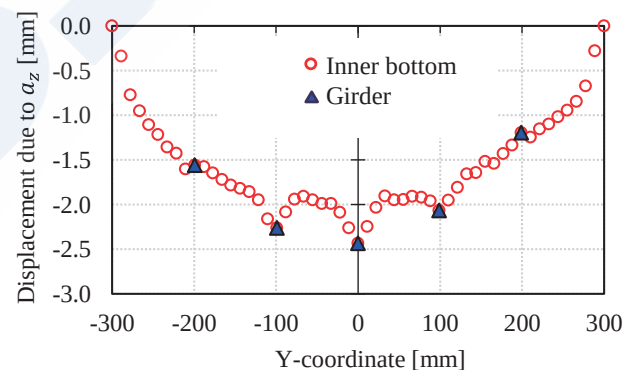


図11 鉛直方向加速度 a_z に起因するたわみの増加量

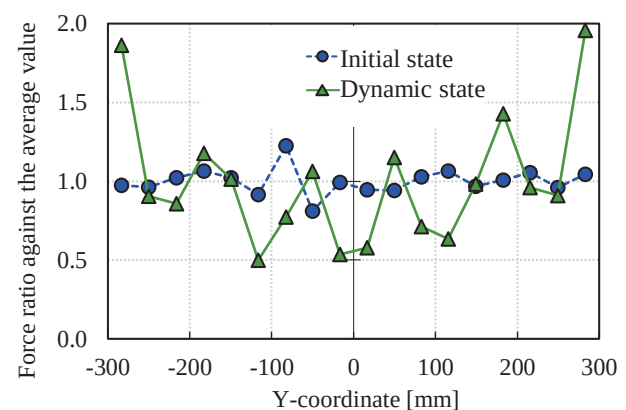


図12 荷重分布

3.3 三次元容器の底板アスペクト比影響

前節まで、微小長さを切り出した二次元的状態におけるアーチ効果の評価結果を紹介した。実際の内底板は長手方向にも変形するため、幅方向のアーチだけではなく、長手方向にもアーチが生じて荷重分配に影響を及ぼす可能性がある。そこで、図13に示す容器を用いて、板の三次元変形に起因するアーチ効果について調査した。

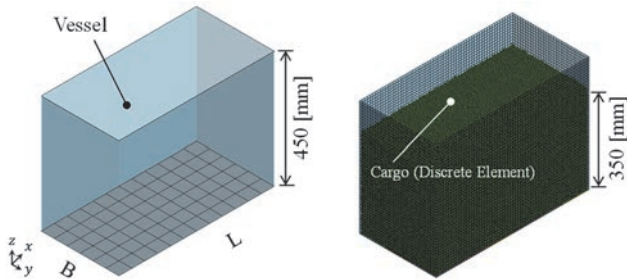


図13 三次元モデル

貨物積み高さ h_c と幅との比がアーチ形成条件並びにアーチ降下に寄与することを踏まえて、図14の通り容器底板の長さ L と幅 B との比 L/B を1.0~2.0まで変化させて、底板アスペクト比 (L/B) と荷重分布との関係性を評価する。加振は $a_z=0.3g$ まで単調に増加する一方向鉛直加速度を付与した。側壁は剛体シェル要素、底板を弾性体シェル要素でモデル化した。

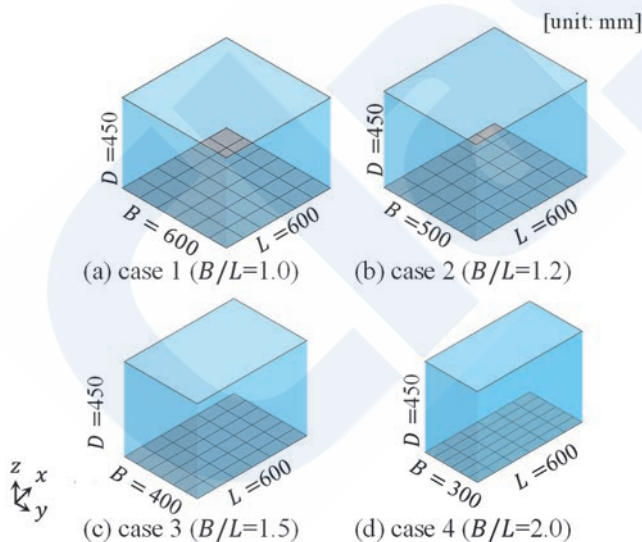


図14 各ケースのFEモデル

$a_z=0.3g$ での容器底板アスペクト比 (L/B) が異なるCase 1~4における動的荷重の分布について、容器長さ L 方向の分布を図15に、容器幅 B 方向の分布を図16に示す。尚、分布はいずれも平均値で正規化している。

図15に示す長さ方向分布では、いずれも中央の圧力は平均値よりも低くなっている。端は正方形底板のCase 1は平均よりも大きく、その他では平均に近い値を示す。

図16に示す幅方向分布において、中央は全ケースとも平均より小さく、端はいずれも平均よりも大きくなっており荷重が集中している。また、正方形底板のCase 1では幅方向と同程度であるが、その他のアスペクト比が1を超過するCase 2~4では幅方向の方が大きい荷重が作用している。さらに、アスペクト比 L/B が大きく、細長い底板になるほど、幅方向での端に荷重が集中する。

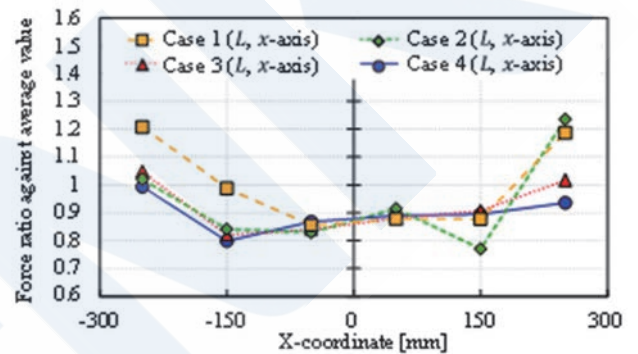


図15 容器底板アスペクト比 (L/B) が異なるCase1-4における容器長さ L 方向の荷重分布 ($a_z=0.3g$)

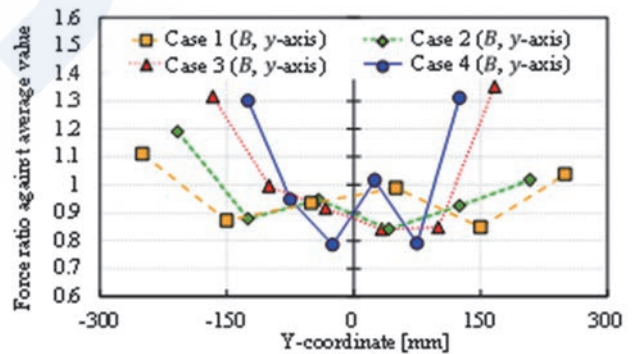


図16 容器底板アスペクト比 (L/B) が異なるCase1-4における容器幅 B 方向の荷重分布 ($a_z=0.3g$)

アスペクト比によってアーチ効果の強さが異なる原因について次のように考察する。アーチ構造の模式図を図17に示す。アーチが荷重を支持するとき、アーチの両端には鉛直反力に加えて水平反力 H が生じる^{14) 15)}。

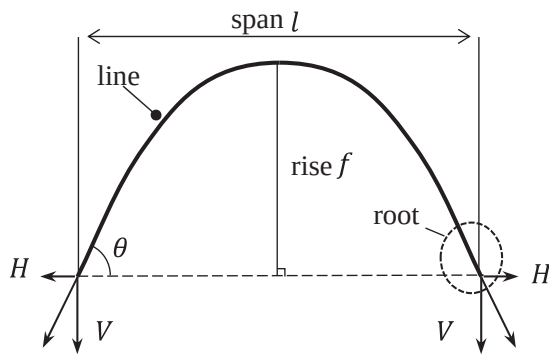


図17 アーチ構造

水平反力は側壁あるいはアーチの外側の粒子によって支持される。図18に示す領域における $a_z=0.3g$ のときの圧力 (p_L^{lateral} : 長さ方向アーチの根元の側圧, p_B^{lateral} : 幅方向アーチの根元の側圧, p_L^{vertical} : 長さ方向アーチ根元の底板圧力, p_B^{vertical} : 幅方向アーチ根元の底板圧力) を調査した結果を図19に示す。図19によると, アスペクト比に関わらず側圧は両方向で概ね等しいが, アスペクト比が大きな程短辺方向のアーチの根元に位置する荷重の方が大きい。これは, 同等の水平反力が作用する場合, アーチ高さに対してアーチ幅が小さく縦長なアーチの方が鉛直反力を大きく取ることになるためと思われる。この傾向は, 先行研究の落とし戸模型を用いた実験⁸⁾において, 同じ h_c の場合は容器幅が小さなケースの方がよりアーチ効果が強いとの結果と同様の傾向であるといえる。

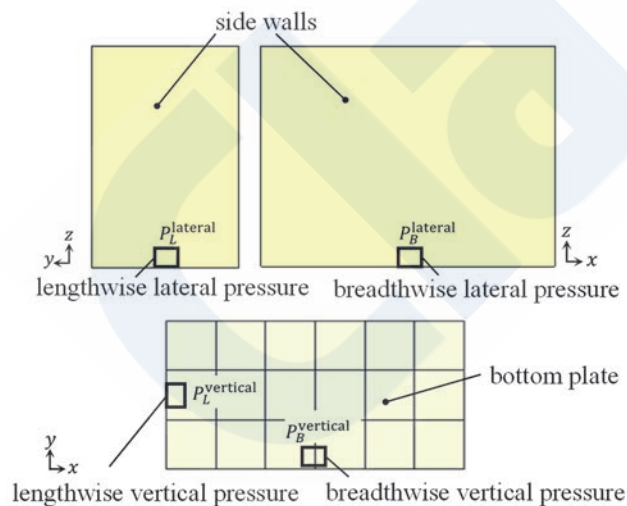
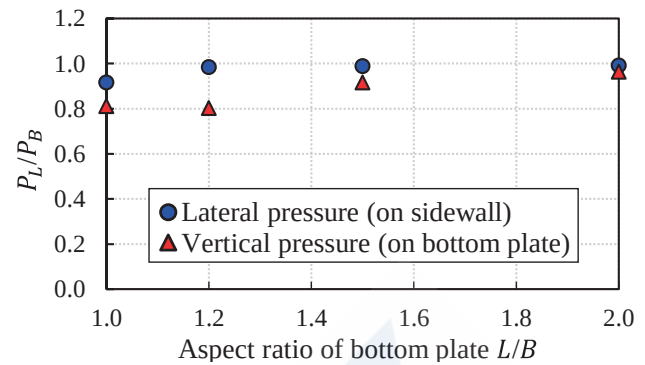


図18 側壁及び底板における荷重の計測領域

図19 短辺及び長辺方向の荷重の比と
底板アスペクト比との関係性

4. まとめと今後の展望

粒状貨物は, 同じ船体鉛直方向加速度を受けたときの液体貨物による荷重に対して小さな荷重を生じることが指摘されていたものの, そのメカニズムについては明らかになっておらず, 本会は研究を進めてきた。

文献調査や先行研究の分析の結果から, 上記の液体貨物との相違はアーチ効果に起因するものと考えた。そこで, 貨物粒子と底板の運動の相互の影響を考慮するべく, 弾性体底板を有する容器を用いた揺動実験やDEM-FEM連成解析による評価を行った。本稿では, 実用的な問題の解決につながる第一歩として行ったこれらの検討を紹介した。

本稿に示した検討によって, アーチ効果に関して貨物積み高さとの比が影響を及ぼすこと, 不均一剛性底板の場合には局部変形と全体変形によるアーチ効果が重畳すること, 底板のアスペクト比が影響を及ぼすことが明らかにされた。

アーチ効果を考慮することで, より構造設計を合理的に行うことができると期待されることから, 動的応答に関する模型実験の実施やアーチの形成・崩壊条件の検討を継続して行い, 鋼船規則へのフィードバックを目指す予定である。

参考文献

- 1) 一般財団法人 日本海事協会: 鋼船規則C編 船体構造及び船体艙装 1編 共通要件, 2024.
- 2) 倉本ら: 鉍石圧力の実船試験と設計荷重の考察, 日本造船学会論文集, 1987巻, 162号, pp. 276-283, 1987.
- 3) 田中ら: 粒状貨物による艙内圧の実験的検討, 日本造船学会論文集, 1999巻, 186号, pp. 445-453, 1999.
- 4) 田中ら: 粒状貨物による倉内圧の実験的検討ー

- その2 粒状貨物荷重の設定法について一, 日本造船学会論文集, 2022巻, 192号, pp. 713-721, 2002.
- 5) 藤ら: 個別要素法および有限要素法による連成解析を適用した鉱石圧推定手法に関する研究, 日本船舶海洋工学論文集, 28巻, pp.63-74, 2018.
 - 6) Handy: The Arch in Soil Arching, Journal of Geotechnical Engineering, 111 (3), 302-318, 1985.
 - 7) Terzaghi et al.: Soil Mechanics in Engineering Practice Third edition, Wiley-Interscience, 100-141, 1996.
 - 8) Ali et al.: Particle-scale insight into soil arching under trapdoor condition, Soils and Foundations, 60 (5), 1171-1188, 2020.
 - 9) Yanagimoto et al.: Numerical investigation of dry bulk cargo load during ship vertical motion, Ocean Eng., 266 (3), 112970, 2022.
 - 10) O'Sullivan: Particle Discrete Element Modelling: A Geomechanics Perspective, CRC Press, 2011.
 - 11) 鶴田ら: 個別要素法を用いた横方向加振時の粒状貨物荷重に対する壁-粒子間摩擦係数影響の評価, 土木学会論文集, 80巻 (2024) 15号, 23-15025, 2024.
 - 12) Hirano et al.: Experimental investigation of the effect of granular arching under trapdoor condition on the load acting on the bottom plate, 10th Pan Asian Association of Maritime Engineering Societies Forum, C-7-01, pp.1-9, 2023.
 - 13) Peters et al.: Characterization of force chains in granular material, Phys. Rev. E., 72, 041307, 2005.
 - 14) 渡辺: 鉄筋コンクリート・プレストレストコンクリート 設計計算入門/23, コンクリート工学 14巻 (1976) 4号, pp.64-72, 1976.
 - 15) Makarov and Kalinovsky: Methods of regulating thrust in design of arch bridges, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 451 (2018) 012054, 2018.

船舶へのAIシステム活用における、開発過程の品質管理について

宮島 秀規*

1. はじめに

近年海事業界においても、AIシステムの開発が進んでおり、例えば、画像認識技術を利用した状況認識支援システム^{1) 2) 3)}の開発や、避航操船、自動離着陸を行う自動操船AIの研究・実証実験^{4) 5) 6)}などが実施されている。今はまだ船員の補助としての使われ方や、研究段階のAIがメインであるものの、将来的には、船舶に搭載されたAIシステムが、安全に直結する形で活用されるようになることが考えられる。

このようなAIには、データからパターンやルール等を学習する機械学習の技術が用いられている。また、昨今特に注目を集めている深層学習は、複雑なモデルを膨大なデータで学習させることで高い性能を発揮している。しかしながら、中身は実質ブラックボックスとなっており、判断根拠を人間が理解することは難しい。また、確率的な推論を行うAIを実環境に導入する場合、開発者の意図していない結果を出力する可能性について考慮する必要がある。

AIシステムについて、品質保証の観点から考えると、データを基に学習することでふるまいが帰納的に決定される仕組みとなっている昨今のAIは、内部設計から導き出される出力値を明示的に説明することが難しい。そのため、期待通りの性能が発揮できるかどうか、評価するのは容易ではない。また、開発後も周囲の状況の変化に追従できるように継続的な学習が行われる場合が多い。そのため、設計から運用までを含めたライフサイクルを考慮した開発が求められる。そこで、まずは開発過程で品質を確保するために必要な活動が行われているか、という点を押さえ、そのうえで具体的な評価方法を検討していく必要がある。

このようなAI特有の事情を踏まえ、本会では、適切な品質管理の下開発されたAIシステムが海事業界で利用されることを企図して、AIシステムの開発者が開発時に考慮すべき事項を『船舶へのAIシステム活用に向けたテクニカルガイド-AIシステムの開発過程における品質管理-』として取りまと

める予定である。そこで本稿では、現在開発中のガイドの内容として、AIの概要や開発と運用を一体化したアプローチについて説明する。また、今後海事業界におけるAIシステムの開発プロセスを整理する際に参考になる考え方として、『機械学習品質マネジメントガイドライン』における開発プロセスの整理を紹介する。

2. AIについて

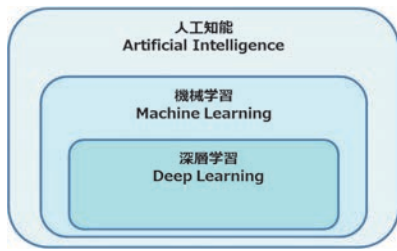
2.1 AIとは

AIという言葉は1956年のダートマス会議において提案され、その後様々な研究が行われてきた。AIの定義については様々な議論がなされているものの、確立した定義はなく、“人間の思考プロセスと同じような形で動作するプログラム、あるいは人間が知的と感じる情報処理・技術”というような広い概念で理解されている⁷⁾。

AIには探索や推論のアルゴリズム、エキスパートシステムなど様々な技術が含まれているものの、近年のブームの中心は機械学習である。機械学習はデータを分析する方法の一つであり、人間の学習に相当する仕組みをコンピュータ等で実現している。計算方法（アルゴリズム）に基づき、入力されたデータ（学習用データ）からコンピュータがパターンやルールを発見し、そのパターンやルールを新たなデータに当てはめることで、その新たなデータに関する識別や予測等を行うことができる。

また、機械学習の手法の一つに深層学習があり、近年のAIブームのきっかけとなった手法として特に注目されている。深層学習では人間の脳内の神経細胞の仕組みを再現したニューラルネットワークを用いており、そのニューラルネットワークを多層構造にしていることが特徴である。

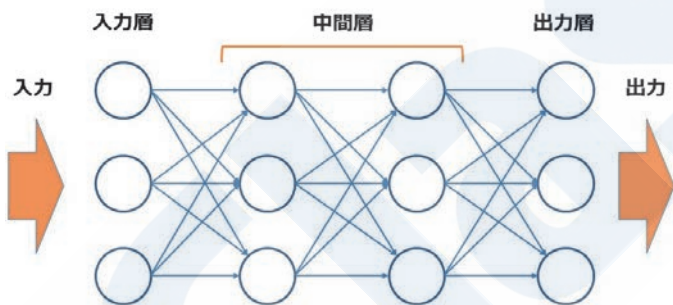
* 開発本部 技術研究所

図1 AI・機械学習・深層学習の関係⁷⁾

2.2 深層学習

深層学習のニューラルネットワークは入力層、中間層、出力層で構成されており、入力されたデータからニューラルネットワーク内での計算を通じて特徴を抽出し、最終的な判断結果を出力する。ニューラルネットワークの計算を行うためのパラメータはデータを基に最適化を行っており、そのプロセスを学習と呼ぶ。

深層学習ではネットワークを多層化し、大量のデータで学習することで、様々な分野において従来手法より高精度な結果を達成している。ネットワークの構造にも、画像の扱いに特化したConvolutional Neural Networks (CNN)や、時系列データやテキストデータなどを扱う際に使用されるRecurrent Neural Networks (RNN)、与えられたデータセットから新しいデータを生成する生成AIなど様々なものがあり、用途によって使い分けられている。

図2 深層学習の仕組み⁸⁾

2.3 AIの課題

機械学習を中心としたAIは精度の高い予測を行うことができるため、自然言語処理や音声処理、画像認識、コンテンツ生成など幅広い分野で応用されている。一方で、大量のデータを基に学習しており、また基本的には確率論で判断をしているため、以下のようなAI特有の課題について対応する必要がある。

2.3.1 データの品質と量

AIはデータを基に学習するため、期待通りの性能を引き出すにはデータの品質や量が重要になる。例えば、過去の規則性が当てはまらない場合や、判

断基準に使われている要素がデータに含まれていない場合、データ量が少ない場合には、AIに十分な精度が期待できない可能性がある。また、学習データに偏りがあると、モデルが出力する推論結果に誤差が生じてしまう可能性もある。そのため、質的、量的に十分な量のデータを確保する必要がある。そこでAIシステムの開発時には、解決しようとしている問題をしっかりと分析し、目的や使用環境、条件などを明らかにしたうえで、必要となるデータの品質や量についての検討を行っていくことが重要となる。

2.3.2 計算資源やコスト

広範囲に及ぶデータの収集やアノテーションには膨大な時間を要する。また、ビッグデータを保存し、効率的に利用できるようにするためには大規模なストレージが必要となる。さらに、AIモデル、特に深層学習のモデルを学習させるためには大量の計算資源が必要であり、学習にかかる時間も考慮する必要がある。そのため、十分な開発体制や開発環境を整えることが求められる。

2.3.3 ドリフト⁹⁾

機械学習においては、時間経過によってモデルの予測性能が劣化するドリフトという現象が起きる。ドリフトには主に2種類あり、季節性やトレンドの変化のような、学習時のデータと運用時のデータの分布にずれが生じるものをデータドリフト、今までになかったものが登場した場合など、入力データと正解ラベルの関係性が学習時と比べて変化するものを概念ドリフトと呼ぶ。このようなドリフトに対処するためには、AIシステムを開発した後も、性能や運用環境の変化を監視し、定期的に再学習することが求められる。

2.3.4 確率的なふるまい

確率的な推論を行うAIを利用する場合は、間違った推論結果が出力される可能性があることを考慮する必要がある。また、生成AIにおいては、AIが真実に基づかない情報を生成するハルネーション¹⁰⁾という現象が発生する点にも注意が必要である。AIシステムを開発する際は、このようなAIの特徴についてステークホルダーに十分に理解してもらうための活動や、適切な目標、運用方法について検討することが重要になる。

2.3.5 ブラックボックス問題

機械学習のモデル、特に深層学習はパラメータ数が多く構造も非常に複雑であり、どのような根拠により判断を行ったかを人間が理解することは難しく、中身は実質ブラックボックスとなっている。このようなAIは高い精度での予測・認識を行うことがで

きるものの、「中身が説明できないものは使えない」という懸念がAIシステムへの不信につながり、導入を阻害する要因にもなりうる。そこで、ステークホルダーからの理解を得るための活動や、ブラックボックス問題を考慮した運用方法の検討、ブラックボックスではない説明可能なAIの使用の検討を行うことが重要になる。

2.3.6 評価の難しさ

データを基に学習するAIは、定義された仕様に対して内部設計や実装を明示的に関連付けることができず、内部設計や実装の良し悪しのレビューや品質の評価が難しい。また、技術の進歩が速く、活用方法も様々である。そのため、システム全体で達成したい目的やAIシステムに求める要素を明らかにし、対象とするAIシステムにあわせた評価方法を検討していくことが重要になる。

2.3.7 活用方法によるリスクの違い

AIは活用方法によってリスクが大きく異なり、翻訳や質問応答、音声認識のような日常生活で使用するAIシステムであれば、大きな問題は生じないと考えられる。一方で、自動運転や自動操船のような安全に直結するAIシステムの場合は、安全性や信頼性の面について慎重に検討する必要がある。

欧州委員会が2021年4月21日に発表したAI規則案ではリスクベースのアプローチが採用されており、4つのリスクレベルを設け、各々のリスクに応じた要件・規制が規定されている¹¹⁾。AIシステムを開発する際にはこのような考え方が参考になる。リスク評価を通じてAIシステムのリスクを把握し、適切な制御対策をとることで、安全性を担保していくことが重要である。

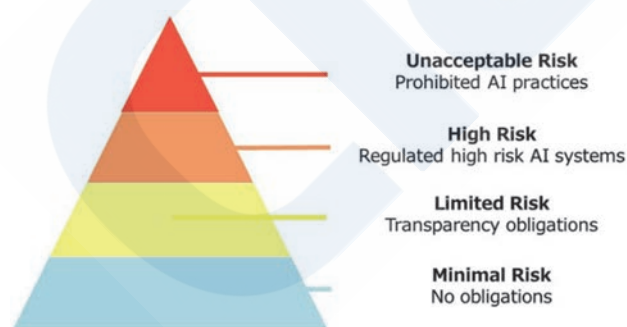


図3 EUのAI規制法案におけるリスクのピラミッド¹²⁾

2.3.8 セキュリティ¹³⁾

AIシステムを開発する際には、従来のITやシステムのセキュリティの観点に加えて、AI特有のセキュリティとして学習用データやAIモデルを狙った攻撃について考慮する必要がある。AIモデルへの攻撃には以下のようなものがあり、AIシステム

開発時には、リスク評価の実施や、攻撃への対応策をとることが求められる。

・ポイズニング攻撃 (Poisoning Attack)

学習用データやAIモデルに何らかの細工をして、AIモデルの開発者の意図しない推論結果を出力させる攻撃の一種。

・回避攻撃 (Evasion Attack)

推論用データにノイズが加えられることでAIモデルの推論が誤って行われることがある。加えられたノイズが小さい場合、人間が元のデータとの差異を識別できないことがある。そうした小さなノイズが加えられたデータを敵対的サンプルと呼び、敵対的サンプルを利用してAIの誤認識を発生させる攻撃を回避攻撃と呼ぶ。

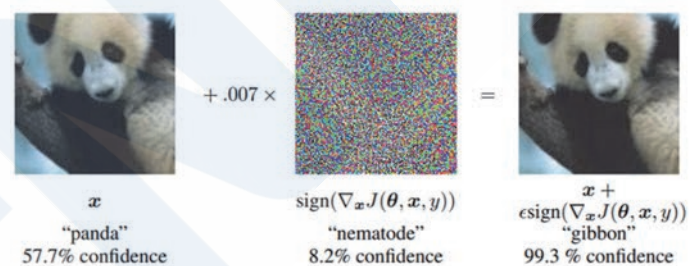


図4 テナガザルと誤認識されるパンダの敵対的サンプルの例¹⁴⁾

実際にAIを活用したシステムを開発する場合は、開発プロセスにおける活動を通じて、このような課題に対応していく必要がある。

3. 開発と運用を一体化したアプローチ

一般的にAIシステムでは、期待通りの性能が得られるように、データを基にモデルの学習と評価を繰り返す形で開発が進められる。また、開発したAIシステムを実環境に導入した後も性能を監視し、ドリフトのような周囲環境の変化に起因するデータの傾向の変化への対応や、新たに蓄積したデータを用いた精度向上を図るために、継続的な評価や学習が行われる。そこで、AIシステムの開発においては、新たに取得したデータでの学習を繰り返すことで品質を維持・向上し、より期待する成果に近づけていく、開発と運用を一体化したアプローチ^{15) 16)}が採用されることが多い。このような点を踏まえ、ガイドでは、AIシステムの開発初期から運用終了までのアプローチを、図5の通り整理する予定である。

実際の開発の流れは開発者や開発するシステムに

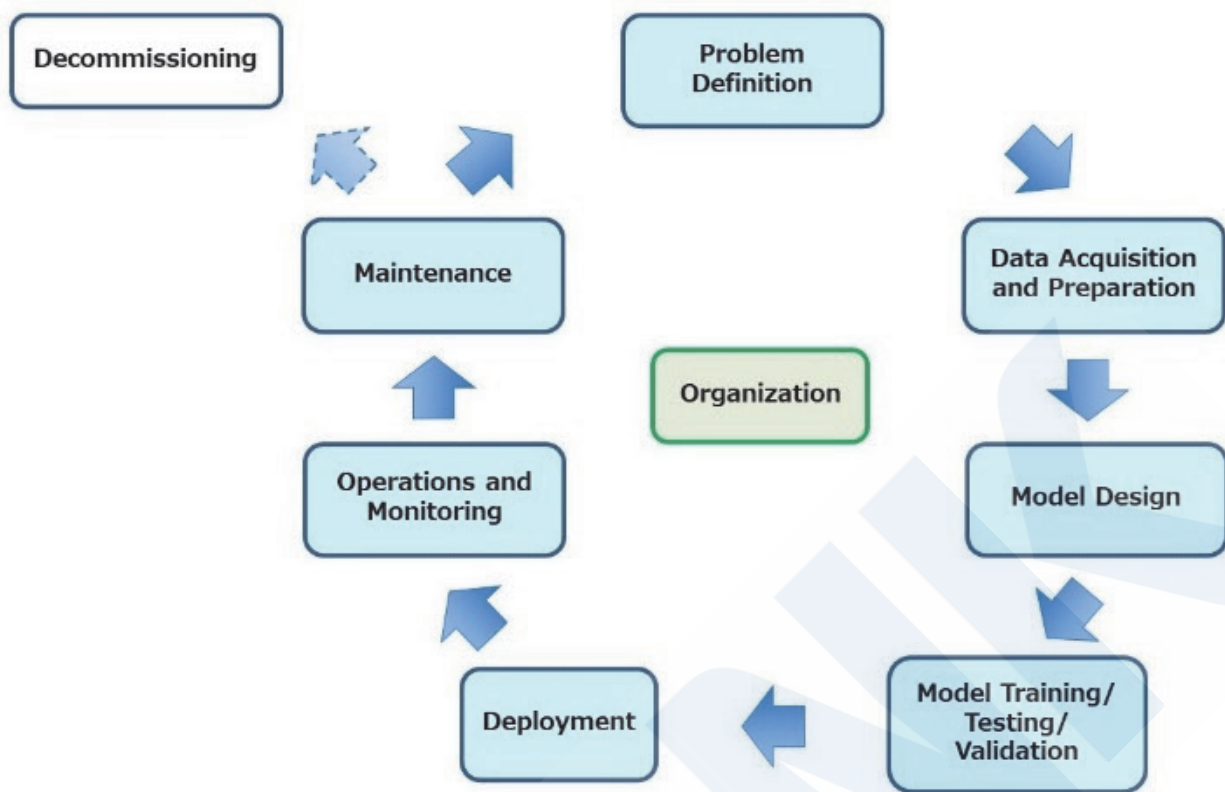


図5 開発と運用を一体化したアプローチ

よって異なるため、ここでは様々なAIシステムを意識した汎用的なアプローチを示している。AIシステムの開発においては、このようなアプローチの各フェーズを通じて、前述したAI特有の課題に取り組みつつ、品質を確保するために必要な活動を実施していくことが求められる。そこで、各フェーズで開発時に考慮すべき事項をガイドに記載することを検討している。

AIシステムの開発においては開発体制や開発環境も重要であり、アプローチ全体に関係する要素であることから、**Organization**として中心に配置している。

0) Organization

AIシステムの開発を成功に導くために必要な、開発、運用に携わる組織の能力に関する要素。

1) Problem Definition

AIシステムで解決しようとしている問題を明確にして、開発を進めるために必要な検討を行うフェーズ。

2) Data Acquisition and Preparation

データを収集し、AIモデルの学習に使用するための前処理を行うフェーズ。

3) Model Design

Problem Definitionで定めた目的や要件、利用可能なデータを踏まえて、開発の全体的な

アプローチを定め、AIモデルを設計するフェーズ。

4) Model Training / Testing / Validation

AIモデルを学習させ、期待通りに動作していることを確認するフェーズ。

5) Deployment

実際の環境で動作するように、AIシステムを既存のシステムやプロセス、製品、サービスと統合するフェーズ。

6) Operations and Monitoring

AIシステムを実際の環境で運用し、期待通りに動作しているか継続的に監視するフェーズ。

7) Maintenance

必要に応じてメンテナンスやシステム、モデルの更新を実施するフェーズ。

8) Decommissioning

AIシステムの運用結果を評価し、AIシステムが不要になるか、もしくは、別の効果的なソリューションが開発された場合に、AIシステムの運用を終了するフェーズ。

4. 機械学習品質マネジメントガイドラインにおける開発プロセスの整理

前述の通り、開発と運用を一体化したアプローチ

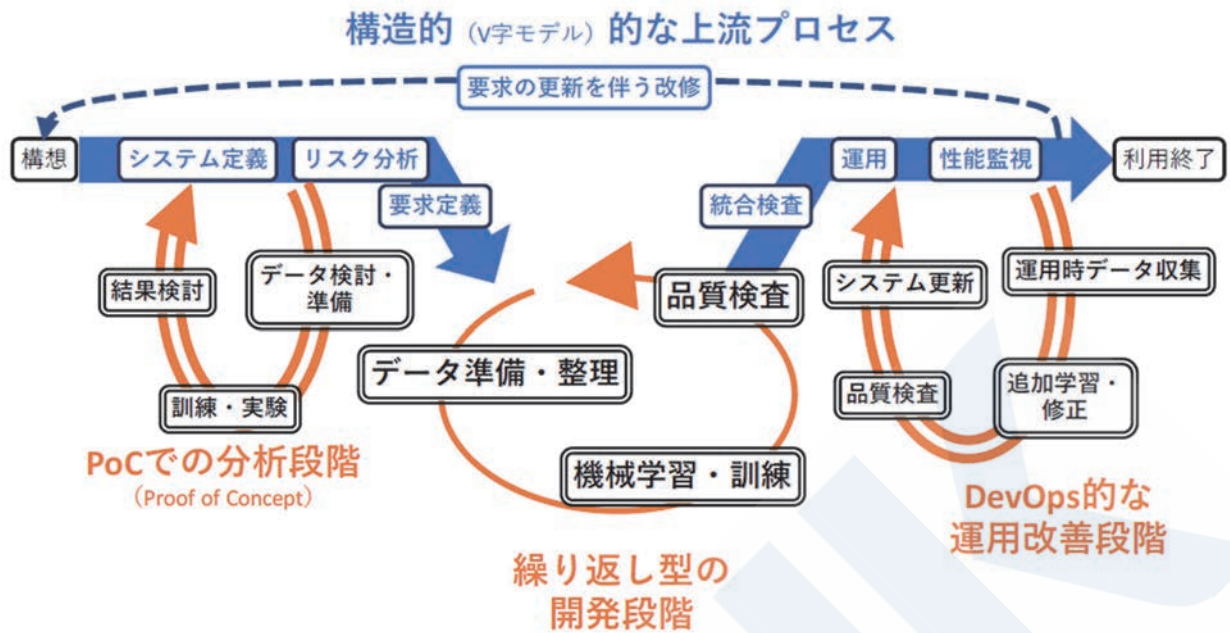


図6 機械学習品質マネジメントガイドラインにおける開発プロセスの整理¹⁵⁾

は対象を問わない汎用的なものとなっており、継続的に学習を繰り返し、品質を高めていくことを想定している。実際に船舶に搭載するAIシステムに適用する場合は、海事業界の開発プロセスに適した形に落とし込む必要がある。このような場合に参考になる考え方として、『機械学習品質マネジメントガイドライン』における開発プロセスの整理を紹介する。

AIシステムの開発では、前述した開発と運用を一体化したアプローチを通じてAIシステムの品質を確保していくことになる。一方で、AIの学習はデータに依存しているため、開発初期段階で成果物を予測することが難しく、また、開発者と利用者間の認識にも違いが生じやすい。そのため、AIシステムの開発においては、新たな概念やアイデアの実現可能性を示すための検証プロセスであるPoC (Proof of Concept) が行われることが多い。また、AIシステムは、開発され実環境に導入された後も、精度の維持・向上のために、継続的に新たに取得したデータを用いた学習が行われる。

このような一般的なAIシステムの開発プロセスについて、産業技術総合研究所の発行する『機械学習品質マネジメントガイドライン』では、図6のように「PoCでの分析段階」「繰り返し型の開発段階」「DevOps的な運用改善段階」の3段階に分けて整理している。新技術導入にあたっての事前検証や、開発完了時の検証、運用開始後の変更の確認は海事業界においても重要であることから、このような開発段階の整理は、海事業界への親和性が高いと考えられる。

5. おわりに

本稿では、現在開発中の『船舶へのAIシステム活用に向けたテクニカルガイド・AIシステムの開発過程における品質管理』に記載する内容として、AIの概要や、開発と運用を一体化したアプローチについて説明した。また、アプローチを海事業界の開発プロセスに適用する際の考え方の参考として、『機械学習品質マネジメントガイドライン』における開発プロセスの整理を紹介した。これらの内容はAIシステムの用途を問わない汎用的なものとなっているため、今後は、海事業界に適した開発プロセスを整理していく必要がある。

AIシステムについて海事業界では、「海事業界の人間がAIシステムを開発する」ケースと、「AIシステムの開発を担っている企業が海事業界向けのAIシステムを作る」ケースが出てくると考えられる。前者については、AIシステムの開発への理解が必要となり、後者については、海事業界の開発プロセスに対する理解が必要となる。現在開発中のガイドでは、両者のケースで気づきとなる情報を記載することを心掛けている。これらの内容が、海自業界におけるAIシステムの開発の一助となれば幸甚である。

参考文献

- 1) JRCS : infoceanus,
<https://infoceanus.com/>, 2024.3
- 2) GROKE : Groke Pro,

- <https://www.groke-tech.com/en/products>, 2024.3.
- 3) Orca AI : SeaPod,
<https://www.orca-ai.io/seapod/>, 2024.3
- 4) 日本財団：無人運航船プロジェクト
「MEGURI2040」未来の海を支える「無人運航船」の実用化を目指す,
<https://www.nippon-foundation.or.jp/what/projects/meguri2040>, 2024.3
- 5) 日本財団：無人運航船プロジェクト
「MEGURI2040」世界初の大型フェリーの無人運航実証, 北九州市で成功,
<https://www.nippon-foundation.or.jp/who/news/pr/2022/20220117-66607.html>, (2024年3月閲覧)
- 6) Hashimoto et al. : Development of AI-based Automatic Collision Avoidance System and Evaluation by Actual Ship Experiment, ClassNK technical journal, 2021
- 7) 総務省：令和元年版 情報通信白書 | AIに関する基本的な仕組み,
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r01/html/nd113210.html>, 2019
- 8) 佐藤文孝：Deep Learning概説—AIの核となる機械学習技術の最先端—, FUJITSU JOURNAL, 2018
- 9) 一色政彦：概念ドリフト(Concept drift)/データドリフト(Data drift)とは?,
<https://atmarkit.itmedia.co.jp/ait/articles/2202/21/news033.html>, (2024年3月閲覧)
- 10) AI白書編集委員会：AI白書2023 生成AIのインパクトとAIガバナンス, 角川アスキー総合研究所, 2023
- 11) PwC Japan：生成AIを巡る米欧中の規制動向最前線 欧州「AI規則案」の解説,
<https://www.pwc.com/jp/ja/knowledge/column/awareness-cyber-security/generative-ai-regulation03.html>, (2024年3月閲覧)
- 12) Tambiama Madiega : Artificial intelligence act, European Parliament Research Service, 2023
- 13) 独立行政法人情報処理推進機構：セキュリティ関係者のためのAIハンドブック, 2022
- 14) Ian J. Goodfellow et al. : Explaining and Harnessing Adversarial Examples, International Conference on Learning Representations ICLR, 2015
- 15) 国立研究開発法人産業技術総合研究所：機械学
- 習品質マネジメントガイドライン 第4版, 2023
- 16) ISO/IEC 22989:2022 Information technology — Artificial intelligence — Artificial intelligence concepts and terminology

ロケット回収船の研究開発と船級規則への対応

角 有司*

1. 目的および背景

JAXAでは、基幹ロケット発展型宇宙輸送システム（以下、再使用ロケットという）の検討を進めている。これは、我が国の宇宙開発ミッションに対応するために、2030年頃の初号機打上げを目指し、大幅な低コスト化の実現に向けて開発するロケットである。本報告では、再使用ロケットを洋上で回収するためのロケット洋上回収船（以下、回収船とする）の検討状況について概説する。なお、再使用ロケットの研究は始まったばかりであり、以下に示す再使用ロケットの仕様や、打上地点等は、検討中の案である。回収船においても要求機能の洗い出しと複数の船舶のトレードオフを行っている段階であり未確定の状況である。なお、本論文はマリンエンジニアリング学会誌への投稿文¹⁾に、5章「回収船のリスク評価に向けた取り組み」を加筆作成したものである。

2. 我が国の再使用ロケットの位置づけ

2.1 我が国の宇宙輸送システムロードマップ

人工衛星を始めとする宇宙開発利用は、気象観測・測位・衛星通信等、国民生活や社会経済・安全保障活動を支える不可欠のインフラとなっている。

宇宙空間への運搬手段である宇宙輸送システムは、宇宙へアクセスするための根幹のインフラとして、自立性を確保することが我が国の宇宙政策の基本となっている。

文部科学省宇宙開発利用部会においても、近年の宇宙輸送市場で激化する競争環境への状況認識・問題意識も踏まえ我が国の宇宙輸送システムの自立性確保、国際的競争力確保および産業発展を目指し、技術革新による抜本的な低コスト化を達成する革新的将来宇宙輸送システムを2040年代前半までに実現することとされ、そのための段階的な計画・道筋（ロードマップ）の策定に当たっての基本的な考えが示された²⁾。これを受けて、革新的将来宇宙輸送システムのロードマップが文部科学省主体で設定されている^{3) 4)}。

ロードマップのうち、再使用ロケットに関する内容を要約すると以下となる。

- ・ 国は、安全保障や防災利用、深宇宙探査等の官ミッションに対応するため、2030年頃の初号機打上げを目指して大幅な低コスト化（H3ロケットの1/2程度を目標）の実現に向けた「基幹ロケット発展型（再使用ロケット）」の開発を進める。
- ・ JAXAは民間事業者と対話し必要な要素技術を絞り込み、官民共同研究により要素技術を獲得する。
- ・ 国およびJAXAは、再使用を伴う飛行試験場のスペックや機体の回収方策・整備方法を検討し、民間事業者も試験で活用することを想定する。また、飛行試験場の整備・運用データ等を民間事業者に提供するとともに、制度的課題に関わる部分について、国は、関係機関と連携し、必要な対応の検討を進める。

2.2 JAXAにおける再使用ロケットの全体構想

再使用ロケットの実現に向けてJAXAが検討中の運用プロセスの全体概要を以下A)～D)に示す（図1）。

- A) 国内の打上地点において、再使用ロケットの打上げを実施する。1段ロケットは、2段と切り離された後で、姿勢反転、慣性飛行を経て減速し、回収船に設置されたプラットフォームに着陸する。
- B) 1段ロケットが回収船に着陸すると、回収船に装備された固定装置によりロケットの機体を船体に安定的に固定させる。その後、推薬、酸化剤等をタンクから抜くことで安全化処置を行う。着陸から安全化までの作業は無人で行われる必要があることから、人員は回収船の近くに待機する船舶（サポート船、2.3節に記載）に移動し、遠隔操作によりロケット回収作業を行う。安全が確認された後、人員は回収船に移動し船上での作業を実施する。
- C) 回収船は1段ロケットを搭載したまま、地上の点検整備場の岸壁まで航行する。岸壁に到着した後、クレーンにより1段ロケットを陸揚げする。

* 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（以下、JAXA） 研究開発部門 第四研究ユニット

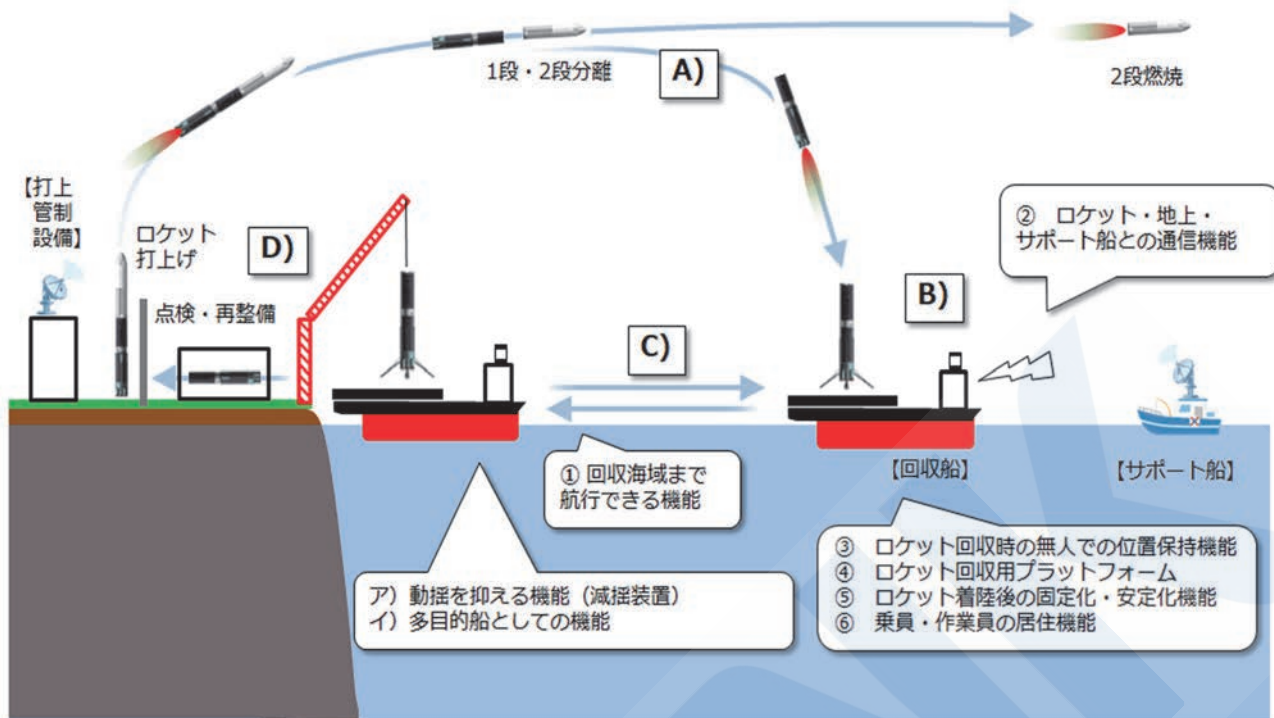


図1 ロケット回収船の洋上回収プロセス(案)

D) 1段ロケットを点検整備場に移動し、再使用するために必要となる整備を行う。整備完了後は1段ロケットを打上地点まで移動させる。その後、上記A)に示す打上げを行う。これ以降はA)～D)を繰り返すことでロケットの再使用を実現する。

2.3 回収海域の候補

現在、再使用ロケットの射点の場所については検討中である。いくつかの候補があるが、ここでは種子島宇宙センターを使用した場合での検討結果を示す。種子島宇宙センターには、現在の基幹ロケット用の機器やインフラが整備されており、それらを流用することで再使用ロケット用の設備の再整備コストの低減が期待できる。また、ロケット回収海域については国内および近隣諸国の安全性を考慮して設定する必要がある。仮に種子島宇宙センターの射点から静止衛星・探査衛星の打上げを想定した場合は、日本の東～南東～南の海域がロケット回収海域として想定される(図2)。周回衛星の打上げを想定した場合は、日本の南西方向の海域が候補となる。

ロケットの回収は、万が一の爆発・火災における人員の安全性を考慮して無人化が求められる。そのため、回収船とサポート船の2船体制による運用とする案が検討されている。役割分担としては、回収船はロケット回収・安全化・運搬を行い、サポート船は、人員の退避、回収船の遠隔操作、ロケットの追跡・制御を行うことが想定される。

3. 回収船の先行事例と日本の課題

3.1 先行事例 (SpaceX社)

再使用ロケットおよび回収船の事例として、SpaceX社の取り組みがある⁶⁾。SpaceX社ではマーリンエンジンを9基搭載したFalcon9ロケットを使用した洋上回収ミッションを実施している(図3)。2024年4月時点の結果ではシリーズとして271回打ち上げられ、ここまでそのうち267回のミッションが成功(成功率98.5%)している。洋上回収は、ドローン船(ASDS, Autonomous Spaceport Drone Ship)というバージ船を改造した自動航行が可能な船舶を使用して行われており、これまで4隻のドローン船を建造し使用している(図4)。一般にバージ船の乾舷の高さでは遠洋に出ることが困難であり、船舶の自動運転についても国際ルールが定まっていないことから、米国政府により特別に許可を受けた範囲で運用されていると考えられる。ロケット回収時は無人化が行われ、回収時の制御は、近くに停泊するサポート船⁷⁾(図5)によって行われている。回収海域は、ミッションによって異なり、フロリダ沖の約300～1,200kmの位置で行われている。

3.2 日本の回収船で考慮すべき事項

米国(SpaceX社)と日本の置かれた状況を比較し、特に配慮すべき事項について以下に示す。

① SpaceX社がロケット回収を行うフロリダ沖は比較的穏やかであるため、バージ船のような船舶でも回収が出来たと考えられる。一方で、日本近



図2 ロケット回収海域（案）（背景図⁵⁾）



図3 SpaceX社のファルコン9ロケット⁶⁾



図4 SpaceX社の回収船（ASDS）⁷⁾



図5 SpaceX社のサポート船（Go-Quest号）⁸⁾

海は季節によっては波・風が厳しいため、洋上での耐航性の高い船舶が必要になると考えられる。海のうねりに対して揺れが少ない大型船舶を採用するか、減揺装置を搭載した一般船舶を利用するといった対策が必要になる。

② SpaceX社では、Starlink衛星⁹⁾の打上げ等を継続的に実施しており、安定的かつ長期的に打上げの機会がある。従って回収船は回収だけを目的とした専用船が成立できる。一方で、JAXAのロケット打上げ機は、当面は年に数基に留まることが予想されるため、打上げが無い期間における船舶の維持管理について配慮することが必要である。

4. 回収船の開発構想

4.1 回収船に求められる要求機能

上記2.2節で述べた再使用ロケットの全体構想を実現するために、回収船に求められる要求機能を以下の通り整理した（図1）。

(1) 基本的な機能要求

- ① 回収海域まで航行できる機能
- ② ロケット・地上・サポート船との通信機能
- ③ ロケット回収時の無人での位置保持機能
- ④ ロケット回収用プラットフォーム
- ⑤ ロケット着陸後の固定化・安全化機能
- ⑥ 乗員・作業員の居住機能

(2) 日本の事情を考慮した機能要求

- (ア) 動揺を抑える機能（減揺装置）
- (イ) 多目的船としての機能（浚渫機能¹⁰⁾ ¹¹⁾、油回収機能¹⁰⁾ ¹¹⁾、病院船機能等が考えられる。）

4.2 回収船の構想例

現在、JAXAでは要求機能を実現できる船舶のトレードオフを実施中である。ここでは一つの例として、浚渫兼油回収船¹⁰⁾ ¹¹⁾をベースに、ロケットの洋上回収だけでなく、病院コンテナの運搬等の機能を持たせた多目的船の構想例を図6に示す。

本船はJAXAにおける再使用ロケットの計画とは別に筆者が独自に検討したものである。今後、さらに検討を進める場合は、造船メーカ等の協力のもと、船舶規則上の成立性や構造強度上の成立性等についての検討が必要である。

以下に本船の特徴を4.1節の要求機能①～⑥、(ア)、(イ)との対応で記載する。

- (1) 回収海域までスムーズに航行するために一般の船型を採用する（機能①）。推進器は全旋回型とし、推進器とバウスラストを利用することでロケット回収時の位置保持を行う（機能③）。
- (2) ロケット回収時は、回収用のデッキ(11.5(m) x

50(m))を船尾部の両舷に搭載し、ロケット回収に必要となる50(m)x50(m)の領域を確保する(機能④)。回収用デッキは通常は地上に保管することで、通常航行時の支障にならないように配慮する。着地後の固定化・安全化のための装置を回収デッキ周辺に配置する(機能⑤)

- (3) 居住区を船首部、ロケット回収用デッキを船尾部に配置する(機能⑥)。居住区は船首部に配置することで、ロケット運搬時の前方の視野を確保する。居住区の左舷には車両が出入りするためのタラップを装備するとともに、居住区下部は自動車用の通路および駐車場とする。これにより、ロケットの整備作業中に頻繁に発生するロケット・衛星の機器の搬入や、作業者のアクセス性を向上させる。居住区上部の暴露部にはロケット・サポート船との通信アンテナ等を搭載する(機能②)。
- (4) 居住区の上層部には減揺装置を搭載するとともに、居住区側面には傾斜をつけ横風の影響を少なくする。回収デッキ下部の船体に空間を設けて2層構造とすることで、回収デッキに当たった横風が空間を通り抜けることで船舶の横揺れを低減する(機能(ア))。
- (5) 多目的利用のための浚渫機能を装備した(機能(イ))。浚渫槽底部にはホップドアを配置し、ドラグアームはサイドドラグアーム型を採用し

両舷に配置する。浚渫槽は船体中央部に配置することで、浚渫土をホップドアから廃棄した際の船舶のトリム状態への影響を少なくする。また、浚渫槽をロケット回収地点と居住区の間に配置して距離を確保することで、万が一のロケット火災発生時における居住区の損傷を減らす考えである。火災発生時は、浚渫ポンプを利用して消火に活用する。ロケット回収時には浚渫槽に海水を積載することで船舶の動揺特性を調節する。

- (6) 船上には大型の門型クレーンを搭載する。このクレーンは、ロケット回収用のデッキの搭載、回収したロケットの岸壁への搬入、病院船用コンテナの移動¹²⁾ ¹³⁾等、多目的に利用できる(機能(イ))。

5. 回収船のリスク評価に向けた取り組み

5.1 取り組みの方針

国産リージョナルジェットの開発中止と、自動車会社による小型ジェット機の成功を分析した文献¹⁴⁾によると、一つの視点として型式認証への対応の違いが指摘されている。小型ジェット機が成功した理由として、当初から型式認証を行う米国に拠点を構え、米国航空業界との技術交流を深めた点にあるとの指摘である。

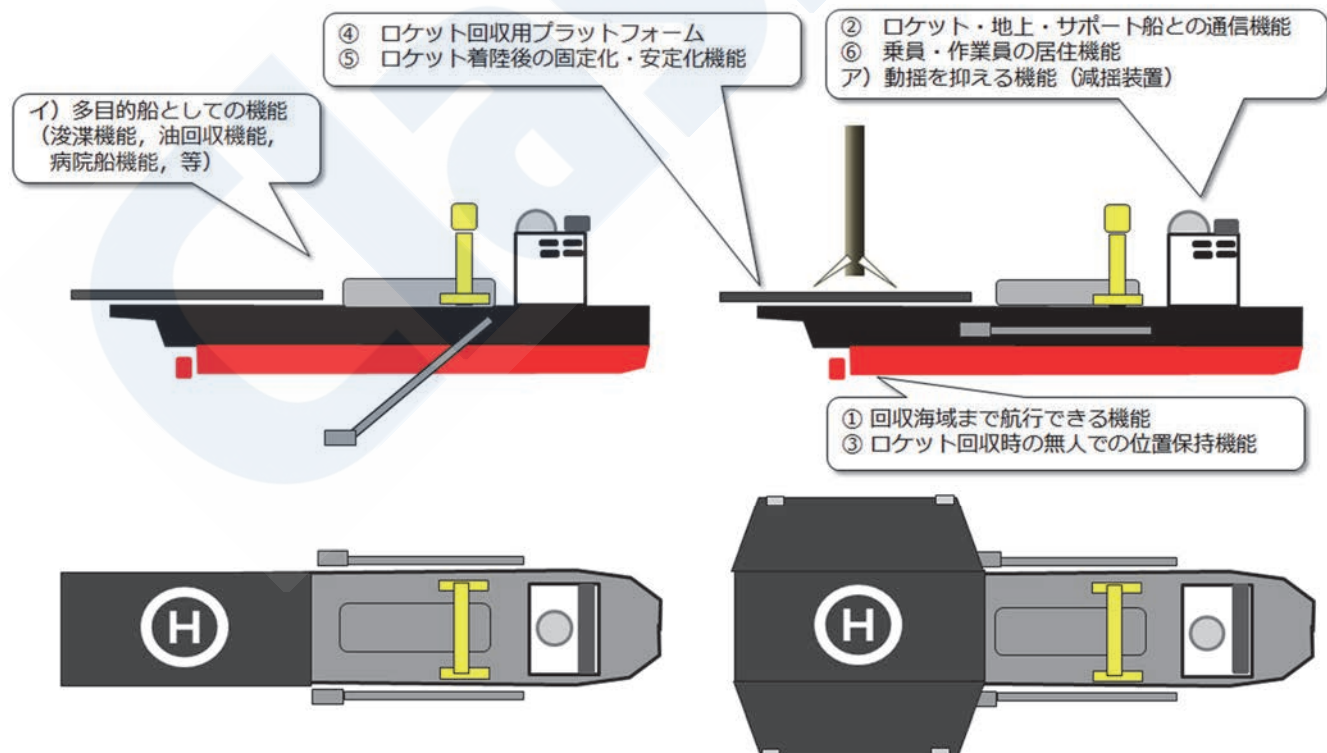


図6 洋上回収船の構想図
(左図：浚渫時、右図：ロケット回収時)

日本の研究開発機関（JAMSTEC等）が建造する船舶はNKの認証を受けていることから、JAXAとして初めて建造するロケット回収船はNKの認証を受ける計画としている。NKの認証を確実に取得するために、JAXAは開発当初からNKとの技術交流を深め、研究開発とリスク評価を同時並行で行う方針とした。

5.2 船級規則の調査

(1) 目的

調査の対象は4.2節で述べた浚渫兼ロケット回収船とし、浚渫船や病院船など機能を追加する場合の適用規則の整理と、その規則の認証に向けた課題と対策を整理した。また、ロケット側のルール調査を

同時並行で実施し、適用すべき規則の全体像を整理した。

(2) 検討結果

今回の対象としたルールの全体像を表1に示す。船級規則としては、船舶の設計・建造計画に従って対応することで適用できることを確認したが、今後、船種が変更になった場合は適用させる規則の確認から行う必要がある。また、ロケットの仕様や運用が確定した後に確認すべき項目として、いくつかの課題が確認された。その概要を以下に示す。

- ① ロケットの洋上回収を無人で行う場合は、船舶を定点保持するだけで良いのか完全無人運転が必要となるかについて判断が必要となる。船舶

表1 検討対象とした船級規則および関連規則

NK 技術規則 検査要領	1	A編 総則	24	船舶保安システム規則/実施要領
	2	B編 船級検査	25	海上労働システム規則/実施要領
	3	C編 船体構造及び船体塗装	26	船用品等検査試験規則
	4	U編 非損傷時復元性	27	事業所承認規則
	5	V編 満載喫水線	28	海洋汚染防止のための構造及び設備規則/検査要領
	6	W編 船橋視界	29	安全設備規則/検査要領
	7	D編 機関	30	無線設備規則/検査要領
	8	GF編 低引火点燃料船	31	居住衛生設備規則/検査要領
	9	H編 電気設備	32	船体防汚システム規則/検査要領
	10	K編 材料	33	バラスト水管理設備規則/検査要領
	11	L編 艦装品	34	冷蔵設備規則/検査要領
	12	M編 溶接	35	揚貨設備規則/検査要領
	13	N編 液化ガスばら積船	36	潜水装置規則 / 検査要領
	14	S編 危険化学品ばら積船	37	船橋設備規則/検査要領
	15	I編 極海航行船、極地氷海船及び耐氷船	38	機関予防保全設備規則/検査要領
	16	O編 作業船	39	総合火災制御設備規則
	17	P編 海洋構造物等	40	船体監視システム規則
	18	R編 防火構造、脱出設備及び消火設備	41	高速船規則 / 検査要領
	19	登録規則/細則	42	旅客船規則/検査要領
	20	船級登録及び設備登録に関する業務提供の条件	43	強化プラスチック船規則/検査要領
	21	国際条約による証書に関する規則	44	船舶用原動機放出量確認等規則/実施要領
	22	船舶安全管理システム規則/実施要領	45	船用材料・機器等の承認及び認定要領
	23	国際航海に従事しない船舶又は総トン数500トン未満の船舶の安全管理システム規則/実施要領		

国際条約	1	MARPOL	国内法	1	船舶安全法
	2	FSS code		2	危険物船舶運送及び貯蔵規則
	3	LSA code		3	海洋汚染防止法
	4	COLREG		4	特殊基準及び暫定基準
	5	SPS code(特殊目的船コード)	その他 (現状規則はないが追加で検討が必要)	1	病院船にかかる追加要件
	6	IP code(洋上作業員運送の安全に関する国際コード)		2	無人運航船にかかる追加要件
	7	MODU code(移動式海底掘削船の国際建造規程)		3	回収船に関わる安全要件 (火災消火、耐熱デッキへの要件等)
	8	IMSBC code(国際海上固体ばら積み貨物規則)	ロケット 安全要求	1	JMR-001C システム安全基準 (*1)
	9	IMDG code(国際海上危険物規程)		2	JERG-1-007 射場・飛行運用安全技術基準 (*1)
	10	Polar code(極海船コード)		3	JERG-1-006 ロケットシステム開発安全技術基準 (*1)
	11	IBC code(危険化学薬品のばら積み運送のための船舶の構造及び設備に関する規則)		4	NPR8715.3 NASA Procedural Requirements NASA General Program Requirements Chapter 2, System Safety
	12	IGC code		5	MIL-STD-882 Department of Defense Standard Practice for System Safety
	13	IGF code			

(*1) <https://sma.jaxa.jp/techdoc.html> 参照

としての自動運航技術についてはまだ実験段階であり、完全な無人運航船については法規制の整備も含めて対応中の段階である。将来的な無人運航船に対する法規制を適用ないし部分的に適用をする必要があると考えられるものの、現時点では明確なものが存在していないため、国土交通省と調整して、本船の仕様が法規制に対して逸脱したものとならないよう綿密なやり取りを実施していく必要がある。

- ② 回収船にJAXA・メーカー職員が乗船するための事前訓練が必要であることが分かった。JAMSTECが所有する船舶の例を参考にして、JAXAとしての訓練マニュアルを整備する必要がある。
- ③ 病院船について、船上で医療活動をする場合は客船と同等の仕様となり船舶の建造コストが大幅に増加する可能性がある。一方で病院コンテナを運搬して地上に設置し医療活動は地上で行う方法等が議論され、今後、病院船としての利用頻度を考慮して検討を継続する必要がある。
- ④ 今後は、ロケット総合システム（ロケット+船）として検討していく必要がある。その際は、JAXAが開発中の再使用ロケット（RV-X¹⁵⁾、等）におけるロケット転倒等のハザードを参考に検討を進めることが推奨された。今後ロケットの仕様を明確にする作業と同時並行で、JAXA射場安全部門等との協議によりロケット側のルールを再整理する必要がある。
- ⑤ ロケット着陸時の環境（衝撃・熱・可燃性ガス）と船舶側の圧力容器との関係を整理しておく必要がある。また、ロケット側に搭載される危険物（ロケット燃料、液体酸素、ヒドラジン、等）に関しては、その取扱い方法含め詳細な検討が必要である。

6. 今後の課題

6.1 回収船の成立性検討

3.2節で述べた通り、本船は構想段階であるため、造船技術者の協力による成立性検討が必要である。例えば、ロケット回収時に船の揺れを小さくするための船型の検討や、ロケット回収用のデッキの強度設計・耐熱設計等、多くの検討が必要である。一方でロケット回収のための技術検討も必要である。ロケットを安全に固定する機能、安全化機能、無人運転の機能等の多くの検討が必要である。

また、本船のライフサイクルコスト面での評価が必要である。ロケット回収に使用しない時期の用途

として、浚渫、ロケットの運搬、病院船等を提案したが、これは可能性があるものを列挙しただけの状況である。多目的船とすることにより船舶の構造とその運用が複雑となるデメリットがあるため、実際の運用コストや、運用する企業の希望を考慮し、機能を絞った船舶とした方が良い可能性がある。

6.2 宇宙と船舶の課題解決の場としての利用

ロケット回収船の実現に向けては、宇宙技術と船舶海洋技術の両者の協力が必須である。また、宇宙技術が持つアピール力と、船舶技術が持つ高い技術力を組み合わせて発展させることで、それぞれの業界が抱える課題解決の場として利用できる可能性がある。

文献¹⁶⁾によると、船舶業界の課題として、官公庁船の整備、カーボンニュートラルに向けたガス燃料船の開発・普及等が挙げられている。また、自動運転技術の実証¹⁷⁾、ICT浚渫¹⁸⁾等の取り組みも進められている。ロケット回収船をそういった船舶技術の実証の場として利用することで、さらに多くの国民へのアピールの場となり、船舶業界への理解が広がることが期待できる。

一方で宇宙業界の方は、近年のベンチャー企業を巻き込んだ競争の激化により、さらなる性能向上・信頼性向上と低コスト化が求められている。既に米国のSpaceX社は再使用ロケットを実用化し実績を挙げていることから、JAXAは従来の延長上の取り組みを行うだけでは不十分であり、そのままでは、さらに諸外国との差が広がる懸念がある。そこで、ロケット回収船を様々な用途で使用して新しいビジネス機会を創出し、トータルとしての収益性を上げることが必要である。

日本には、造船業、船用機器産業、海運業等、高い技術力を持つ多くの産業が存在している。そういった日本としての優位性や文化的背景を生かし、様々な業界との議論を通じて、新しいアイデアを創出していきたい。

謝辞

ここに報告された船級規則の調査は、日本海事協会とJAXAとの共同研究「ロケット洋上回収船の多目的利用に向けた船級規則の調査」の研究成果である。関係各位の貢献に感謝を表します。

参考文献

- 1) 角有司, 再使用ロケットの洋上回収船, マリンエンジニアリング学会誌 第59巻第1号,

2024.1

- 2) 文部科学省 宇宙開発利用部会 将来宇宙輸送システム調査検討省委員会 会議資料, 2020
- 3) 文部科学省研究開発局 宇宙開発利用課, 革新的将来宇宙輸送システム実現に向けたロードマップ検討会取りまとめ, 2022
- 4) 文部科学省研究開発局 宇宙開発利用課, 革新的将来宇宙輸送システム実現に向けたロードマップ検討会中間取りまとめ, 2021
- 5) 国土地理院: 日本の東西南北端点の経度緯度, <https://www.gsi.go.jp/KOKUJYOHO/center.htm> (Accessed 2024/4/1)
- 6) <https://www.spacex.com/> (Accessed 2024/4/1)
- 7) <https://spacexfleet.com/go-quest/> (Accessed 2024/4/1)
- 8) https://en.wikipedia.org/wiki/Falcon_9 (Accessed 2024/4/1)
- 9) <https://www.starlink.com/> (Accessed 2024/4/1)
- 10) ドラグサクション浚渫船: <http://www.s-jwa.or.jp/workvessels/set01.html>, 作業船協会 (Accessed 2024/4/1)
- 11) 加藤英夫, ドラグサクション浚渫兼油回収船による浚渫及び油回収技術の紹介, マリンエンジニアリング学会誌 第53巻 第6号, 2018.11
- 12) 内閣府; 病院船の活用に関する検討会, <https://www.bousai.go.jp/kaigirep/ship/index.html> (Accessed 2024/4/1)
- 13) 内閣府 (防災担当), 災害時多目的船 (病院船) に関する調査・検討報告書, 2013.3
- 14) 杉本貴司, 藤本秀文, 湯前宗太郎, ものづくり興亡記, 日経BP 日本経済新聞出版 (2024/3/5)
- 15) 基幹ロケットの再使用化による打ち上げコストの低減, 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門, <https://www.kenkai.jaxa.jp/research/rvx/rvx.html> (Accessed 2024/4/1)
- 16) 国土交通省; 造船業の国際競争力強化 https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk5_000014.html (Accessed 2024/4/1)
- 17) 日本財団: 無人運航船プロジェクト「MEGURI2040」, <https://www.nippon-foundation.or.jp/who/about/history/60years/1-topics-1-2> (Accessed 2024/4/1)
- 18) 大山 剛司, ICT活用工事 (河川浚渫工) の施工について: 関東地方整備局 荒川下流河川事務所 小名木川出張所, https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000746669.pdf (Accessed 2024/4/1)

2023年にClassNKが発行したガイドライン

開発本部 技術研究所

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

表1 2023年発行のガイドライン

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

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

コンテナ運搬船の追加火災対策のためのガイドライン（第1.0版）

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

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

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



風力を利用した船舶補助推進装置に関するガイドライン（第2.0版）

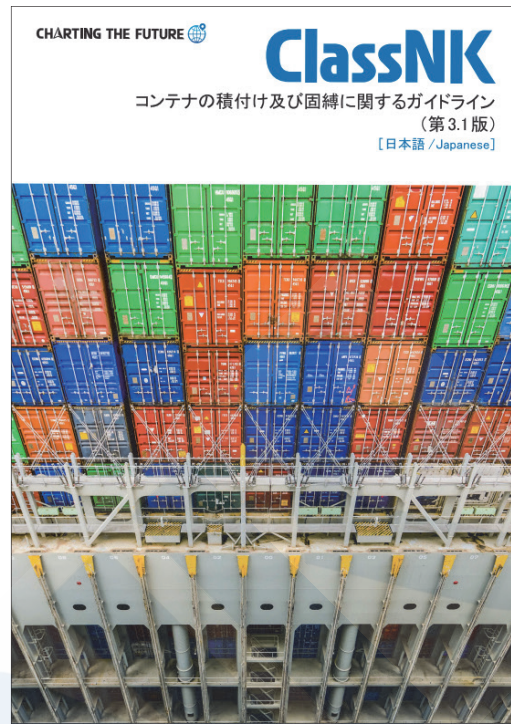
船舶の安全は国際条約や国内法、関連する規格等によって保証される一方で、風力推進装置について規定した条約類は存在しないのが現状である。そのため、本会では、2019年に「風力を利用した船舶補助推進装置の設計に関するガイドライン（初版）」を発行し、本ガイドラインを参照することで、風力補助推進システムの設計において考慮すべき設計要素を押さえることが可能になった。さらに、実プロジェクトを通じて得られた知見を反映し、2023年4月に第2版として大幅にガイドラインを更新した。第2版では、風力補助推進システム設計者と船舶設計者の両者が分かり易いようにガイドライン全体の構成を見直し、「風力装置」、「搭載船」、「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



コンテナの積付け及び固縛に関するガイドライン（第3.1版）

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

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



パラメトリックロール対策のためのガイドライン（第1.0版）

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

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



電子ログブックに関するガイドライン（第1.0版）

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



直接荷重解析に基づく強度評価ガイドライン（第3版）

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

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

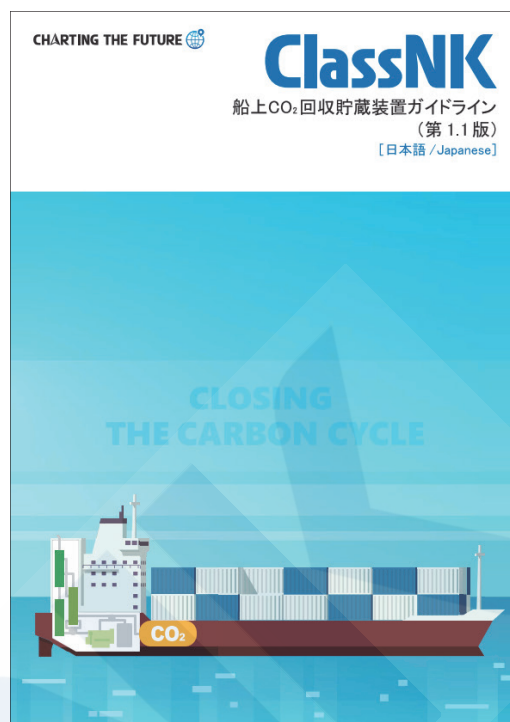


船上CO₂回収貯蔵装置ガイドライン（第1.1版）

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

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

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



電気自動車安全輸送ガイドライン（第1.0版）

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

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

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

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

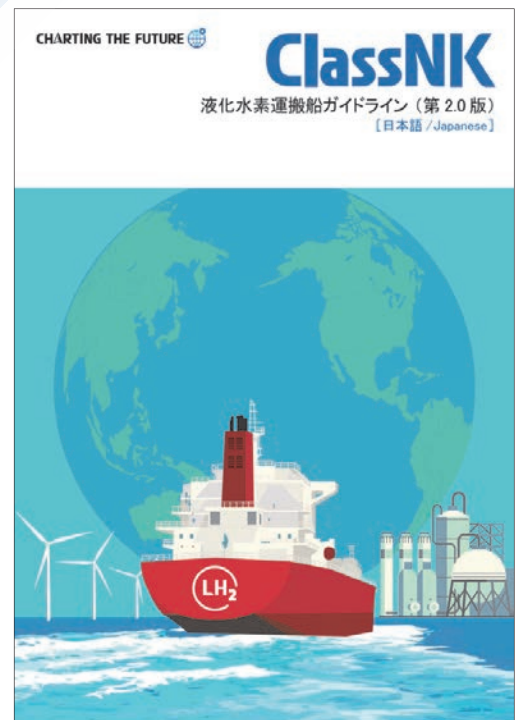


液化水素運搬船ガイドライン（第2.0版）

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

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

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



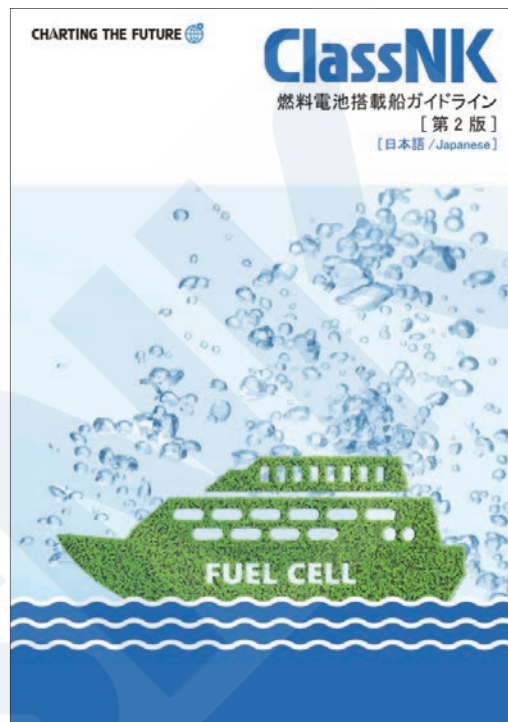
に、附属書に、個別プロジェクトごとに要求されるリスク評価のプロセスの指針および潜在的な危険源への対策検討の指針を追加することで、ユーザーにとってより実用的なものとなっている。

燃料電池搭載船ガイドライン（第2版）

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

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

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



船舶に搭載される有害物質一覧表に関するガイドライン（Ver. 5.00）

2025年6月26日に発効するシブプリサイクル条約において要求される有害物質一覧表（IHM）に関して、2023年7月に開催された第80回 IMO海洋環境保護委員会（MEPC80）において、RESOLUTION MEPC.269(68)を改正するRESOLUTION MEPC.379(80)“2023 GUIDELINE FOR THE DEVELOPMENT OF THE INVENTORY OF HAZARDOUS MATERIALS”が採択された。改正内容は、2023年1月よりAFS条約において船体防汚塗料へのシブトリンの使用が制限されたことを受け、有害物質一覧表（IHM）に記載すべき有害物質としてシブトリンが追加された。Resolution MEPC.379(80)へ対応するため、2019年10月に発行した「船舶に搭載される有害物質一覧表に関するガイドライン（Ver.4.00）」を更新し、本ガイドラインをVer.5.00として発行した。



船舶水中騒音ガイドライン（第1.0版）

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

本稿末に本ガイドラインの概説を示す。



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

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

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

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



バイオ燃料使用に向けたテクニカルガイド（第1.1版）

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

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

本稿末に本ガイドラインの概説を示す。



船舶水中騒音ガイドライン概説

金子 博文*, 上入佐 光*

1. はじめに

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

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

2. 水中騒音について

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

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

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

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

音圧レベルはその発生源から1mの距離におけるレベルに換算される。

3. ガイドラインの概要

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

3.1 設計要件

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

3.1.1 船体

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

3.1.2 プロペラ

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

3.1.3 主機及び補機等

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

3.2 水中騒音計測

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

3.2.1 計測箇所

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

* 開発本部 技術研究所

3.2.2 計測条件

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

3.2.3 計測手順

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

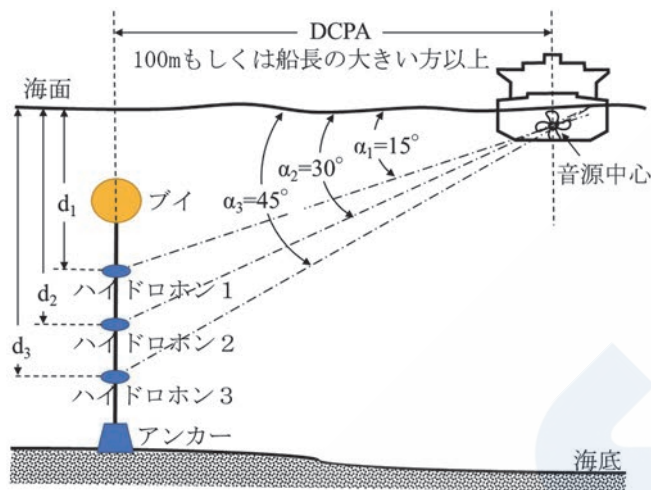


図1 着底式設置例

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

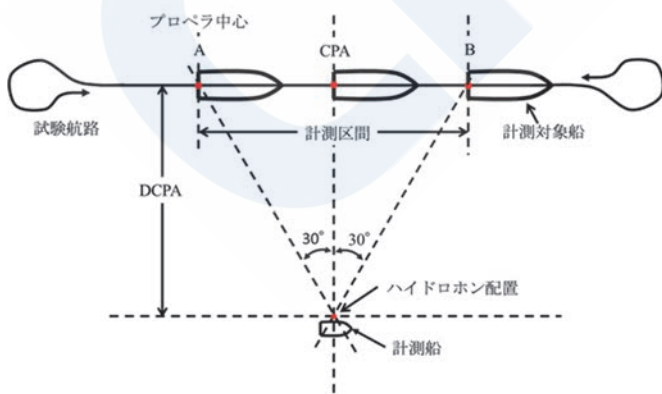


図2 水中騒音測定構成（試験航路等）

3.2.4 分析方法

狭帯域分析（1Hz毎）及び1/3オクターブ分析を

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

3.2.5 評価基準

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

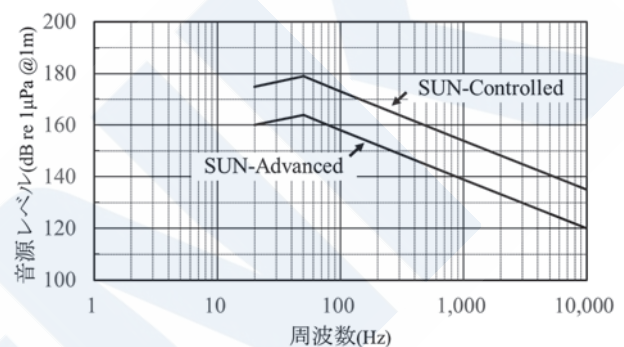


図3 基準騒音レベル（1/3オクターブバンド）

4. まとめ

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

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

船用燃料としてのバイオ燃料油

十倉 拓也*

1. はじめに

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

2. バイオ燃料油のニーズ

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

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

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

2.1 バイオ燃料油によるGHG排出削減

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

2.2 バイオ燃料油の使用動機

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

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

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

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

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

* 開発本部 技術研究所

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

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

3. バイオブレンド燃料油の性状特徴

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

3.1 バイオ燃料油の特徴

前述の通りバイオ燃料油はSVO, FAME, HVOに分類される。

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

また、各バイオ燃料油のサンプルを撮影したものを図1に示す。

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

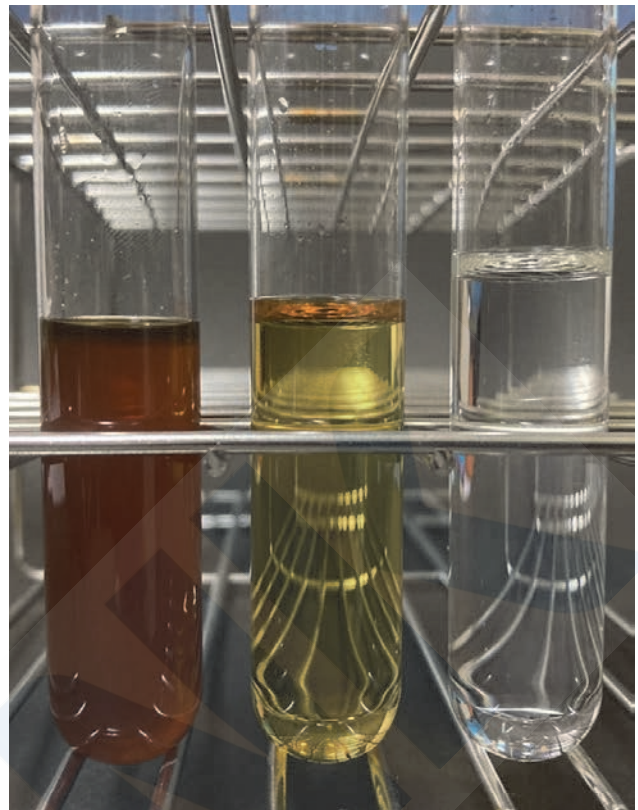


図1 各バイオ燃料油サンプル（全て6g／左からSVO（廃食油）、廃食油FAME、HVO）

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

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

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

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

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

3.2 VLSFOの特徴

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

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

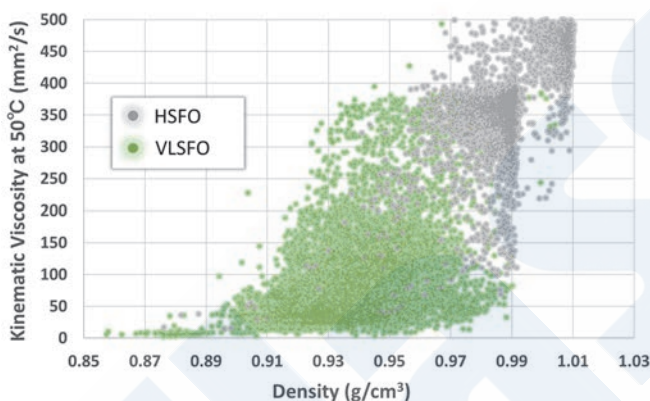


図2 HSFOとVLSFOの密度－動粘度分布

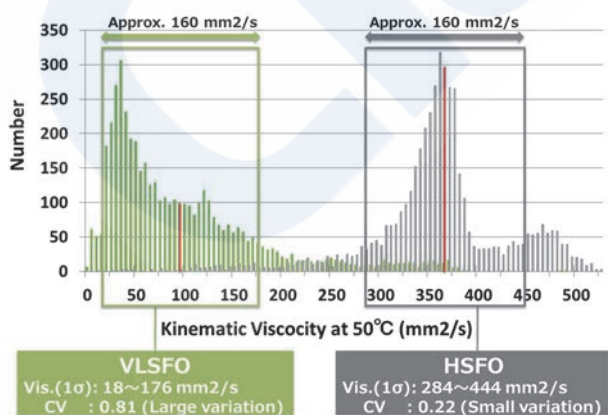


図3 HSFOとVLSFOの動粘度毎の件数分布

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

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

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

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

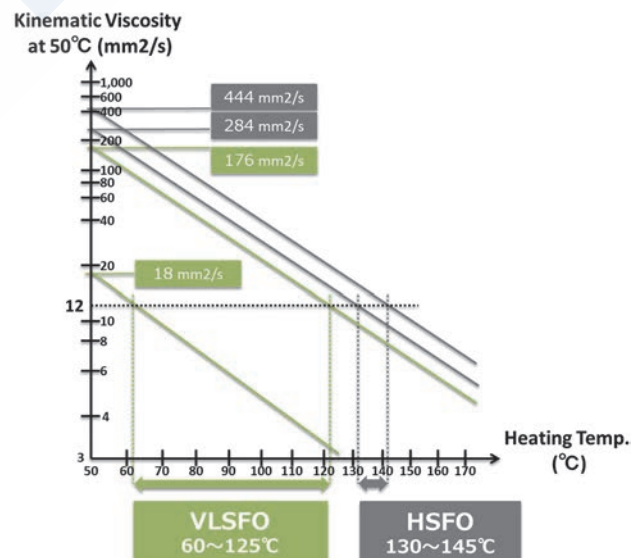


図4 HSFOとVLSFOの加熱温度範囲

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

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

4. バイオブレンド燃料油の使用対策

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

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

4.1 船舶の機関設備対応

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

4.2 トラブル燃料を避けるための対策

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

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

4.3 貯蔵時や使用時の対策

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

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

4.4 使用対策まとめ

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

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

5. おわりに

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

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

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

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

引用文献

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

ClassNK 技報

No.9(2024 年(I))

編集: 石橋 公也

発行: 一般財団法人 日本海事協会 開発本部 技術研究所

〒102-0094 東京都千代田区紀尾井町 3 番 3 号

TEL: 03-5226-2737

E-mail: ri@classnk.or.jp

印刷: 大日本印刷株式会社

〒162-8001 東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 1 番 1 号

03-3266-2111

本誌に掲載された全ての記事内容は、一般財団法人 日本海事協会の許可なく転載・複写することはできません。

記事の転載をご希望の方は、上記までご連絡ください。

© 2024 ClassNK



一般財団法人 日本海事協会
技術研究所

〒102-0094 東京都千代田区紀尾井町 3 番 3 号

Tel : 03-5226-2737

Fax : 03-5226-2736

E-mail : ri@classnk.or.jp

www.classnk.or.jp