

9 新コンセプト船を支えるリスク解析技術に関する研究

三宅 里奈*, 伊藤 博子*, 木村 新太*, 塩苺 恵*,
柚井 智洋*, 大西 世紀*

Research on risk analysis techniques for new concept ships

by

MIYAKE Rina, ITOH Hiroko, KIMURA Arata, SHIOKARI Megumi,
YUZUI Tomohiro and OHNISHI Seiki

Abstract

The introduction of alternative fuels to reduce greenhouse gas (GHG) emissions and the development of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) have been progressing worldwide. To ensure the safety of such new design concepts for ships, frameworks are necessary for analyzing and evaluating the safety of the relevant technologies. In the first-term plan of NMRI, the primary aims were to ensure the safety of the ships with new cargoes and fuels, ship navigation, and MASS. To ensure the safety of the ships with new cargoes and fuels, particularly liquefied hydrogen carriers (LHCs), we have contributed to the realization of such new concept ships through the establishment and instruction of risk assessment methods, including guidelines and standard methods. For ship navigation safety, we conducted research on the construction of safety measures for maritime traffic and contributed to the implementation of recommended routes in two congested coastal waters through joint research with the Japan Coast Guard. To ensure the safety of MASS, we conducted research on MASS risk assessment techniques, including MASS modeling methods necessary for analysis. The findings were utilized to promote the utilization of the guidelines from the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, and contributed to discussions on the creation of international regulations. The second-term plan will succeed a part of the first-term plan, and effort to ensure the safety of the MASS and new kinds of cargo/alternative fuel ships using mainly hydrogen and ammonia, and to support their operations. This paper presents the outcomes of the first-term plan and the outline of the second-term plan.

* 海洋リスク評価系

原稿受付 令和 5年 4月 28日

審査日 令和 5年 5月 22日

1. はじめに

安全安心な社会の実現のため、船舶には適切な安全規制の構築が求められる一方、安全対策にかかるコストへの懸念があることから、国際海事機関（IMO）では、船舶の安全性向上と社会的負担のバランスを確保する合理的な安全規制体系の構築が追求されてきた。さらに、近年、GHG（温室効果ガス）削減のための代替燃料の導入や、自動運航船の開発への取り組みが世界的に行われ、従来の想定を超える自由な設計に対応する手段として、既往の規則に従う代わりにそれらに従う従来船舶と同等の安全性が維持されていることを示すことで、新しい設計を受容する代替設計承認の考え方を適用する動きが広がっている。そのため、対象となる技術の安全性を示すための枠組みが必要となっている。本論では、第1期中長期計画の成果を概観し、第2期中長期計画の概要を紹介する。なお、本論では、自動運航船等、既存の規則やガイドラインの適用が困難であるこれまでに実績が無い技術を導入した船舶を新コンセプト船と呼ぶ。

2. 第1期中長期計画における取り組み

第1期中長期計画では、当初、新コンセプト船として新規貨物・燃料の船舶の設計とそれらの運航環境をターゲットに取り組みを始めた。前者では、日本海事協会によるガス燃料船のリスク評価ガイドライン¹⁾、国土交通省による自動車運搬船の火災安全に関する通達、日本船舶技術協会による燃料電池船の代替設計に関するリスク評価法などの形で社会実装を行い、燃料電池船等の各種の新コンセプト船の実現に向けて貢献してきた。後者では、海上保安庁による第4次交通ビジョンの主要な取り組みである準ふくそう海域（東京湾湾口～石廊崎沖～伊勢湾湾口～潮岬沖～室戸岬沖～足摺岬沖の各海域を経て瀬戸内海に至る海域）の安全対策として、同計画期間の少し前から開始した取り組みを結実させ、多くの国際船舶が使用する海域二か所における推薦航路設置に貢献した。また期間中における自動運航船への国内外の取り組みの急加速を受けて、自動運航船のための安全性の確保と国際規則策定に向けた議論への参画のため、自動運航船のリスク解析手法を開発した。その手順等を纏めた「自動運航船のリスク解析手順書」²⁾は日本船舶技術研究協会のHP上で公開されるとともに国土交通省による自動運航船に関する安全ガイドラインから参照されるに至った。

2.1 新規燃料、新形式船等に係るリスク評価手法の開発

第1期中長期計画の期間は、低炭素社会の実現及び船舶からのSOx排出削減対策として、従来技術である液化天然ガス運搬船の技術開発はもとより、液化水素運搬船のような新形式船の技術開発や硫黄を含まない液化ガスの燃料利用のための研究開発が盛んに行われた時期である。本研究では、これらの動向に対応するため液化水素運搬船の定量的リスク解析手法を開発するとともに、新規燃料の使用に伴う機関室内での火災安全対策のための換気効率解析手法の開発に取り組んだ。

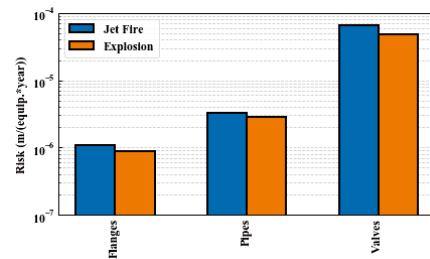
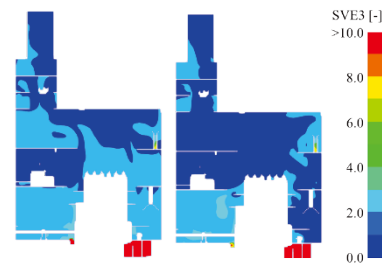
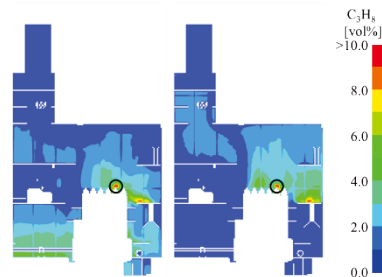


図-1 機器別のリスクの推定結果³⁾



(a) 水平方向 (b) 鉛直方向

図-2 船体中央断面におけるSVE3値の分布



(a) 水平方向 (b) 鉛直方向

図-3 船体中央断面におけるプロパン濃度の分布⁷⁾

(図中黒丸の位置を放出源とする)

液化水素運搬船のリスクの特徴として、極低温（約-253℃）の液体水素を取り扱うことはもとより、既存の技術システムである液化天然ガス運搬船と比較して極めて燃えやすい性質を持つこと由来するリスクシナリオが報告されている。これらは、何らかのトラブル等によって設備等から漏えいし、空気と混合することで着火・爆発し甚大な被害をもたらすことを想定したものである。したがって、本研究では水素の漏えい・着火に伴う噴出火炎及びガス爆発事象を対象とした定量的リスク解析手法の開発を行い、各水素取り扱い設備の漏えい穴径と発生頻度の特徴によって、図-1のように定量的なリスクに違いがみられることを明らかにした³⁾。

新規燃料を使用する機関室では、火災安全対策としてIGFコードに基づいて1時間あたり30回の換気が求められる。一方で、換気ダクトから供給される気流は主機を含めた様々な設備が障害物となって複雑な性状となるため、Seidelの式に代表される室内化学物質の簡易的な換気効率評価手法⁴⁾では、漏えいした燃料ガスの局所的な滞留のしやすさを評価することは困難である。漏えいガスの滞留、着火、爆発を予防するためには、機関室内の換気の改善が必要であり、そのた

めの換気効率評価指標が必要となるものの、このような広大な区画における換気効率評価に関する既往の報告はほとんどない。本研究では、計算流体力学コードを用いた仮想的な機関室モデル⁹⁾内における換気解析を行い、陸上建築の空調衛生工学分野で用いられる換気効率評価指標の1つである Scale of Ventilation Efficiency (SVE) 指標⁹⁾の適用性について検討を行った。換気口より供給される空気を基準値0として、任意地点における空気の汚染度を表す空気齢に相当する指標 (SVE3) を用いて換気効率の評価を行った。図-2に船体中央断面における、換気供給口の向きが異なる2つのケースの SVE3 値の結果を示す。SVE3 の値が0に近い(青色)ほど空気齢が若く、高い(赤色)ほどその地点の空気が留まっております。この結果より、換気供給口が船体中央の主機に向かって水平方向に放出される条件(a)のほうが床面に向かって放出される(b)よりも換気効率が悪くなる傾向が得られた。この結果の妥当性を確認するため、著者が過去に実施した同機関室モデルを用いたプロパンガスの漏えい・換気シミュレーションの結果⁷⁾と比較を行った。図-3に準定常的な拡散状態に至った時点の船体中央断面におけるプロパンガス濃度分布を示す。(a)の水平方向の換気条件において、下層側まで広範囲にプロパンガスが滞留している結果が得られており、SVE3 の評価結果が妥当であることが分かった。

7年間の期間において研究活動と並行して IMO/CCC 小委員会における液化水素運搬船の暫定要件の策定、日本海事協会のガス燃料船のリスク評価ガイドライン¹⁾、水素燃料電池船におけるベント配置に関する代替設計の同等性安全性証明のための標準手法の開発など、新規燃料及び新形式船の社会実装のための基準策定に貢献した。

2.2 船舶交通流の制御とその影響評価法に関する研究

海難は日本周辺においては毎年約2,000件程度発生し、商船(貨物船、タンカー、旅客船)では約300件発生している。そのうち衝突は約35%と最も多い⁸⁾。海上保安庁では、海上安全政策の方向性及び具体的な施策を提示する「交通ビジョン」として、第3次交通ビジョン(2013年策定)及び第4次交通ビジョン(2018年策定)において準ふくそう海域における安全対策の構築を課題の一つとして掲げた。当所はこれら交通ビジョンの成果を創出するため、第1期中長期計画期間においては、2018年に導入された伊豆大島西岸沖の推薦航路⁹⁾、¹⁰⁾のフォローアップ研究¹¹⁾を行いつつ、続く第2の安全対策として、衝突が多いとされる潮岬沖における安全対策の構築¹²⁾に関する研究を海上保安庁と共同で実施するとともに、要素技術として海域の衝突リスク評価手法の開発を進めてきた。

潮岬沖の海域における交通状況を把握するため、AIS データ解析及び衝突状況の分析を実施した。これにより、潮岬沖は、西は大阪湾・高知沖を、東は伊勢湾・伊豆半島沖を基点とする東西交通が行き交う場所であり、AIS 搭載船だけで毎日約240隻通航し、その約75%が潮岬沖灯台から3NM

(5,556m) 以内の海域を通航していることが確認された。通航量に比例して衝突も多く、商船が関係する衝突が2007年から2016年の10年間で19件発生しており、商船同士の衝突はそのうち5件でいずれも反航での状況であった。これらを鑑み、法的強制力はないものの、海図に記載が可能な SOLAS 条約に基づく推薦航路により、東西交通を分離・整流化すれば、結果として衝突を予防できると予想された。

推薦航路の設計においては、前述のフォローアップ研究からの知見をもとに、航行の目安となる灯台との位置関係を考慮して現状の交通における針路・通航位置からの変位量を抑えた基線(推薦航路の中心線)の位置・角度・長さを設定し、陸からの距離を変えた候補を3案作成した。推薦航路による影響を評価するため、AIS 非搭載船を含めた交通流の変化モデル¹³⁾に基づき、交通流シミュレーションにより各案を導入した場合の将来の航跡及び比較資料となる現状航跡を生成した。これらを用いて、遭遇頻度と Obstacle Zone by Target (OZT) により衝突しうる危険な遭遇の発生を評価した。

図-4は、商船の交通のみを対象とした遭遇頻度の効果の予測である。左は現状を、右は3候補のうちの最適案である。推薦航路により、遭遇頻度ベースで危険な遭遇の発生が約70%に抑制できると予想された。なお、当該海域の交通流は反航がメインであったため、反航状態での遭遇頻度により評価を行ったが、追越しや横切りが多い交通下での評価手法も要素技術として開発済みである¹⁴⁾。

本研究の結果は、国内の有識者委員会で同意形成され、IMO/NCSR の審議を経て、2022年11月のMSC106にて2023年6月1日からの運用開始が決定された¹⁵⁾(図-5)。この推薦航路によって、潮岬沖の交通が整流化され、反航する商船同士の衝突の危険性が抑制されるだけでなく、整流化の副次的効果として漁船が見張りを行う主たる方向が明確になり、漁船の安全が向上できると期待される。

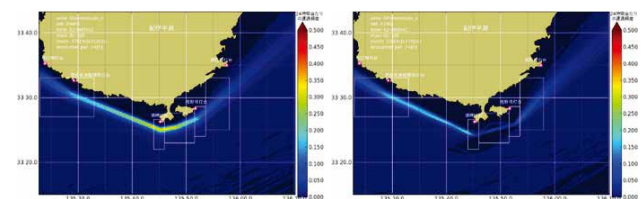


図-4 遭遇頻度による整流化の効果の予測(商船のみ)

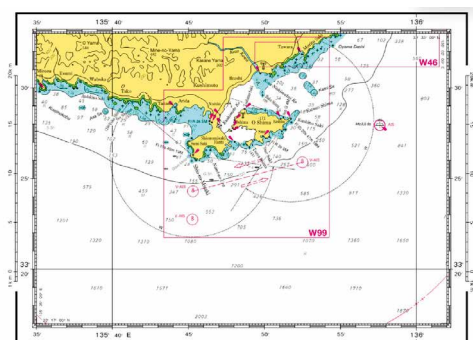


図-5 潮岬沖の推薦航路¹⁶⁾

2.3 自動運航船のリスク評価手法に関する研究

自動運航船の実用化に向けた技術開発が進んでいるが、自動運航船のような大規模で複雑なシステムを構築する際には、設計初期段階において、運用上及び全体システムの構想上の重大なハザードがないか確認しておくことが重要である。それにより、その後の個別システムの詳細設計段階での手戻りを回避できると考えられる。ハザード同定を含め、リスク解析においては、解析対象の特徴を考慮した適切な手法を選定する必要がある。自動運航船のリスク解析においては、従来のハードウェア故障等のハザードに加え、人間及びソフトウェアが実行するタスクに関連するハザードも考慮する必要がある。プログラムのバグや、ソフトウェアシステムの作動条件に関連する問題、複数のソフトウェアシステム同士の相互作用等のソフトウェア特有の問題も考慮する必要がある。また、自動化システムの導入によって新たに生じるヒューマンエラー等の人的因子や、人間とソフトウェアシステムの相互作用も考慮が必要である。さらに、遠隔地からの制御や監視を行う場合、通信システムの問題等、遠隔操船所と船舶の相互作用に関するハザードも考慮する必要がある。従来のリスク解析手法は、主にハードウェア故障に焦点を当ててハザードを同定するものだが、自動運航船のハザードを漏れなく同定するためには、これらの特徴を考慮した新たな手法が必要となる。

そこで、これらの特徴を考慮し、自動運航船に適したリスク解析手法の開発を行った¹⁷⁾²¹⁾。この手法は、モデル化手法とハザード同定手法から成り、モデル化したシステム構成図を参照しながら、チェックリストとキーワードを用いてハザード同定を行う点に特徴がある²¹⁾。システム構成図は、自動運航船の全体システムの構成を、その構成要素であるハードウェア、ソフトウェア及び人間を含めてモデル化し、各構成要素のタスクとその実行に必要な情報、構成要素間の相互作用を含めて記述して作成する。これらの情報を1つの図にまとめて表現することで、解析者のシステム構成に関する理解を促すことができる。また、自動運航船のハザード同定に必要な観点を整理したチェックリストと、各構成要素のタスクの実行に関するハザード同定の手掛かりとなるキーワードを作成し、ハザード同定時に利用することで、自由なブレインストーミングよりも効率的かつ網羅的にハザードを同定することができる。一方、この手法では各構成要素のタスクの静的側面しか表現することができず、複数タスクの実行の順序や、タスク同士の相互関係等の動的側面を考慮したハザードの同定は難しい。この課題を解決するため、タスクの動的側面を表現するタスクフロー図を作成し、これを参照しながらハザード同定を行う手法も開発した²²⁾。システム構成図を参照してハザード同定を行う手法と併せて活用することにより、さらに網羅的なハザード同定が可能となる。

上記で開発した手法を利用して仮想の自動運航船のリスク解析を行い、ハザードの同定、各ハザードの原因と結果の分析及び対策の検討を行った^{19), 21), 23), 24)}。複数種類の自動運航船を想定して解析を試行したが、そのうちの1つの例とし

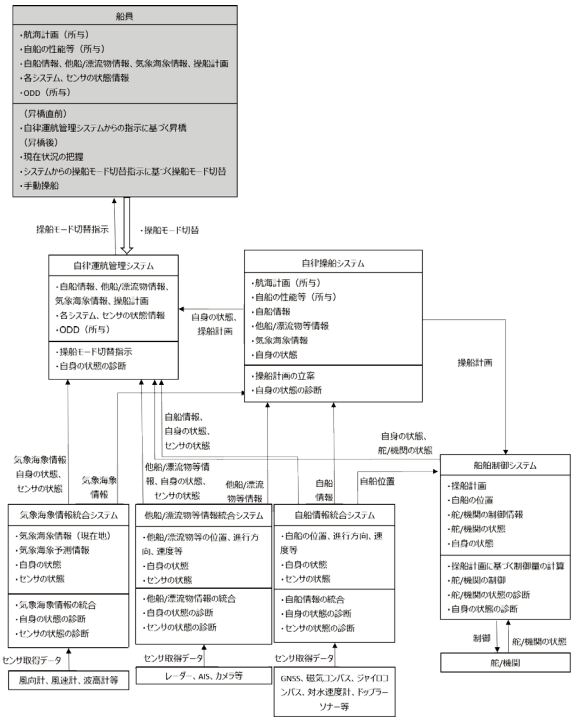


図-6 仮想の自動運航船のシステム構成図の一例

て、遠隔操船なしで港外航行のみを船舶側の自律性能により無人で操船する旅客船を想定して作成したシステム構成図を図-6に示す。これらの解析結果を踏まえて、自動運航船の通常運航時の機能要件案を作成した。状況把握や操船制御等の合計10個の主機能を定義した上で、各主機能の説明、主機能の動作確認機能、不具合発生時の機能、船員への提示機能及び事前検証に分類して作成・整理した。これらの機能要件案は、IMOで策定中の自動運航船の国際規則案に関する日本国内での検討において参考にされている。

また、上記の解析例を踏まえ、自動運航船のリスク解析手順書を作成した^{23), 25)}。英語版も作成し、海外の関係者からの参照の要望にも応えられるようにした。IMOのガイドライン²⁵⁾では自動運航船の実証実験実施前にリスク評価を行うことを求めている一方、具体的な評価方法や手順等は定められていないため、この手順書によって、国内外の自動運航船の開発を行う事業者等がリスク解析を実施する際の手助けとなることが期待される。

3. 第2期中長期計画における取り組み

第2期中長期計画では、第1期中長期計画の一部を継承し、自動運航船や新規貨物・燃料の船舶の安全性向上とそれらの運航支援をターゲットとした取り組みを行う。図-7に研究全体の概要を示す。前者については、自動運航船を主とした新概念船のリスク評価手法の構築、新規燃料が漏れいした場合の影響解析手法の構築、新規貨物のうち特に放射性物質の輸送に焦点をあてた安全評価手法の開発を行い、後者については航行船舶の運航支援・監視評価技術の開発を行う予定である。

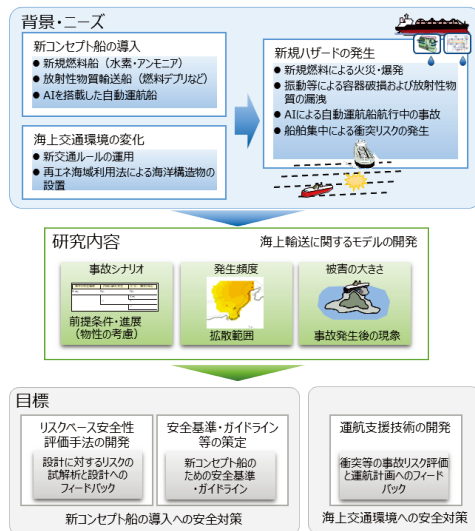


図-7 第2期中長期計画全体の概要

3.1 新コンセプト船のリスクベース安全性評価手法の開発

IMOにおける規則制定時に定性的リスク評価を実施し、その結果を参考に安全要件を策定する事例や、IMOや船級等の規則/ガイドライン等において設計時に定性的リスク評価を要求する例が増加しており、新コンセプト船の実用化のためには、それらの船舶に対する定性的リスク評価を効率的に実施する手法が必要である。また、新コンセプト船を代替設計の同等安全性評価により主管庁承認するためや、保険料の検討及び費用対効果の高い安全対策の検討等を実施するためには、それらの船舶に対する定量的なリスク値が必要であり、リスク値を定量的に算定するための手法が必要である。そこで本研究では、(1)新コンセプト船の定性的リスク評価を効率的に実施する手法の開発と(2)定量的リスク評価手法の開発を実施する。

(1)では、新コンセプト船の安全要件を抽出するために、大規模・複雑システムに対するシステム構成や運用方法をモデリングする手法及びそれらを用いてハザード等を系統的に導出する手法を開発し、評価事例等をガイドライン等として整備する。第1期では主に通常オペレーションや静的な状態を想定したモデリング手法とハザード解析手法を開発したが、第2期では緊急オペレーションや動的な状態を想定したモデリング手法とハザード解析手法を開発する。

(2)では、新コンセプト船の事故シナリオを Bayesian Network 等によりモデル化し、そのリスクを定量的に推定する手法を開発する。具体的には、自動運航船等の衝突や座礁等のリスクモデルを構築し、リスクを定量的に推定する。それらを既存船舶の定量的リスク評価結果と比較し、同等安全性評価手法を確立する。

3.2 新規燃料船に係る影響解析手法の開発

現行規則にない新規燃料船は、代替設計の同等安全性評価に基づく主管庁承認のプロセスを経て社会実装が実現されるため、安全性評価法の一つであるリスクベースアプローチ

に基づく同等安全性評価手法の開発が求められている。一方、これらの新規燃料は他産業において要素技術としての実績があるものの船舶としての実績がないことから、同等安全性評価に関する実績もなく、同時にパイロットプロジェクト等への基準適用においても支障をきたすケースが発生している。新規燃料船のリスク分析の実務や、基準策定の基礎となる科学的エビデンスの獲得を目的とする、可燃性・有害性のある燃料漏洩に伴う拡散・火災・爆発・急性毒性による影響予測の実用的手法に対する需要が高まっており、その開発が急務となっている。そこで、本研究では、(1)物理化学現象を考慮した大気拡散解析に関する研究及び、(2)火災・爆発に伴う影響度解析手法に関する研究に取り組む。

ゼロエミッション燃料として期待されるアンモニアは水との反応により凝縮し、一方、気化して間もない極低温水素は周囲の空気を凝縮させるため、両者は複雑な拡散性状を示す。(1)の研究では、漏洩した燃料ガスと大気中の水分の化学反応及び空気の凝縮等の熱力学的平衡を考慮した大気拡散解析コードを構築し、同等安全性評価法に実装する。(2)の研究では、船内で漏えいした水素やアンモニア等の GHG 対応燃料の着火時における、燃料火災に伴う輻射熱及び爆風圧による影響度詳細解析コードを構築し、同等安全性評価法に組み込む。

3.3 放射性物質輸送に対応する安全性確保の研究

GHG 排出削減対策としての原子力活用の見直しにより、現在放射性物質の海上輸送の増加が予定されている。また、今後の輸送では、解体廃棄物や溶融燃料あるいは移動可能な原子炉など従来と異なる取り扱いが必要となる輸送が生じることが予想されており、これらを対象とした安全評価手法の開発と安全基準等の確立が必要である。

このため、今後発生し得る放射性物質の輸送計画及び輸送物の調査を行い、対象輸送物の工学的仕様（構造・伝熱・閉込め・放射線）、輸送方法及び関係法規等の輸送安全に係る情報を整理する。特に高レベル廃棄物等は国際輸送が発生し得るため、米国電力研究所の主宰する Extended Storage Collaboration Program (ESCP)で実施される核燃料輸送物（MPC 収蔵キャスク）の実機振動試験及び線量ベンチマーク解析に参加して、核燃料輸送の国際的な課題を把握するとともに安全解析コードの検証に資する知見を取得する。これらの知見に基づいて、従来からの海技研において開発したプログラム・データベースを再評価し、今後の活用及び改善を立案する計画となっている。

3.4 安全安心な海上交通環境の実現に関する研究

2.2 節で述べた通り、第1期中長期計画の成果として沿岸域に新たな推薦航路が2023年6月に導入される予定であり、海上保安庁の第5次交通ビジョン（2023年策定）²⁷⁾では、再エネ海域利用法施行を背景とした施設設置海域の海上交通の安全対策の策定が掲げられている。また自動運航船や従来船舶の運航を支援する安全運航の監視評価手法の確立が必

要である。そこで、本研究では、(1) 推薦航路導入に伴う船舶交通流の変化及びルールの実際の効果検証を行い、得られた知見に基づく衝突リスクの評価手法を基軸とする安全対策構築技術の高度化、(2) 船舶のためのデジタル基盤構築に関する技術及びデジタル基盤を活用した航行船舶の監視評価技術に関する開発を行う。

(1)では船舶交通の新ルールが導入された3つの海域において、単独海域及び連結海域での海上交通の変化を追跡評価し、交通ルールの効果の検証及びルール運用に伴う船舶交通流の変化モデルを考慮した海域及び船舶航行経路上の衝突リスク評価手法を開発する。(2)ではデジタル基盤を活用した地図情報として、船舶航行経路上の衝突リスク評価手法、また事故が発生しやすい気象・遭遇状況等の航行条件下における衝突の蓋然性予測手法を開発し、それらを提供するデジタル基盤を構築するための技術開発を行う計画となっている。

4. おわりに

本論では、GHG削減等を目的とした新コンセプト船の導入とその安全性向上に関する国際的な動向を背景に、新コンセプト船の安全性向上に資する研究や日本周辺海域における衝突事故低減を目的に運航環境の整備に資する研究に取り組んだ第1中長期計画の成果を示すとともに、第2期中長期計画の概要を紹介した。第2期中長期計画においても、国際規則の策定等、新コンセプト船の安全性向上及び安全運航への寄与を目指す予定である。

References

- 1) 日本海事協会：付属書2 ガス燃料船のリスク評価ガイドライン (2017).
- 2) 日本船舶技術研究協会、海上技術安全研究所：自動運航船のリスク解析手順書、<https://www.jstra.jp/PDF/c6130a35d13600d93599a1cc54856cbcef96301b.pdf>(参照日：2023年5月17日).
- 3) 柚井他：リスク評価技術の高度化—自動運航船と新規貨物・燃料船のリスク評価—、海技研報告、第22巻、別冊、(2022)、pp.75-80.
- 4) 福地他：船舶海洋工学シリーズ⑩ 船体艙装工学、(2012)、pp.147-152.
- 5) F. Stefanidis: Bulk Carrier Engine Room, <https://grabcad.com/fotios.stefanidis-1> (As of May 17, 2023).
- 6) 村上周三：CFDによる建築・都市の環境設計工学、(2000)、pp.183-199.
- 7) 木村他：代替燃料船における漏洩ガスの換気シミュレーション、日本マリンエンジニアリング学会誌、第56巻4号、(2021)、pp.638-645.
- 8) 海上保安庁：海難の現況と対策、https://www6.kaiho.mlit.go.jp/info/keihatsu/20220829_state_measure01.pdf(参照日：2023年5月17日).
- 9) 日本海難防止協会：伊豆大島西方海域における安全対策の構築に関する調査研究報告書 (2016).
- 10) R. Miyake and H. Itoh: Design and Safety Assessment of Recommended Route off the Western Coast of Izu O Shima Island, *J. of Mar. Sci. and Eng.*, Vol. 10, No. 8 (2022), p. 1060.
- 11) H. Itoh and R. Miyake: Research on Change of Traffic Safety Accompanying the Implementation of a New Recommended Route, *Proc. of 8th ICCGS, Portugal* (2018), pp. 247-254.
- 12) 第五管区海上保安本部、神戸海難防止研究会：潮岬沖における安全対策の構築に関する調査研究報告書 (2020).
- 13) H. Itoh, Method for prediction of ship traffic behaviour and encounter frequency, *J. of Navigation*, Vol. 75, No. 1 (2022), pp. 106-123.
- 14) S. Kawashima, et al.: Calculation of the number of ship collision candidates using mesh-based estimation method for ship traffic data, *J. of Mar. Sci. and Tech.* (2022), pp. 1-19.
- 15) IMO document SN.1/Circ.342: Routeing measures other than traffic separation schemes (2022).
- 16) IMO document NCSR 9/3/2: Routeing measures and mandatory ship reporting systems, Establishment of a recommended route off Cape Shio-no-Misaki, Japan (2022).
- 17) 塩荊他：自動運航船のリスク解析手法の構築に向けて、日本船舶海洋工学学会講演会論文集、第30号、(2020)、pp.393-396.
- 18) 塩荊他：自動運航船のリスク解析手法の構築に向けた試み、海上技術安全研究所研究発表会 HP、(2020)、pp.97-98.
- 19) 塩荊他：システムモデリングによるリスク解析手法の自動運航船の概念設計への適用、日本船舶海洋工学学会講演会論文集第32号、(2021)、pp.355-366.
- 20) 伊藤他：自動運航システムのリスク評価、*ClassNK 技報 No.4* (2021)、pp.9-18.
- 21) M. Shiokari et al.: Structure Model-Based Hazard Identification Method for Autonomous Ships, *Reliability Engineering & System Safety* (under review).
- 22) R. Miyake et al.: Application of Dynamic-Task-Based Hazard Identification Method to Remote Operation of Experimental Ship Shinpo, *Proc. of ICMAS/MTEC 2022* (2022).
- 23) 石村他：仮想の自動運航船を対象とした安全性評価、海上技術安全研究所研究発表会 HP、pp.85-86、2021.
- 24) 石村：仮想の自動運航船を対象としたタスクベースのハザード抽出について、第91回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、(2021)、pp.169-170.
- 25) 柚井他：自動運航船のリスク解析手順書の開発、日本船舶海洋工学学会講演会論文集、第34号、(2022)、pp.193-194.
- 26) IMO document MSC.1/Circ.1604, Interim guidelines for MASS trials (2019).
- 27) 海上保安庁：第5次交通ビジョン、<https://www.kaiho.mlit.go.jp/seisaku/5thkotsuvisision.html> (参照日：2023年5月17日).