

交通運輸技術開発推進制度
令和元年度業務実績説明書

令和 2 年 3 月
三井 E&S 造船株式会社

研究成果報告要約

作成年月	令和 2 年 3 月
研究課題名	自律型海上輸送システムの技術コンセプトの開発
研究代表者名	平山 明仁
研究期間	平成 31 年 4 月 10 日～令和 2 年 3 月 31 日
研究の目的	近年の情報通信技術・自動運転技術の進展を背景に、船舶の自律運航の実現への期待が高まっている。自律型の海上輸送システムの実現はヒューマンエラーに起因するリスクの最小化等、我が国の海上輸送の安全・安心に大きく寄与するとともに経済的、環境にやさしい運航等、運航効率性・生産性向上の効果も期待される。究極的な無人運航が実現すれば船舶の構造及び運航の在り方をも革新的に変える可能性がある。自律化船のコンセプト、自律化レベル、技術開発ロードマップを、我が国の海事セクターに示し、自律化船と関連技術の開発・実用化・導入の促進や、社会制度整備に向けた議論の加速を狙う。
研究成果の要旨	本研究では、次の 6 点について、調査及び検討を行った。 ・ 船上作業の分析 ・ 必要技術リストおよび技術開発ロードマップの作成 ・ 自律化レベル及び自律化船コンセプトの提案 ・ 先進的コア技術(OZT を利用した避航アルゴリズム)の実証結果 ・ 自動運航技術の認証手順 ・ 操船シミュレータを利用した認証評価手法 これらの研究成果は、3 年間に渡って 5 回開催された技術連絡会や、外部発表等によって、我が国の海事産業や海事関係研究者へ広く紹介された。また、研究期間に行われた海事産業を対象としたヒアリングなどもあり、海事産業界や海事関連研究者内での自動・自律化技術に関する議論も盛んになった。実船による実証試験を含む多くの活動も始められている。本研究に於いて開始当初目指した「自律化船と関連技術の開発・実用化・導入の促進、社会制度整備に向けた議論の加速」は充分に実現されたと考える。
知的財産権 取得状況	特許出願 0 件 著作権登録 0 件
研究成果発表実績	論文発表：国内 2 件、海外 1 件 口頭発表：国内 3 件、海外 3 件 その他 ：国内 1 件、海外 0 件

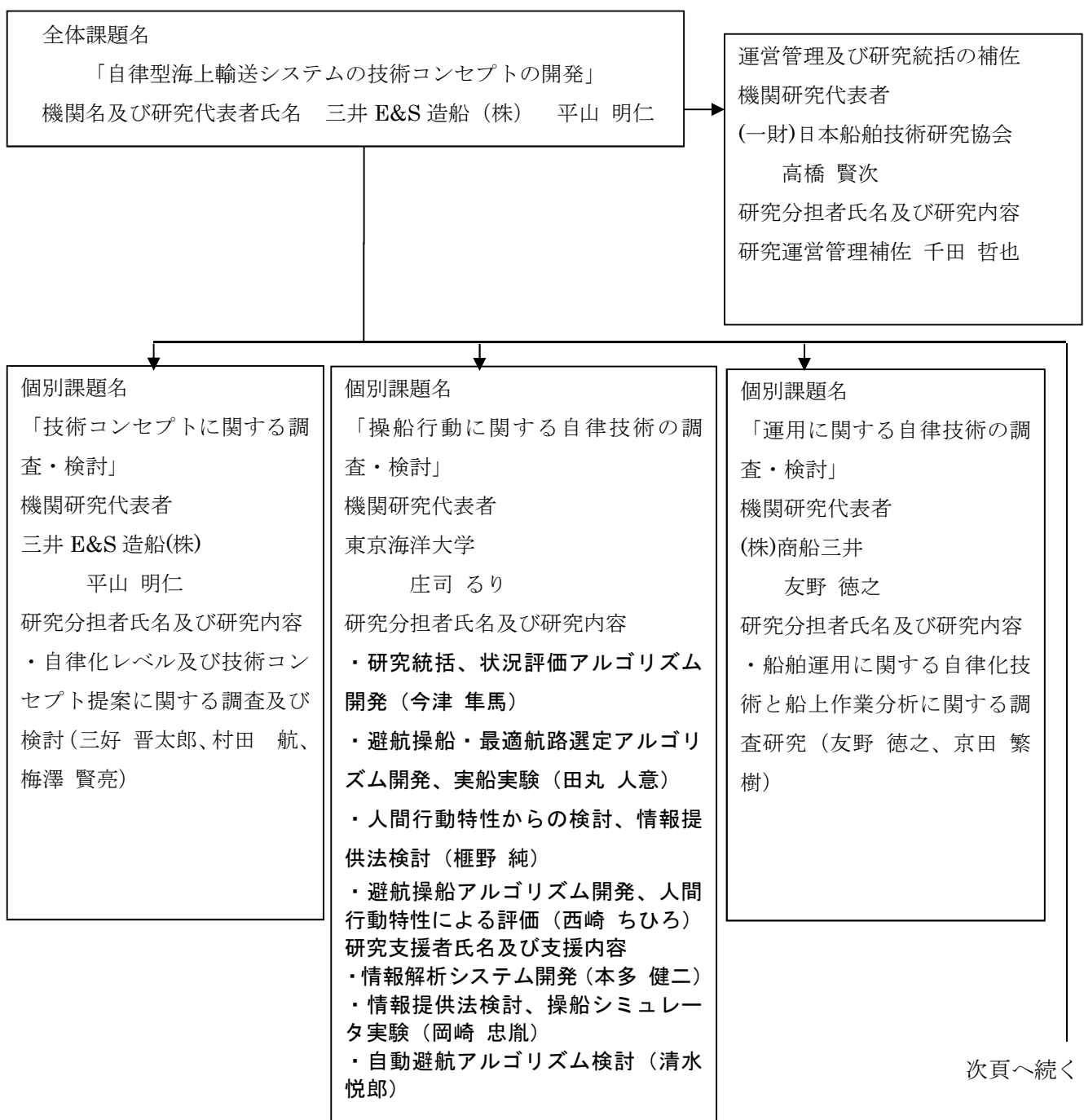
研究開発の目的及び実施体制

研究開発の目的

海上輸送システムの自律化実現に向け、目標とするコンセプトと段階的フェーズを示し、日本の海事産業会に対し構成する各要素技術の開発、実用化、導入の促進を図り社会実装へのロードマップを示す。

研究実施体制

本研究は三井 E&S 造船 (株) を総括研究機関とし、(一財) 日本船舶技術研究協会、東京海洋大学、(株) 商船三井、(国研) 海上・港湾・航空技術研究所、(一財) 日本海事協会、(株) 三井造船昭島研究所と共同して実施した。担当機関の研究実施の流れを示すチャートは以下の通りである。



前頁から続く

個別課題名 「自律化船の認証評価技術に関する研究」 機関研究代表者 (国研)海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 丹羽 康之 研究分担者氏名及び研究内容 ・ 認証評価技術に関する調査 (福戸 淳司、宮崎 恵子、南 真紀子、齊藤 詠子) ・ 操船シミュレータへの自律機能の組み込み (佐藤 圭二、小林 充)	個別課題名 「自律化船の認証評価に関する調査、検討」 機関研究代表者 (一財) 日本海事協会 松本 俊之 研究分担者氏名及び研究内容 ・ 自律化船の認証評価技術に関する調査、検討 (山田 智章)	個別課題名 「運航作業の自律化に関する調査、検討」 機関研究代表者 (株) 三井造船昭島研究所 三上 隆 研究分担者氏名及び研究内容 ・ 運航作業の自律化に調査及び検討(三上 隆、奥山 悦郎) ・ 自律化レベル及び技術コンセプト提案に関する調査及び検討(三上 隆、奥山 悦郎)
--	--	---

研究開発の成果

1. 序論

IoT や AI 等の情報通信技術の急速な進展を背景に、船舶運航の自動・自律化に対する機運が高まっている。船舶運航の自動・自律化は、ヒューマンエラー低減等による安全性の大幅な向上や、乗船者の作業負担の大幅軽減を実現できると期待されており、将来の海上輸送の在り方を大きく変える可能性を持っている。

四方を海に囲まれ、輸出入をはじめとする経済活動の根幹を海上輸送に依存し、また、世界有数の海事クラスターを有する我が国にとって、船舶運航の自律化は非常に大きな影響・効果をもたらすものと想像される。

欧州では、自律運航・無人化船の研究が盛んに進められており、船用システムメーカーの Rolls-Royce(現在は Kongsberg に吸収)や Kongsberg、化学肥料メーカーの YARA 等が、野心的な無人化コンセプトを打ち出す等プレゼンスを強める動きが顕著であり、将来の日本海事産業の国際競争力への影響も懸念されている。

船舶は極めて多数の様々な機器で構成される「移動する巨大なプラント」である。また、その安全運航は、船舶の特性を熟知し操船に習熟した専門資格者の乗組員により行われている。このような多種多様なハード、ソフトが絡み合う船舶の自律化の実現には、多くの要素の研究開発が必要となり、各企業・機関の個別の取組のみでは船舶の自律化は非常に困難であると言わざるを得ない。しかし、我国の海事産業は欧州と大きく異なり、非常に多くの企業で構成されていることもあり、十分な連携がとれているとは言い難い。この状況を打破するには、日本の海事関係者のベクトルを合わせ、経済的な自由競争の中でも健全な協力関係を築く素地を作る必要がある。

本研究においては、日本の海事関係者が健全な協力関係を築くことができるように、海事関係者が共有できるビジョンを創ることを目指す。具体的には、「自律化レベル」を定め、そのレベルに応じた具体的な「自律化船コンセプト」を提案する。また、自律化船を実現する為に必要な技術をリストアップし、その実用化に向けた「技術開発ロードマップ」を策定する。

「自律化レベル」、「自律化船コンセプト」、そして「技術開発ロードマップ」を広く、我が国の海事産業界に示し、自律化船の開発、自律化船に搭載する船用機器類の開発、自律化船の実運用の検討等々を加速させ、自律化船の早期実現の大きな弾みとしたい。

また、自律化船の社会実装は技術の進展だけでは実現しない。社会制度・インフラ、国際的な規則の整備、経済的ニーズの喚起等も重要な課題である。「自律化船コンセプト」等本研究の成果を社会に広く示すことは、これらの動きが加速することにも繋がると考えている。

2. 船上作業の調査・分析

船上作業を考えると、一般的に総指揮者（責任者）である船長のもと、甲板部の長としての役割と貨物関係の業務を担当する一等航海士、航海（船体）関係の業務を担当する二等航海士。消防・救命設備関係を担当する三等航海士、機関業務を統括する機関長、主機関を担当する一等機関士、ボイラを担当する二等機関士、電気関係を担当する三等機関士との大まかな役割が分担されている。

一方で既に業務が簡略された事務や医務関係の業務については各管理会社が任命し、特定の資格を擁した職員によって兼務されている。出入港書類、乗組員乗下船に係わる書類作成を始め Utility、食糧、予備・船用品の積込み書類作成から手配等々などの事務業務に関しては、航海・機関士に関係なく役割分担して行なわれているのが実状である。また、無線関係の業務に関しては、船長と航海士が手分けして行っている。また、日常的に電気関係の業務を専属で行う、電気専門機関士が乗船することもある。液化天然ガス船のように航海中に貨物やタンクの維持管理作業が生じる場合は、上述した乗組員構成に加えて、職員 2-3 名が多く乗船することも珍しいことではない。このように世界中の商船を見渡せば、各船社の体制の違いや船種の運航形態の違いによって乗組員の配乗構成も違いがあり、担当業務も異なっている。乗組員の役割分担や配乗の実際を踏まえるものの、航海関連、機関関連、貨物関連に分け船上作業について、調査・分析を行った。これらの船上作業について、人の手によることなく実現できるものが増える程、船舶の自動・自律化が進むことになる。

航海関連、機関関連については、船種が異なっても共通な部分が多いが、貨物関連については、船種により異なる作業も多いため、タンカー、LNG 船、コンテナ船、ばら積み船に分けて調査し、乾貨物と液体貨物に分けて船上作業を整理した。



図 2-1 船上作業マップ（航海）



図 2-2 船上作業マップ（機関）



図 2-3 船上作業マップ（貨物管理）

3 年間にわたり乗組員の作業の分析を実施したが、航海、機関そして貨物管理の作業は密接な関係性があり、切り離すことが難しい部分も多い。例えば、貨物の荷崩れを防止するために荒天避航

をする（航海）、荒天回避するために機関の回転数を調整する（機関）それに伴うバラストの調整や関係部署への連絡（通信）など船上作業は多岐にわたり複雑に絡みあっていることが分かる。

傾向として挙げられることは、危険物運搬船は船上配管の漏洩などのリスクに対して常に備えておかなければならないため漏洩対応や非常対応が必要になるのに対し、危険物ではない乾貨物運搬船にはそのリスクは少ないと考えられるために自律化が比較的容易ではないかと思われる。

自律化が求められる条件が複雑であればあるほど機能を多様化させなければならず、容易ではなくなるので領域を限定して機能をシンプルにするのも自律化機能の開発が促進される一例であろう。

3. 必要技術の分析と技術開発ロードマップ作成

必要技術に関する調査では、「航海」、「機関」及び「貨物管理」関連の船上作業の自動・自律化に必要となる機能と技術について、国内の船会社、造船所、舶用機器メーカー、及び共同研究体メンバーを含む 30 社以上に対してヒアリングを実施した。さらに、ヒアリング内容について整理を行い、リスト形式として調査結果をまとめた。さらに各必要技術毎に、自動・自律化による安全性向上と労働負荷低減の観点からみた「重要度」と、それらの技術を実用化する際の「実現困難度」に焦点を当てて評価を行った。また、それぞれの必要技術リストについて「実現困難度」を「実現可能になる時期」の評価結果を用いて、技術開発ロードマップを作成した。

表 3-1 必要技術リスト評価指標

評価値	必要技術の重要度	必要技術の実現困難度
	「自動化・自律化するとことで、安全性向上あるいは労働負荷低減に対して」	「いつ頃の実現すると考えられるか」
6	著しく寄与する	いつ実現するのか目途が立たない
5	非常に寄与する	2040 年頃までには、実現している
4	かなり寄与する	2035 年頃までには、実現している
3	ある程度寄与する	2030 年頃までには、実現している
2	ほとんど寄与しない	2025 年頃までには、実現している
1	自動化・自律化する必要無し	実用化済みである

表 3-2 船上作業自動・自律化に関する必要技術リスト例（一部）

大区分	小区分	船上作業	自動・自律化の実現に最も有望だと思われる技術、製品、手段	必要技術の重要度	必要技術の実現困難度
航海当直	見張り	海岸線の把握	海図と自船位置把握技術の高精度化	4.5	2.4
		水深、浅瀬、岩礁の把握	海図と自船位置把握技術の高精度化	4.8	2.1
		岸壁の把握（離着岸時）	高解像度カメラ＋画像処理による俯瞰図の表示 船舶版アラウンドビューモニター＋高精度距離計	4.9	2.4
		水中障害物の把握	ドップラーログやエコーサウンダー	3.9	2.5
		自船位置の把握	GNSS	5.4	1.5
		自船の船速の把握	GNSS	5.3	1.5
		自船船首方位	コンパス	5.3	1.4
		他船位置の把握	AISの搭載拡大 船員（目視、聴覚）情報を船員への負担無く自動化システムに入力するシステムの開発も必要） VDES（VHS Data Exchange System） モバイル端末利用による位置計測・共有	5.0	2.0
		他船船首方位の把握	AISの搭載拡大 AISの義務化拡大 or 船舶版管制塔による支援 VDES（VHS Data Exchange System） モバイル端末利用による位置計測・共有	4.6	2.3
		他船速度の把握	AISの搭載拡大 AISの義務化拡大 or 船舶版管制塔による支援 VDES（VHS Data Exchange System） モバイル端末利用による位置計測・共有	4.8	2.1
		他船の寸法（船長、排水量等）の把握	AISの搭載拡大 AISの義務化拡大 or 船舶版管制塔による支援 VDES（VHS Data Exchange System） LIDER、赤外線カメラ、高感度カメラ、360度モニタ、画像処理（AI利用等）、レーダ（μ波、m波）、赤外線測距	3.5	2.5
		他船の船種の把握	AISの搭載拡大 AISの義務化拡大 or 船舶版管制塔による支援 VDES（VHS Data Exchange System） LIDER、赤外線カメラ、高感度カメラ、360度モニタ、画像処理（AI利用等）、レーダ（μ波、m波）、赤外線測距	3.4	2.5
		他船の将来針路の予測	AISの搭載拡大 AISの義務化拡大 or 船舶版管制塔による支援 VDES（VHS Data Exchange System）	4.4	3.5
		他船動向の把握（何をしようとしているか）	AISの搭載拡大 AISの義務化拡大 or 船舶版管制塔による支援 VDES（VHS Data Exchange System） 他船の危険度の評価（衝突予防法の遵守度を評価し、離隔距離を変える、特定の旗国の船舶との離隔距離を広く取る。） モバイル端末利用による位置計測・共有	4.4	3.6
		他船の灯火・形象物・旗旗信号の内容把握	AISの搭載拡大 AISの義務化拡大 or 船舶版管制塔による支援 VDES（VHS Data Exchange System） LIDER、赤外線カメラ、高感度カメラ、360度モニタ、画像処理（AI利用等）、レーダ（μ波、m波）、赤外線測距	3.8	3.5
		他船動向の音響信号の把握	マイク＋音響信号の識別システム 音響信号を誰が出しているかを把握するのが困難。この識別には、音響信号の発生源の包囲の特定と他船情報との連携が必要。	3.5	3.9
		航海標識の把握 ・灯浮標、標識灯、マーカー ブイ	航海標識に発信機を搭載 バーチャルAIS 目視で把握する必要はなく、電子海図データとして提供すれば良いと思います。	4.6	2.4
		ブイ、係船ブイの把握	発信機を搭載 LIDER、赤外線カメラ、高感度カメラ、360度モニタ、画像処理（AI利用等）、レーダ（μ波、m波）、赤外線測距 目視で把握する必要はなく、電子海図データとして提供すれば良いと思います。	4.5	2.8
		漁網の把握	漁船との情報連携の高度化 LIDER、赤外線カメラ、高感度カメラ、360度モニタ、画像処理（AI利用等）、レーダ（μ波、m波）、赤外線測距	4.5	3.5
		浮遊物の把握	高精度カメラ＋AI LIDER、赤外線カメラ、高感度カメラ、360度モニタ、画像処理（AI利用等）、レーダ（μ波、m波）、赤外線測距	4.4	3.5
		衝突危険性予測・評価	航行シミュレーション、ヴァーチャルAIS AI、自動避航アルゴリズム	5.3	2.5
		座礁危険性予測・評価	ECDIS	5.3	2.1

大区分	小区分	船上作業	2020年～	2025年～	2030年～	2035年～	2040年～
航海当直	総合的な管理	船体の状態把握					
		船体構造の健全性把握					
		操舵装置の状態把握					
		操舵装置の異常・故障検知					
		操舵装置の故障予測					
		その他操船装置の状態把握					
		その他操船装置の故障・異常の検知					
		その他操船装置の故障予測					
		その他操船装置の状態把握					
		航海計器の状態把握					
		航海計器の故障・異常の検知					
		航海計器の故障予測					
		航海計器の健全性把握					
		複数航海計器の出力情報から妥当な情報の類推					
		各種船載機器、装置の状態把握					
		各種機器類の異常・故障の検知					
		各種機器類故障の予測					
	航海計画	気象情報入手、観測					
		海図・航海情報の入手					
		航路計画・決定					

図 3-1 航海の船上作業自動・自律化に関する技術開発ロードマップ例

「航海」、「機関」、及び「貨物管理」関連の船上作業を、船員に代わりシステムが行うために必要な技術に関して、船舶の自動・自律化が実現されることによる安全性向上と労働負荷低減の観点からみた「重要度」と、実用化にあたっての「実現困難度」について調査・評価し必要技術リストを作成した。また、それらの結果に基づいて技術が「実現可能となる時期」について整理した技術開発ロードマップを作成した。

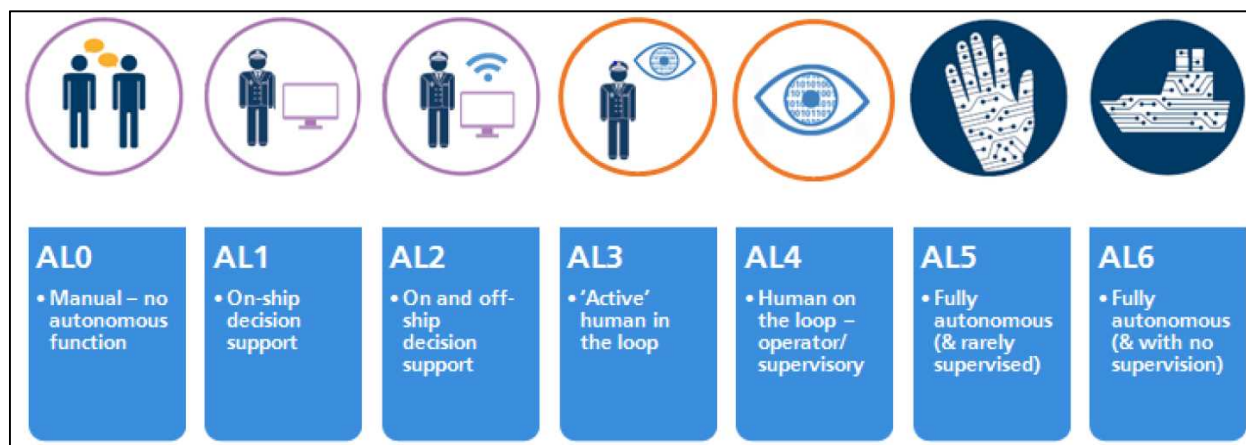
「航海」に於いては、操船機能の自動・自律化は比較的实现し易く、一方で、これまで目視によって対処していた浮遊物や航海標識、あるいは信号や VHF 通信による他船行動の把握などは作業の自動・自律化実現が比較的困難とされていることが分かった。「機関」に於いては、運転の一部自動化が進んでいるものの、機器の点検・メンテナンスといったデバイスへの物理的なアクセスが必要となる作業の自動・自律化実現には課題が多く残されている。また、「貨物管理」に於いては、比較的自動・自律化の実現し易い作業が多い傾向にあることが分かった。

4. 自律化船コンセプト・自律化レベルの提案

「自律化レベル」を提案するに当たっては、先行して発表されている船舶の自動・自律化について調査し、自動・自律化に必要な技術の実現時期等についても同様に調査を行って、自動・自律化

に伴う人とシステムの役割の変化について段階的に整理し、それを踏まえて「自律化レベル」を提案した。

また、提案した「自律化レベル」毎において各船種がどのような自動・自律化機能を備え、運用されるかをイメージした「自律化船コンセプト」を提案した。



a) Lloyd's Register の自律化レベル(Cyber に関する自律化)

SHIP AUTONOMY LEVELS ARE CATEGORIZED ON A SCALE



b) Bureau Veritas の自律化レベル

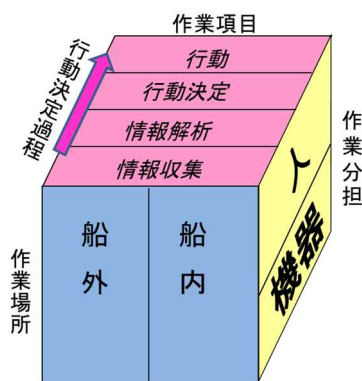
図 4-1 先行して発表されていた自律化レベル例

表 4-1 自律化レベル

自律化レベル		航海	機関	貨物管理(乾燥)	貨物管理(液体)
5	完全自律化船	システムが、全ての操船を実行出来る	システムが、異常時対応を含め、運転制御、維持・整備を全て管理出来る	システムが、全て管理出来る	システムが、全て管理出来る
		人は、システムの状態監視を行う	人は、システムの状態監視を行う	人は、システムの状態監視を行う	人は、システムの状態監視を行う
4	自律化船	システムが、緊急時を除き、全ての操船を実行出来る	システムが、緊急時を除き、運転制御、維持・整備を全て管理出来る	システムが、異常時・緊急時を除き、計画、荷役、積荷管理といったほぼ全ての作業を実施出来る	システムが、異常時・緊急時を除き、計画、荷役、積荷管理といったほぼ全ての作業を実施出来る
		人は、上記の確認および緊急時および異常時に対応する	人は、故障予防、緊急時および異常時に対応する	人は、上記以外の検査対応、緊急時および異常時に対応する	上記以外の検査対応、緊急時および異常時に対応する また安全対策への監視および対応を行う
3	準自律化船	システムが、比較的良好な条件下で、ほとんどの操船を実行出来る	システムが、機関の運転制御、整備計画、燃料等を管理出来る	システムが、計画と積荷管理を実施する	システムが、計画と積荷管理を実施する
		人は、上記の承認および自動化の難しい一部作業を実施する	人は、故障予測および維持・整備と、緊急および異常時の対応を実施する	人は上記以外の自動化が難しい作業を実施する	人は上記以外の自動化が難しい作業を実施する また安全対策への監視及び対策を行う
2	高度支援船	人が、支援システムを積極的に利用した操船を行う	人は、故障診断、維持・整備・燃料等の管理と、緊急および異常時の対応を実施する	人は、計画、荷役、積荷の管理と、緊急時および異常時の対応を実施する	人は、計画、荷役、積荷の管理と、緊急時および異常時の対応を実施する
		システムは、操船支援情報の提供と操船を一部実行出来る	システムが、運転制御の管理が出来る	システムは計画と積荷管理の一部を実行出来る	システムは計画と積荷管理の一部を実行出来る
1	一般的な船 (2019年現在)	人が、支援システムを利用するが、ほとんどの操船を実行する	人は、運転中の機関の制御以外のほとんどの作業を実施する	人が、支援システムを利用するが、ほとんどの作業を実施する	人が、支援システムを利用するが、ほとんどの作業を実施する
		システムは、操船を一部実行出来る	システムが、運転中の主機、補機制御を実施出来る	システムは、計画の一部を実行出来る	システムは、計画の一部を実行出来る

自動航行船の先進的なコア技術に関する研究

図 5-1 に、情報収集から行動までの行動決定過程を示す。図では、操船における作業項目を情報収集から行動実施までに分類したとき、これらが人（複数）と機械を使用する作業の分担により行われていること、また作業場所としては船内および船外（船外から支援（情報提供、助言、規制なども含まれる）を受ける）であることを表している。図 5-2 は、船橋における作業での問題個所（課題）の分類例を示している。船橋での操船行動は、図中の下部にある自船と航行環境に関する情報を元に、作業を共同作業者と補完・分担しながら、責任者が行動決定を行っている。図中の数値は、ニアミスについての調査における原因の割合を示しており、赤枠の数値は人に起因する割合で、青枠の数値の「17%」は人が関わらない要因が原因の割合である。つまり、ニアミス発生の 83% が人に起因するものであることを意味しており、これを改善する必要があることがわかる。



船舶航行環境

その他装置
GMDSS
VDR (記録)
BNWAS

情報解析
行動決定

船長・当直航海士

情報収集

43%

情報解析

行動決定

伝達不良

意思疎通
協調行動

陸・船

通信(外部)
計路制御
速度制御
W/L切替

チームワーク

17%

行動実施

補完機能
補佐機能
役割分担
W/L切替

複数手段
照合不良

装置
対視鏡
リーダー
AIS
ARPA
音響測深儀
電子海図
FAX
VHF(電話)
インターネット
テレビ
ラジオ

共同作業
情報収集

23%

情報欠落
見張り不良

装置
GPS
ジャイロコンパス
速度計
指示器
(舵、回転数、スラスト、
ピッチ、回頭速度)

性能

船体運動

航行環境

情報

自船

情報

外力

外力影響
予測不良

図 5-2 船橋における作業での問題箇所（課題）

12

表 5-1 操船行動に利用する情報種類と収集手段

収集場所	対象	情報種類	収集手段		
			人が対応	器機等	自動化へデジタル化
自船情報	船内	針路 対水速力 対地速力 緯度・経度、真進路、真速力 耐航性能、推進性能、操縦性能、機関性能、航海機器性能等		コンパス EM ログ、ドップラーログ ドップラーログ、GNSS GNSS	デジタル化 高精度化
			Pilot card、解析情報等		
環境情報	他船等情報	船舶 船型、色、灯火、形象物、旗、見合い関係、アスペクト、汽笛、通信 大きさ、方位、方位変化率 船種、船籍、行先、船名、状態 距離、相対針路、相対速力、接近速度、DCPA、TCPA、BCR 船首方位、真進路、真速力 緯度・経度、ETA、船幅、最大喫水	人（目視、聴取） 人（目視） 人（目視、知識）	レーダ・ARPA AIS レーダ・ARPA AIS、レーダ・ARPA AIS	映像・音声 高精度化 高精度化
		船舶 陸上・ブイ 色、形状、灯火 方位、距離、大きさ 海岸線、水深、物標の緯度・経度、種類 仮想ブイの緯度・経度、種類	人（目視） 紙海図	レーダ ARPA、AIS ECDIS AIS、ECDIS	映像等利用
		漁具・漂流物 色 方位、距離、大きさ、形状	人（目視） 人、紙海図、通信	ECDIS	映像等利用
	船外	その他 船外からの情報 (法律、管制、気象 海象等)	交通三法 交通法、海図、 海上交通センター等 気象庁、その他	ECDIS	デジタル化 データ化 高精度化

DCPA (Distance at the Closest Point of Approach : 最接近距離

TCPA (Time to the Closest Point of Approach) : 最接近時間

BCR (Bow Crossing Range) : . 船首横切り距離

ETA (Estimated time of arrival) : 到着予定時刻

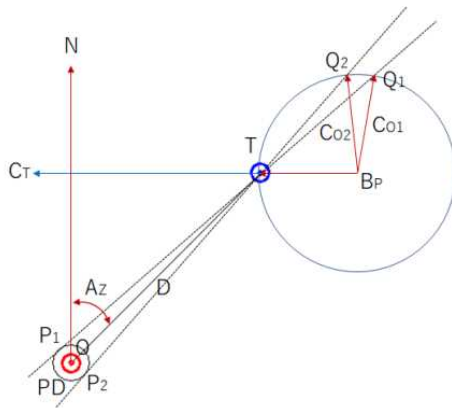


図 5-3 衝突針路の求め方

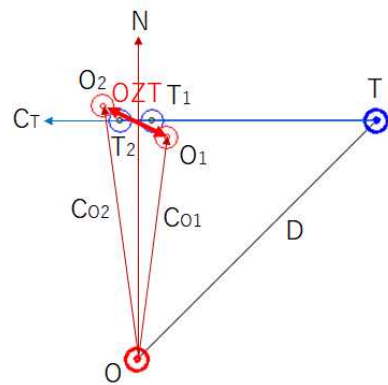


図 5-4 OZT の求め方

OZT とは、自船の周囲において、他船により航行可能領域が妨害される可能性のある範囲のことであり、現在さまざまな目的で利用されている考え方である。OZT の特徴は、真運動から求めていることから、相手船の行動変化がなければその場所は変わらず、複数の他船が存在しても、その他船毎の OZT を障害物と見なすことで、周囲の状況の変化に素早い対応が可能となる。また自船が変針行動や速力変更にも対処し易い。しかし、これまで利用してきた OZT には、その領域に不要な部分を含んでおり、厳密性に欠けていた。ここでは不要な部分を削ぎ落とし、線分で表す新しい「線形 OZT」を導入することにより、より詳細に相手船の振る舞いの影響等を解析することが可能になる。

図 5-3 に衝突針路も求め方を図示する。針路 CO1 及び CO2 が衝突針路である。図 5-4 に、新しい「線形 OZT」の求め方を図示する。O1 と O2 が「線形 OZT」である。前文であらわされるので、相手船が至近距離を航過する場合にも対応可能となる。

避航操船の自律化に向けた避航操船アルゴリズムの構築を行うために、AIS データ（日本海難防止協会提供）を用いて、OZT が発生する遭遇状態（以下、「OZT 遭遇」と記す）を求め、海域ごとの特徴や航行に伴う OZT 遭遇の変化、またその時の OZT 分布を調査した。2014 年の東京湾から大島南方海域における 1 分ごとのデータに補間し、4 マイル以内に存在した船舶間について、自船となる船舶は 6 ノット以上、他船となる船舶は 3 ノット以上の場合について OZT を計算した。図 5-5 に、OZT 位置を図示した例を示す。図 5-6 OZT 遭遇発生領域を示す。この場合は、OZT 遭遇隻数は 2 隻となる。



図 5-5 2014 年 5 月 21 日～31 日の OZT 位置

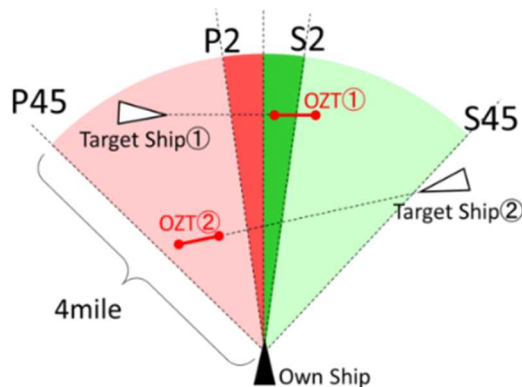


図 5-6 OZT 遭遇発生領域

対象となる海域全体における OZT 遭遇隻数は、2 隻の場合の OZT の発生回数が最も多く、4 隻から急減し、23 隻以降は 0 回となっている。また、1 隻から 3 隻までの OZT 遭遇隻数は全体の 68.4% で、5 隻までで 90.4%、10 隻までで 99.5% である。つまり、10 隻の遭遇状態まで考慮できれば、OZT 遭遇が発生する状態の 99.5% に対応できることとなる。

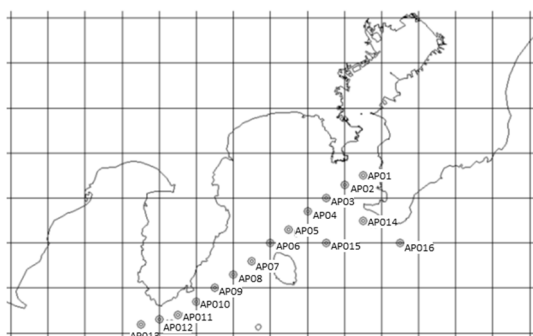


図 5-7 OZT 遭遇隻数調査海域

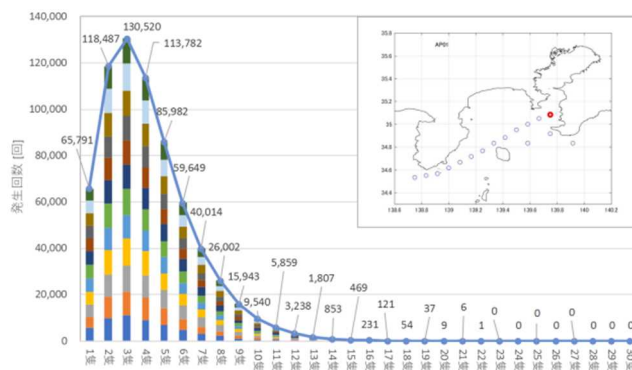


図 5-8 OZT 遭遇隻数 (AP01)

図 5-7 に示す 1 から 16 までの位置を中心に半径 5 マイルの海域について、OZT 遭遇の発生回数を求めると、発生回数は、AP01 から AP05 (伊豆大島南方) にかけて減少し、AP11 にかけては増加することがわかった。また、AP01 では 3 隻遭遇が、AP02～13 では 2 隻遭遇が、AP14～16 の 3 地点では、1 隻遭遇

が最も多く、AP01 および AP02 を除き、10 隻まで考慮すると、ほぼ 100% のケースを網羅できる。AIS 情報を用いた種々の遭遇の調査により、同時に複数の船に対応した行動必要であることがわかった。

これまでの避航行動は、衝突危険が顕在化してから避航し（短期的行動）、衝突危険の解消後に航海計画航路に戻る行動（長期的行動）としている。しかし航行実態に合わせるには、衝突危険が顕在化する前の行動である中期的行動を避航行動に組み込む必要がある。避航行動としては、時間的にも空間的にも余裕のある時期に、まず中期的行動を採ることが望ましい。

表 5-2 避航行動の分類

避航行動の分類	遭遇状況に対する対応
短期的行動	衝突の恐れが発生しており、海上衝突予防法等の法規に基づき、直ちに避航を行う行動
中期的行動	複数の相手船との複雑な遭遇を避ける行動や、潜在的衝突危険等の衝突危険が顕在化する前に先行避航する行動
長期的行動	避航からその後の航海計画航路に復帰するまでのマクロ的な視点で見た行動

航行している船舶の船首方位や船速は、風、波、海流（潮流）等の影響により、時々刻々に変化する。また、変針や船速調整などの行動を迷ったり、一度決定した行動を変更したりなど、行動に揺らぎが生じる場合がある。この行動の揺らぎによる OZT の変化を、「変動 OZT」と呼ぶ。行動決定では、相手船の次の行動を予測することが不可欠である。相手船が避航行動をとることを予測して求めた OZT を「予測 OZT」と呼ぶ。この 2 つの OZT を導入することにより、より確実な避航対象を定めることができる。

避航アルゴリズム構築のためは、海上衝突予防法適用以前の中期的行動が必要であり、以下を考慮する必要がある。

- ① 現状の遭遇状況により自船の行動が制約される領域
- ② 相手船の行動の変動により自船の行動が制約される領域（変動 OZT）
- ③ 相手船の予想される行動変化により自船の行動が制約される領域（予測 OZT）
- ④ 新しい相手船の出現により自船の行動が制約される領域
- ⑤ その他の要素（例えば陸岸や障害物）により自船の行動が制約される領域

また、中期的行動を採用する場合の避航時期や交通流の考慮等について、OZT 分布を用いて検討を行った。

線形 OZT、変動 OZT、予測 OZT を使用し、さらに自船周囲の OZT 分布による潜在的衝突危険を考慮した避航アルゴリズムの改良を進め、中期的行動および短期的行動（衝突直前までの支援を含む）の開始時期や行動内容の決定を行う避航アルゴリズムのプロトタイプの構築を進めている。

6. 自動運航技術に関する認証評価手法の検討

自動運航技術の認証評価手法はどうあるべきかを検討するための予備調査として、先行する自動車分野での事例と調査を行うとともに、その調査結果を踏まえつつ、まずは船舶の自動運航技術の設計開発（概念設計）の段階において考慮すべき安全性確保のための基本要件の検討を行った。一方で、自動運航技術の実装のためには、設計開発の段階だけではなく、船舶への搭載段階における安全性の確認、また運航中の保守

管理についての方法・手順についても明確化が求められる。そこで、自動運航技術の設計開発、搭載、運航中の保守管理の各ステージにおける要件について整理し、認証手順についても取りまとめた。

操船シミュレータを用いた安全評価手法については、先行する事例の調査と、評価シナリオの策定法の検討を行った。

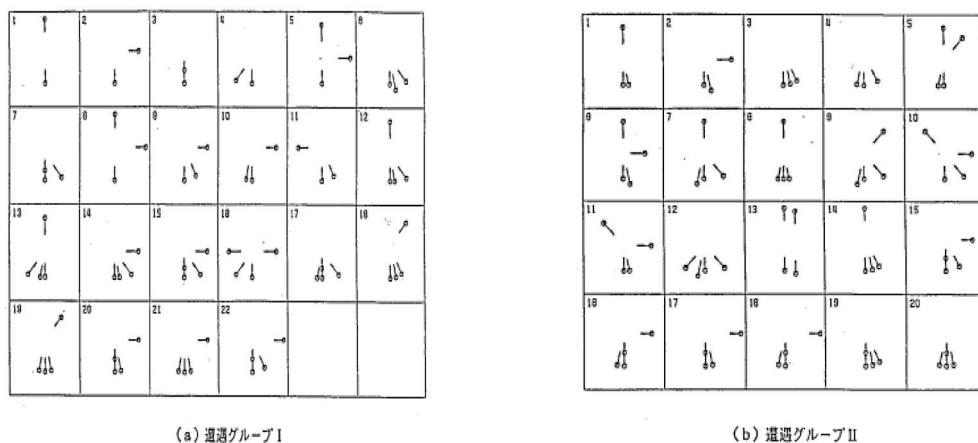


図 6-1 避航操船関係の論文等の評価シナリオの一例（今津問題）

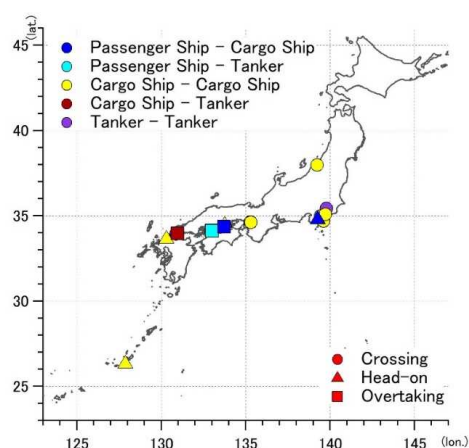


図 6-2 シナリオ抽出対象候補となる衝突事故発生地点

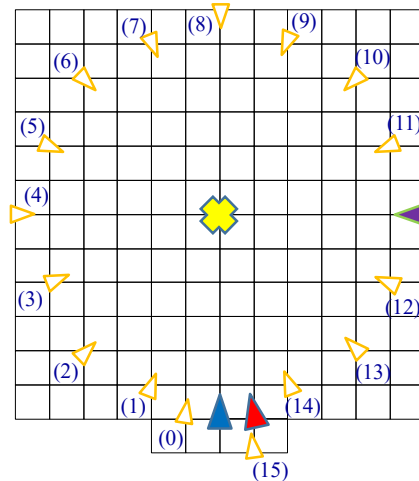
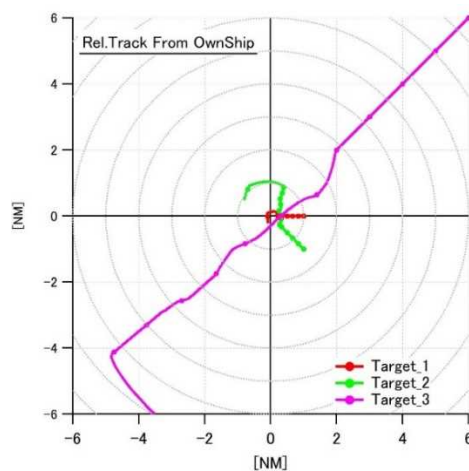
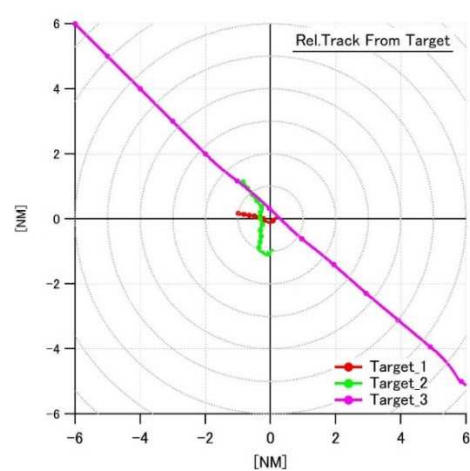


図 6-3 1対3の遭遇シナリオ



(a) 自船を座標の中心した他船の航跡



(b) 他船を座標の中心にした自船の航跡

図 6-4 自動避航操船を行った相対航跡の例 (他船の初期位置(15))

本事業にて得たこれらの知見を踏まえ、日本海事協会は船級協会として培ってきた知見等を加味した上で「自動運航、自律運航に関するガイドライン (Ver. 1.0) ～自動化システム/遠隔制御システムの設計開発、船舶搭載並びに運用について～」を 2019 年 1 月に発行した。

操船シミュレータを用いた安全性評価については、評価シナリオはの作成方法について、次の 4 つの方法を提案した。

- ランダムに遭遇他船を設定しシナリオを作成
- 避航操船関係の論文等から、避航操船機能評価に使われたシナリオを収集
- AIS 情報等から操船が困難と思われる見合い関係を用いたシナリオを作成
- 海難事故例の見合い関係を用いたシナリオを作成

シミュレーションを用いた避航アルゴリズムの評価を実施にも試みた。海技研で開発した 3 つの避航操船アルゴリズムを対象に、海技研のシミュレータを用いて行った。評価は、2 船間距離、相対方位変化率、CJ、SJ 等の既存の指標を用いたもの及びノルウェーを中心に提唱されている COLREGs の数値化による評価を

用いて実施した。その結果、操船シミュレータを用いた操船アルゴリズムの認証の有用性が確認されると共に、その課題も把握できた。

7. ビジョン共有のためのマテリアルの作成

3年間で調査研究を行った成果を、我が国の海事産業界全体で共有するための資料として、パンフレット（電子データ）を制作した。パンフレットはA4サイズで表紙を含めた合計12ページで構成され、「技術開発ロードマップ」、「自律化レベル」及び「自律化船コンセプト」の研究成果の中から一部を抜粋したものを掲載している。また、自律化船が航海中にどのような自動・自律化機能を利用しながら運用されるかをイメージした機能例を紹介している。

8. 技術連絡会

2017年度から2019年度までの3年間、技術連絡会を定期的に計5回（注）開催した。この研究の進捗に応じて、課題となった自動化レベルや技術コンセプトの内容などを、我が国の海事セクタに幅広く紹介できた。また技術連絡会の席上で、活発な議論も行われ、得難い知見を得ることができた。

2017年度（1回）：2018/1

2018年度（2回）：2018/11、2019/2

2019年度（2回）：2019/10、2020/1

9. 結論

本年度も次の6点について調査及び検討を実施し、3年間行った研究成果についてまとめを行った。

- 船上作業の分析
- 必要技術リストおよび技術開発ロードマップの作成
- 自律化レベル及び自律化船コンセプトの提案
- 先進的コア技術(OZTを利用した避航アルゴリズム)の実証結果
- 自動運航技術の認証手順
- 操船シミュレータを利用した認証評価手法

船舶運航における貨物関連作業の分析を行い、昨年度までの調査と合わせて、航海、機関、貨物作業の自律化に必要な技術について困難度と重要度を整理し技術開発ロードマップを作成した。これらの結果を元に、自律化レベル及び自律化船のコンセプトを提案した。

先進的コア技術である避航操船に関しては、昨年度までに検討したOZTを用いた避航操船アルゴリズムと情報提供方法を開発し、その有効性について検証を行った。

自動化システム認証に関しては、手順と要件の基本コンセプトを安全性確保の観点から検討を行った。

操船シミュレータへ評価指標計算プログラムを組み込み、操船シミュレータを用いた避航操船の評価を行い、自動運航船の安全認証評価手法を提案した。

この研究課題の実施に当たっては、合計5回の技術連絡会の実施、自動・自律化に必要な技術のヒアリング、交通運輸技術フォーラムでの報告等を通して、研究共同体メンバーが、我が国の海事産業及び海事関連

の研究者と広くかつ頻繁に接することになった。このことは、船舶の自動・自律化に関する技術開発や、船舶への自動・自律化技術導入の機運を大きく高めることに繋がったと思われる。また、本研究開始当初、自動・自律化船について協議等を行う際に「噛み合わない議論」が頻繁に見られた。これらは、我が国の海事関係者間で、現状の技術レベルや自動・自律化に必要な要件等の認識に大きな違いがあったためで、船舶の自動・自律化の促進の大きな障害となっていた。この1年間でこの様な「噛み合わない議論」も大きく減り、より具体的な内容についての協議可能な状況が実現できつつあり、今後の自動・自律化船の導入や技術開発が大きく進捗することを期待させる。

10. 知的財産権取得状況

知的財産権は取得していない。

11. 研究成果発表実績

研究成果発表実績を次の通りである。

(1) 論文発表

論文発表：国内 2 件、海外 1 件

- 1) Evaluation Method of Collision Risk by Using True Motion ; Hayama IMAZU ; TransNav Vol 11 (1): pp.65-70 ; 2017.
- 2) OZT 分布を用いた避航アルゴリズムの構築に関する基礎的研究 ; 田丸 人意, 西崎 ちひろ, 榎野 純, 今津 隼馬 ; 日本航海学会論文集第 139 巻 pp.1~pp.9 ; 平成 30 年.
- 3) OZT を用いた伊豆大島西方海域における衝突危険の遭遇特徴に関する解析 ; 西崎ちひろ, 榎野 純, 庄司るり, 今津隼馬 ; 日本航海学会論文集第 139 号 ; 2017.

(2) 口頭発表

口頭発表：国内 3 件、海外 3 件

- 1) Our steps toward Realization of Autonomous vessels ; Akihito HIRAYAMA ; JSEA Lecture and Seminar at NOR-SHIPPING 2019 ; 2019 年 6 月 5 日 ; Oslo, Norway
- 2) 自律操船システムの開発 ; 村田航 ; 日本船舶海洋工学会東部支部ワークショップ「自律化船の実現に向けて」 ; 2019 年 12 月 13 日 ; 東京
- 3) Interpolation of AIS Position by Genetic Algorithm ; Hitoe TAMARU and Ruri SHOJI ; Asia Navigation Conference 2018 ; 2018.
- 4) A Study of high collision risk Area by OZT using AIS data in Tokyo Bay ; Mikiyoshi Ishii, Ruri Shoji ; Proceedings of The 16th IAIN World Congress 2018 ; Vol.1, pp.464-469 ; 2018.
- 5) 中期的行動における OZT による衝突危険の発生を避ける航路の決定に関する基礎研究 ; 田丸 人意, 庄司るり, 西崎ちひろ, 今津隼馬 ; 日本航海学会第 139 回講演会 ; 2018. ; 富山.
- 6) 避航アルゴリズム構築に関する基礎研究 ―海域別 OZT 分布の特徴について― ; 田丸人意, 西崎ちひろ, 福田巖, 庄司るり, 今津隼馬 ; 日本航海学会第 141 回講演会 ; 2019. ; 山口.

(3) その他 (研究内容報告書、機関誌発表、プレス発表等)

その他発表：国内 1 件、海外 0 件

- 1) 第4回交通運輸技術フォーラムパネル展示「自律化船の自律化レベルの検討」；2020年1月27日；東京

12. 参考文献

参考文献は、次の通りである。

- 1) “AUTONOMOUS SHIPS”, BUREAU VERITAS,
<https://marine-offshore.bureauveritas.com/autonomous-ships>, August 17, 2018
- 2) Lloyds Register, “Current and Emerging Cyber Risks facing Maritime Industries”, European Maritime Cyber Risk Management Conference, London, June 2017
- 3) 相手船による妨害ゾーン (OZT) を用いた衝突警報の検討；福戸淳司、今津隼馬；日本航海学会論文集第128号；pp.49-54；2013
- 4) 衝突針路を使った OZT の算出方法；今津隼馬；日本航海学会誌 Navigation Vol.188；pp.78-81；2014
- 5) Evaluation Method of Collision Risk by Using True Motion；Imazu H.；TransNav Vol 11 (1)；pp.65-70；2017
- 6) OZT を用いた伊豆大島西方海域における衝突危険の遭遇特徴に関する解析；西崎ちひろ、榎野純、庄司るり、今津隼馬；日本航海学会論文集第139号；2017
- 7) OZT 分布を用いた避航アルゴリズムの構築に関する基礎的研究；田丸人意、西崎ちひろ、榎野純、今津隼馬；日本航海学会論文集第139号；2017
- 8) 衝突予測線と衝突危険；今津隼馬；日本航海学会誌 Navigation Vol. 186；pp.41-44；2013
- 9) 遺伝的アルゴリズム；北野宏明；産業図書；1993
- 10) 中期的行動における OZT による衝突危険の発生を避ける航路の決定に関する基礎研究；田丸人意、庄司るり、西崎ちひろ、今津隼馬；日本航海学会第139回講演会；2018；富山。
- 11) Interpolation of AIS Position by Genetic Algorithm；Hitoi TAMARU and Ruri SHOJI；Asia Navigation Conference 2018；2018。
- 12) 避航アルゴリズム構築に関する基礎研究 一海域別 OZT 分布の特徴について一；田丸人意、西崎ちひろ、福田巖、庄司るり、今津隼馬；日本航海学会第141回講演会；2019；山口
- 13) 事件事例を参考にした自動運航船安全評価シナリオの作成に関する検討；南真紀子、庄司るり；日本航海学会講演会予稿集 Vol.7、No.2；pp.106-109；2019
- 14) Quantifying protocol evaluation for autonomous collision avoidance, Toward establishing COLREGS compliancemetrics; Kyle Woerner, Michael R. Benjamin, Michael Novitzky, John J. Leonard; Autonomous Robots, Vol.43; pp.967-991; 2019
- 15) 船舶避航操縦の解析-人間・機械系解析の観点より-;小林弘明、遠藤真;日本航海学会論文集、第56号、pp.101-109、1976
- 16) 輻輳海域における避航操船基準の有効性;原潔；日本航海学会論文集、第85号、pp.33-40、1991

以上