

5 環境・動力系における GHG 削減・環境保全への取り組み

益田 晶子*, 浅見 光史*, 平田 宏一*, 高橋 千織*

GHG Reduction and Environmental Conservation in Marine Environment & Engine System Department

by

MASUDA Akiko, ASAMI Mitsufumi, HIRATA Koichi
and TAKAHASHI Chiori

Abstract

The Marine Environment & Engine System Department has been engaged in a research project to reduce greenhouse gas (GHG) emissions from ships. This paper describes the progress of the project over the past seven years and future prospects for the next seven years. The latter consists of six sub-themes, of which sub-themes 3, 4, and 5 are summarized below. Sub-theme 3 aims to establish reliable measurement, analysis, and after-treatment methods to deal with the more complex emissions caused by next-generation fuels. The goal of sub-theme 4 is to advance technologies for evaluating the impact of ship-induced substances on the marine environment, management and optimization technologies for antifouling systems, and monitoring methods for estimating harmful emissions from ships. Sub-theme 5 will investigate the practicality of various technologies that contribute to GHG reduction and carbon neutrality and contribute to the construction of ships that use hydrogen and other carbon-free fuels in cooperation with ship companies.

* 環境・動力系

原稿受付 令和 5年 4月 27日

審査日 令和 5年 5月 23日

1. はじめに

海上・港湾・航空技術研究所、海上技術安全研究所の中長期計画第1期において環境・動力系は、2022年度までに実施した重点研究☆4「船舶から排出される大気汚染物質に関わる環境対策技術に関する研究」、重点研究☆8「船舶に起因する海洋汚染防止技術及び生態系影響評価に関する研究」にて、船舶から排出される環境影響物質の計測技術や削減技術の評価、船舶に起因する汚染物質の環境影響評価、船底防汚塗料に関する研究に取り組んできた。また重点研究☆7「多様なエネルギー源等を用いた新たな船用動力システムの開発に関する研究」においては代替燃料である水素やアンモニアなどの船舶適用性に関する研究に取り組んできた。

本発表では環境・動力系が今年度からの中長期計画第2期で取り組む重点研究6「GHG削減技術の高度化および安全・環境対策に関する研究」(図-1)の概略を説明する。そして当重点研究において実施される研究項目のうち、次世代燃料使用における安全・環境評価技術(小項目3)、船舶運航における環境影響評価技術の高度化(同4)、内航・外航海運の省エネ化・GHG削減対策に資する普及・実用技術の研究課題(同5)について過去の成果を踏まえた今後の研究の展望を概説する。なお同じく当重点研究に該当するエンジン燃焼及び関連技術に関する研究課題(小項目1, 2, 及び3の一部)については、別途報告する「GHG削減に向けた代替燃料燃焼技術に関する研究の展望¹⁾」を参照していただきたい。

2. 重点研究の概要

重点研究6「GHG削減技術の高度化および安全・環境対策に関する研究」は、6つの小項目からなる。

・小項目1「水素・アンモニア燃料エンジン等の専焼コンセプトの開発」では、水素やアンモニアを燃料とする実機開発の基礎研究として、燃料噴射制御の高度化、水素専焼(一種類の燃料供給による機関内燃焼)にむけた運転制御最適化、アンモニア専焼の研究などに取り組む。

・小項目2「次世代燃料のエンジン燃焼解析技術の高度化」では、船用2-ストロークエンジンを模擬した大型燃焼試験装置等を開発し、燃焼状態を可視化する。実機実現に先駆け、燃料の噴霧状態や燃焼状態の最適化をめざす。

・小項目3「次世代燃料使用における安全・環境評価技術」では、既存燃料と混ぜて利用可能な液体次世代燃料(ドロップイン燃料)の着火性評価や、当燃料の使用によって生じる排出有害物質の評価技術を確認する。またエンジン技術での削減効果を補う排出物の後処理手法の高度化にも取り組む。

・小項目4「船舶運航における環境影響評価技術の高度化」では、船舶由来の化学物質が海洋環境・大気環境に与える影響を評価する技術を高度化する。また船体防汚塗料の評価手法として、目視できないレベルの汚損を評価する光学的手法を確認する。この光学的手法のパラメータと付着物の生物種分析との相関関係を蓄積し、新たな評価指標の基礎データとする。さらに排ガス浄化装置(EGCS: Exhaust Gas Cleaning Systems)排水の濁度計測の研究を行い、船上濁度モニタリ

ングの課題を解決する。特に船体防汚塗料の評価手法や濁度計測手法は国際標準化機構(ISO)規格とすることを旨とする。

・小項目5「内航・外航海運の省エネ化・GHG削減対策に資する普及・実用技術」では、停泊時・荷役時の省エネ、運航効率改善、離着陸時間の短縮などの複数の技術を連携させた「連携型省エネ船」に関する技術開発を行う。また、カーボンニュートラル燃料とカーボンフリー燃料の利用技術、船上CO₂回収技術の適用性検討のための研究を行う。

・小項目6「重油のエマルジョン化による流動促進化及び回収技術の開発(港湾空港技術研究所との連携研究)」では、沈没船等から油を回収する際の技術として、重質油と水のエマルジョン化技術、油回収管内の流動挙動の制御技術、回収したエマルジョンの高効率油水分離技術の開発に取り組む。

3. 次世代燃料使用における安全・環境評価技術 (小項目3)

3.1 これまでの取り組み

これまで船舶から排出される環境影響物質を低減するため、ディーゼル機関や船底防汚塗料などの排出源から大気および海洋環境中に排出される環境負荷物質などの分析・計測を行ってきた。これらの分析結果は、後述する4章の環境影響評価のための基礎データとしても活用した。対象とする化学物質は多岐にわたり、排出実態を定量的に評価するためには、固相・液相・気相の試料に対し、サンプリングも含めた計測手法や分析技術の構築が必要となる。さらに、環境中での環境影響物質の化学的変化や動態を明らかにするなどの研究も実施してきた。

中長期計画第1期において、最も大きな研究課題となったのは、燃料油中の硫黄規制強化に対応するものである。大幅な硫黄分の削減によって燃料基材や製法が変化することで、燃料油の物性も大きく変わると予測されていた。そこで、規制適合油の性状動向の調査及びその性状変化が船舶での使用条件に与える影響(着火・燃焼性、低粘度化と高流動点化、安定性など)についてラボ試験を行った。さらに実船トライアルも実施し、船舶で使用するにあたって必要となる対策や留意事項について確認した²⁾。また、燃料組成の変化に着目し、排ガス中の粒子状物質(PM)やブラックカーボン(BC)の計測技術の高度化を図り、燃料油やエンジンの運転条件が変化したときのPMやBC排出量について調査した³⁾。

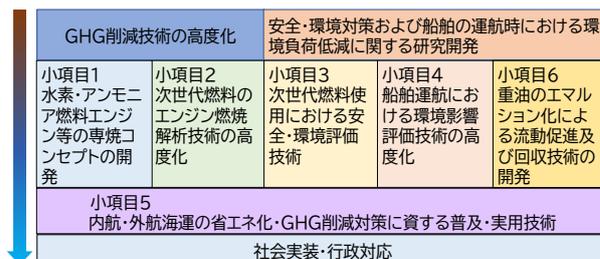


図-1 重点研究6「GHG削減技術の高度化および安全・環境対策に関する研究」の枠組み

PMについては、携帯可能な希釈トンネルの開発（図-2）により、外部での計測実験にも対応できるようになった⁴⁾。また、炭素成分（元素状炭素、有機炭素）、硫酸塩などの詳細な成分分析も行い、特に、重油を用いる船用機関から排出されるPM中の炭素成分を分析するために、専用の熱分析プロトコル開発もおこなった⁵⁾。また燃料油中硫黄分規制対応の同等手段として認められたEGCSについては、内航船舶に搭載することを想定して、並行流ジェット式の小型EGCSを製作し、規制に対応できる脱硫性能を達成する条件を調査した内航船舶にも適用できるよう小型化を推進した。後述のとおり、EGCS排水を船外に排出する場合には、pH、濁度、多環芳香族炭化水素濃度のモニタリングが義務化されている。実際のEGCSの排水分析のほか、船上でのモニタリング法についても検討した。このような研究成果の一部は、国際海事機関（IMO）やISOにおける議論のための技術的データとしても活用されてきた。

3.2 展望

船舶におけるGHG削減対策の特徴として挙げられるのは、利用を期待される燃料の選択肢が、自動車や航空など他の運輸分野に比べて極めて多種にわたることである。特にゼロエミッションに向かう過渡期においては、既存の重油燃料との共用、段階的な混焼率の引き上げなどが考えられる。また、代替燃料自体も今まで使用経験のない燃料や化学物質を利用する可能性があるため、そのエミッションの組成は極めて複雑になることが予測される。このため、エミッションに起因する燃料組成、燃焼プロセス、触媒などを含む後処理システムの影響を評価することが課題である。計測・分析の観点から考えると、多種の化学物質について低濃度から高濃度まで信頼性の高い計測や分析を行う必要があり、信頼できる計測・分析手法の確立と解析技術の高度化を目指し、GHG削減、環境負荷低減に貢献していく予定である。

4. 船舶運航における環境影響評価技術の高度化 (小項目4)

4.1 これまでの取り組み

(1) 船舶由来物質の海洋環境への影響評価技術の高度化

人為起源の大気汚染物質の段階的規制強化を受け、主要な排出源の特定、および優先すべき排出量削減区分などを明らかにする役割を担う、船舶起源の大気汚染物質の排出量データ整備方法を高度化してきた。また、海洋環境に影響を及ぼす物質拡散に関して、拡散シミュレーションシステムを高度化し、実際の事故事象に基づく油拡散⁶⁾および自然現象に基づく海底火山の噴火に伴う軽石の移動検証⁷⁾により、予測結果が合理的であることを示した。

(2) 船体付着生物管理用防汚システムの管理・最適化

船体の生物付着を介した越境移動を課題として、IMOの船体生物付着管理に関するガイドラインの見直しが審議中である。現在、付着生物を防ぐため最も効果的な防汚技術は、

船底防汚塗料である。この防汚性能を適切に評価する国際的に標準化された手法を開発し、ISO 21716 シリーズとして発行してきた。実験室において、客観性および再現性のある試験データを取得するための仕様を定めたパート1、試験生物にフジツボ種のキプリス幼生を用いた試験法を記述したパート2、イガイ種の幼貝を用いた試験法を記述したパート3までは、制定済みである⁸⁾。引き続き、分光計測技術による藻類汚損の簡易検出手法の検討を行い、色空間パラメータを用いて藻類付着量を定量できることを見いだした。これを新規の、藻類を用いた船底防汚塗料性能評価試験法として、ISO 21716のパート4に組み込むため、ISO/TC8/SC2への追加提案に向けた審議の準備を行っているところである。これらは、船底防汚塗料の性能評価に関する試験法としては世界初の国際規格であり、現在IMOで審議中の船体付着生物管理ガイドラインにおける防汚システムにおいて、適切な管理方法として参照される可能性が高いと考えられる。

(3) 船舶由来の有害排出物量推計モニタリング手法

燃料油の硫黄分規制に対する同等措置として認められているEGCSからの排水については、IMOで定められたガイドラインにより排水の常時モニタリングが義務づけられ、規制燃料油の硫黄分規制に対する同等措置として認められているEGCSからの排水については、IMOで定められたガイドラ

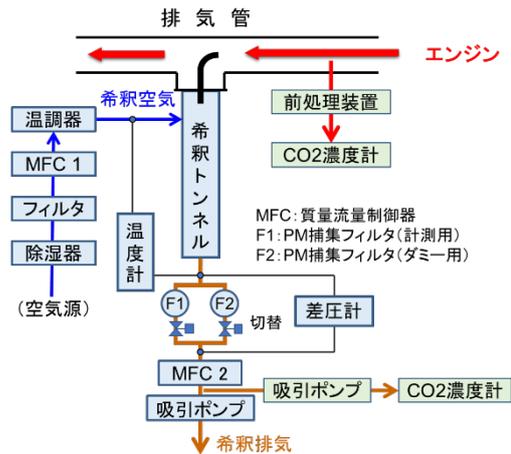


図-2 排ガス中の粒子状物質（PM）捕集システム

海洋における化学物質の移行

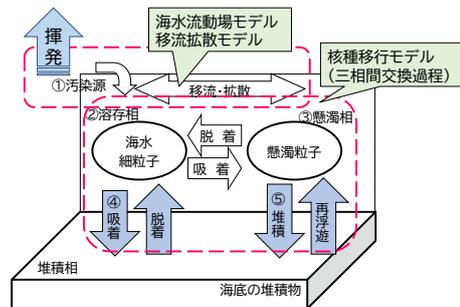


図-3 海洋における化学物質の移行を模示する三相間相互作用モデル

インにより排水の常時モニタリングが義務づけられ、規制値が設けられているところ、モニタリング項目のうち、pH計のISO規格を開発するとともに、濁度計規格開発のための予備試験を実施してきた。

4.2 展望

(1) 船舶由来物質の海洋環境への影響評価技術の高度化

従来開発を進めてきた排出量推計プログラムを、様々な船舶由来排出物に対応できるように拡張することを計画している。今年度は船舶から海洋へ排出される化学物質を対象として、対象物質の平均濃度を把握できるように海洋拡散シミュレーションプログラムを改良して、船舶からの定常的な排出、あるいは事故事象により予期せぬ積載物の漏洩により化学物質が海洋環境へ放出された場合の当該物質の輸送や化学変化を考慮した環境濃度を予測するモデル（環境運命予測モデル）を構築する。これは、海水に溶解あるいは軽い浮遊粒子に吸着して海水を移流拡散する溶存相、海底近傍で堆積と再浮遊を繰り返して移動する懸濁相、および堆積した後再浮遊せずにその場で埋没していく堆積相からなる三相間を環境依存の移行係数で時々刻々再分配されるモデルとなる（図-3）。物質の化学プロセスに対しては、この三相間モデルにさらに物質の分解および揮発が考慮される。これら各要素の影響は、海洋環境の温度、塩分、および粒子濃度により大きく変化し、また海流による移流拡散、あるいは風による乱流混合により、物質の運命がモデル化される。本研究では、船舶から定常的に海洋へ排出される物質を対象として、対象物質の平均濃度を把握できるように従来プログラムを高度化する。高度化したプログラムを実際の船舶排出物質に適用し、実現象の再現性を評価する。船舶から排出定常的に排出される物質の推計については、海技研で従来開発を進めてきた排出量推計プログラムを、種々の排出量推計に対応できるように高度化する。

(2) 船体付着生物管理用防汚システムの管理・最適化

船体付着生物ガイドラインへ対応するために、環境面に関しては水中洗浄の実現可能性に関する、船体保守・管理の面に関しては水中洗浄に伴う塗膜影響に関する、それぞれの調

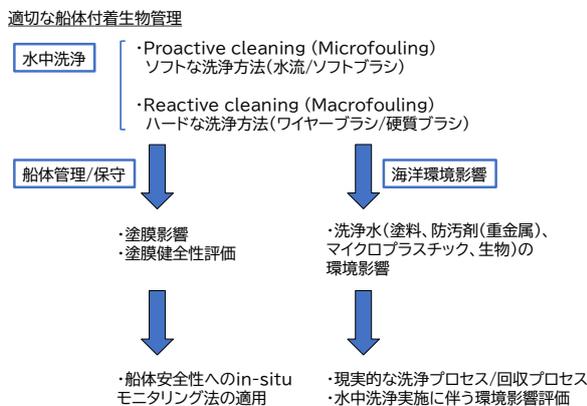


図-4 適切な船体付着生物の管理方法

査研究を行う。図-4に示すようにガイドラインでは、汚損度を程度別に数値で表しており、その値が1（微生物皮膜等による汚損状態）の場合、水中洗浄に発生する洗浄水の処理・回収を必要としない洗浄方法（Proactive cleaning）が採用される。この場合洗浄水には、塗料片、重金属、剥離生物、マイクロプラスチックからなる様々な剥離物が含まれると考えられ、洗浄水による周囲環境への負荷が高まることが予想される。汚損度が2（汚損生物が目に見える等の汚損状態）以上では洗浄水の処理・回収を伴う洗浄方法（Reactive cleaning）が採用される。この場合剥離物の回収率の定義および回収物サイズに対応したフィルタの規定など未解決な点が懸念されている。また水中洗浄後の“清浄な状態”を客観的な評価方法により担保する方法が求められる。本研究では、適切な船体付着生物管理方法を具現化するため、付着生物の客観的で定量的な評価手法を確立する。

(3) 船舶由来の有害排出物量推計モニタリング手法

EGCSで排ガスの洗浄水を船外に排出する際には、IMOで定められたEGCSガイドラインにより排水の水質モニタリングが義務づけられている。MEPC77で採択された改訂版では、洗浄水の濁度をISO7027に準拠してモニタリングすることになっており、散乱光方式を用いた計測のモニタリング中にはその計測限界を示すことが要求される。装置の本質に起因して洗浄水には黒色粒子（排ガス中のスス）が含まれるため、通常の白色濁度標準のみによる検証では不十分と考えられる。このため実試料に近い濁度標準液の開発およびその評価方法の明確化が必要である。さらに黒色粒子は計測方式の違い（散乱光方式、透過散乱光方式（レシオ）など）により計測結果に影響を及ぼすことが図-5からも明らか¹⁰⁾であり、計測結果の検証が必要である。これらの課題を解決するため、本研究では洗浄水濁度に関するISO規格化を最終目的とした調査研究を行う。濁度モニタリングは、今後、EGCS排水だけでなく、船舶の運航により発生する様々な汚水などの水処理装置の性能管理や船外排出のモニタリングなどにも利用される可能性があるため、本研究を通じて、モニタリング精

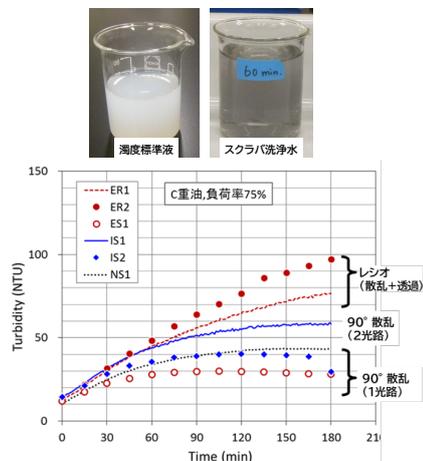


図-5 EGCS(クローズドループ) 洗浄水の計測例
計測方式の違う複数の濁度計による計測結果の比較

度を向上させることで、海洋環境への負荷低減にも資する。

5. 内航・外航海運の省エネ化・GHG削減対策に資する普及・実用技術（小項目5）

5.1 これまでの取り組み

船舶の省エネ化・GHG削減対策については、前年度までの重点研究において、水素燃料電池システムの安全性検証試験や実船試験などを実施してきた¹¹⁾。図-6はその実船試験に用いた小型実験船「神峰」である。実船試験においては、システムの安全対策や冗長性を調べる試験などを実施し、燃料電池システムを含む電気推進システムに重大な支障はなく、安定した航行ができることを確認した。この研究成果は、国土交通省による「水素燃料電池船の安全ガイドライン」の策定に貢献した¹²⁾。また船舶における水素燃料の安全性検証の知見を活用し、民間企業と協力することによって水素燃料電池船や水素混焼エンジン船の建造にも貢献している。

外航海運のGHG削減対策としては、水素やアンモニアを燃料としたコンセプト船を検討した¹³⁾。図-7はその一例であり、80~90%のCO₂排出削減を目指したコンセプト船の初期検討結果である。同図に示すエンジン出力、容積、CO₂排出の値は従来の重油焚き船のそれぞれの値を100としたと

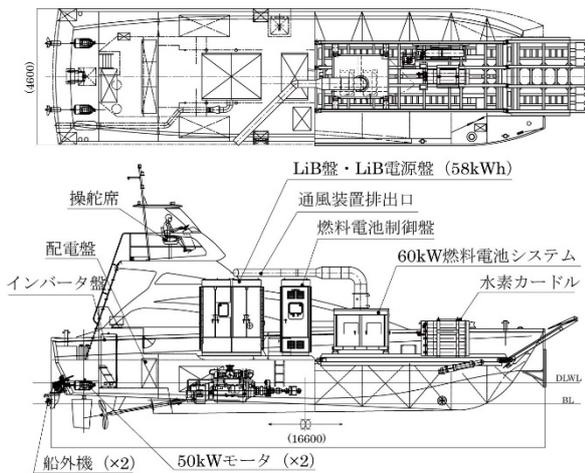


図-6 燃料電池システムを搭載した小型実験船「神峰」

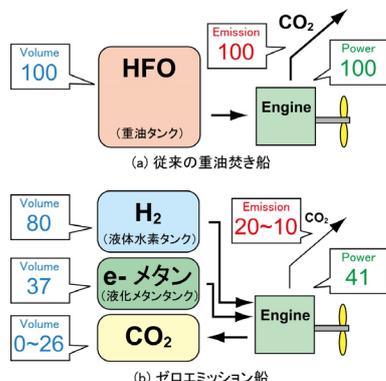


図-7 コンセプト船の初期検討結果

きの相対的な大きさ・量を表す指標である。本コンセプト船は、高度空気潤滑技術の導入などによる20%のCO₂削減、基準年（2008年を想定）における船速に対して20%の減速運航、さらにメタンと水素を50%ずつ混焼させる混焼エンジンを主機とすることによって、トータル80%のCO₂削減を実現する。90%のCO₂削減を実現するためにはCO₂回収率が約50%の船上CO₂回収システムが必要となる。図-8は以上の検討結果に基づいたコンセプト船の概略イメージである。

2021~2022年度には、国土交通省事業に協力して、内航船のGHG削減手法の一つである「連携型省エネ船」の検討を進めた^{14)~16)}。連携型省エネ船とは、運航事業者と荷主、船舶建造者等との連携、あるいは離着岸や荷役・停泊時の省エネのために荷主、陸上、港湾における取り組みと連携、さらに新たな技術・手法のいくつかを組み合わせるなどして省エネ・CO₂排出低減技術の高度化が図られた内航船である。図-9は、連携型省エネ船の検討例であり、省エネ効果が数%の技術を組み合わせることで、運航時、荷役時及び停泊時を含

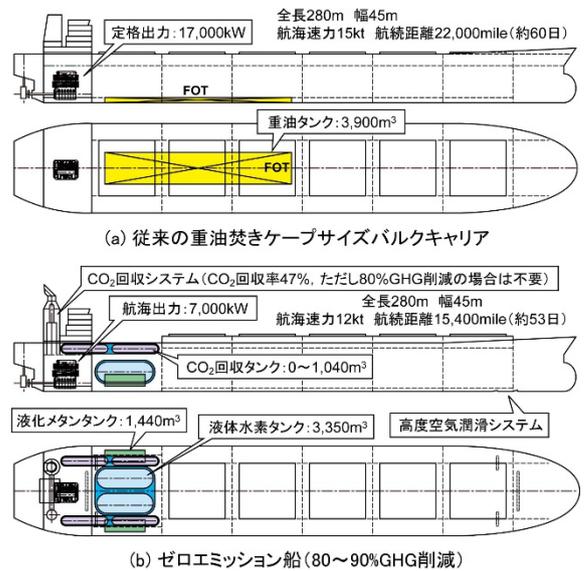


図-8 外航コンセプト船のイメージ

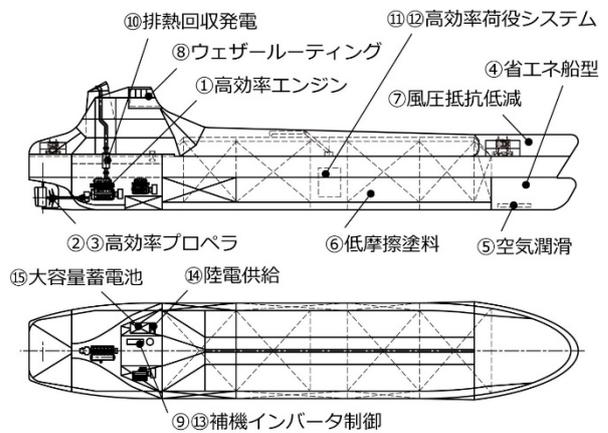


図-9 連携型省エネ船の検討例

めて、トータル 22% の CO₂ 削減と試算される。連携型省エネ船は、将来のカーボンフリー燃料の利用に先行して、建造される必要がある内航船であると考えている。

5. 2 展望

2023 年度から始まった中長期計画第 2 期の重点研究においては、GHG 削減・カーボンニュートラルに貢献する各種技術について、船舶搭載の可能性や実用性の調査を進め、将来の GHG 削減目標達成に貢献する技術の構築を目指している。

内航海運の 2030 年目標達成については、従来の燃料を使用しつつ、GHG 削減を図る必要があると考えている。上述の連携型省エネ船のコンセプトを踏まえ、様々な省エネ技術を組み合わせた次世代の内航船の研究開発を実施し、その普及に資することを目指す。その一例として、一般社団法人内航ミライ研究会らは、2022 年度から開始した環境省事業において、上記の連携型省エネ船のコンセプトを踏まえた内航貨物船「SIM-SHIP」の建造を進めている。当所は、本船に搭載する省エネ技術の開発や性能評価に協力している。また、内航海運全体の総排出量を低減し、2030 年目標を達成するためには、現在では一部の船舶だけに利用されている CO₂ 削減技術を多くの既存船にも適用する必要がある。したがって、レトロフィット技術の構築や実装・普及のための技術開発が重要になると考えている。

さらに、2022 年度までの研究と同様、民間企業と協力して、水素などのカーボンフリー燃料を用いた船舶の建造に貢献し、2050 年目標であるカーボンニュートラルの実現に向けて、技術的なサポートをしていきたいと考えている。

6. まとめ

重点研究 6 のうち、エンジン燃焼及び関連技術を除いた小項目 3~5 について、前年度までの研究成果及び今後の研究の展望を概説した。小項目 3 のうち環境保全に係る研究課題では、GHG 削減に向けた次世代燃料の投入により複雑化すると予測されるエミッションに対し、信頼できる計測・分析手法の確立と解析技術の高度化を進める。小項目 4 では、船舶由来物質が海洋環境に与える影響評価技術の高度化、船体付着生物管理に必要な防汚システムの管理・最適化、船舶由来の有害排出物量推計のためのモニタリング手法の検討を進め、海洋環境保全を目指していく。小項目 5 では、GHG 削減・カーボンニュートラルに貢献する各種技術について、船舶搭載性や実用性の調査を行うとともに、民間企業と協力して、水素などのカーボンフリー燃料を用いた船舶の建造に貢献していく。これらの研究をとおり、GHG 削減、環境負荷低減に貢献していく予定である。

References

- 1) 仁木洋一、他、GHG 削減に向けた代替燃料燃焼技術に関する研究の展望、海上技術安全研究所報告第 23 巻別冊、講演 6 (2023)。
- 2) 国土交通省、2020 年 SO_x 規制適合船用燃料油使用手引

書、

<https://www.mlit.go.jp/common/001402706.pdf>

- 3) 高橋千織、他、船用燃料油の動向とブラックカーボン・PM 排出に与える影響、第 86 回マリンエンジニアリング学会学術講演会論文集、2017 年 10 月。
- 4) 大橋厚人、他、PM 計測における排気採取位置の影響、日本マリンエンジニアリング学会誌 第 54 巻、第 4 号 (2019)、p.644-649。
- 5) 中村真由子、他、サーマルオペティカル法による船用ディーゼル機関排ガス中の炭素成分分析に関する検討、第 30 回大気環境学会年会講演要旨集、2019 年 9 月。
- 6) 浅見光史、他、海洋環境保全のための流出油漂流予測システムの高度化と今後の展望、海上技術安全研究所報告第 22 巻別冊(2023)、p121-126。
- 7) Asami, M., et al., Drift prediction of pyroclasts released through the volcanic activity of Fukutoku-Okanoba into the marine environment., Mar. Pollut. Bull. 186 (2023), 114402.
- 8) ISO 21716-1, -2, -3:2020 Ships and marine technology — Bioassay methods for screening anti-fouling paints.
- 9) ISO 23668:2022 Ships and marine technology —Marine environment protection —Continuous on-board pH monitoring method.
- 10) 益田晶子、他、湿式スクラバーの水質モニタリング法の検討- 濁度と多環芳香族炭化水素について、日本マリンエンジニアリング学会誌、第 51 巻、第 1 号 (2016)、p.117-123。
- 11) 平田宏一、低・脱炭素燃料に対応する船用動力システムに関する研究、海上技術安全研究所報告 (海技研究発表会講演集) 第 19 巻別冊、p.3-7、2019 年 7 月。
- 12) 国土交通省、水素燃料電池船の安全ガイドライン、<https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001420174.pdf>
- 13) 平田宏一、川北千春、GHG 削減プロジェクトチームの活動計画、海上技術安全研究所報告、第 20 巻別冊 (令和 2 年度)、第 20 回研究発表会講演集、p.19-23、2020 年 7 月。
- 14) 国土交通省、「内航カーボンニュートラル推進に向けた検討会」とりまとめ、<https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001447040.pdf>
- 15) 平田宏一、GHG 削減船の実現に向けた検討、海上技術安全研究所報告第 21 巻別冊 (令和 3 年度)、第 21 回研究発表会講演集、p.69-72、2021 年 7 月。
- 16) 平田宏一、カーボンニュートラルに向けたゼロエミッションコンセプト船の検討、日本マリンエンジニアリング学会、第 66 回特別基金講演会講演予稿集、p.39-42、2022 年 3 月。