

シミュレーションを用いた自動運航船安全評価に関する研究

南 真紀子*, 疋田賢次郎*, 澤田 涼平*, 吉村 健志*
佐藤 圭二*, 丹羽 康之*, 國分健太郎**

Safety Evaluation for Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) Using Simulation

by

MINAMI Makiko*, HIKIDA Kenjiro*, SAWADA Ryohei*, YOSHIMURA Kenji*
SATO Keiji*, NIWA Yasuyuki* and KOKUBUN Kentaroh**

Abstract

Interest in maritime autonomous surface ships (MASS) has been growing with the advancements in IoT, sensing, and other technologies that support autonomous navigation, and efforts are underway in Japan to develop such systems. The National Maritime Research Institute (NMRI) has been researching to improve navigation safety by reducing the workload and minimizing accidents caused by human factors through automated MASS systems. The research aims to address recent issues related to the decreasing and aging crew population as well as improving navigation safety. In addition, safety is important for the practical application of MASS. We have researched establishing an evaluation method and developing and improving the Comprehensive Simulation System, which consists of a Ship Handling Simulator (SHS) and a Fast Time Ship Simulator (FTSS), as tools for MASS safety evaluation. This paper introduces our past research and development on the safety evaluation method of MASS systems.

*知識・データシステム系, **海洋先端技術系 (研究当時知識・データシステム系)

原稿受付 令和7年 2月 3日

審査日 令和7年 2月28日

目 次

| | |
|--------------------------------------|----|
| 1. まえがき..... | 70 |
| 2. SHS（操船シミュレータ）の整備..... | 71 |
| 2.1 船橋..... | 71 |
| 2.1.1 目的と基本仕様..... | 71 |
| 2.1.2 航海機器..... | 73 |
| 2.1.3 景観画像投影システム..... | 73 |
| 2.2 操作室..... | 74 |
| 2.2.1 目的..... | 74 |
| 2.2.2 システム構成..... | 75 |
| 2.3 遠隔監視室..... | 77 |
| 2.3.1 目的..... | 77 |
| 2.3.2 システム構成..... | 77 |
| 2.3.3 遠隔監視室における映像遅延等の実現..... | 78 |
| 3. 自動航行アルゴリズムの安全評価に関する研究..... | 80 |
| 3.1 想定するシステムの構成とシミュレーション評価のスコープ..... | 81 |
| 3.2 避航操船の評価シナリオ..... | 82 |
| 3.2.1 問題の構成と評価方法..... | 82 |
| 3.2.2 見合い関係の分類..... | 83 |
| 3.2.3 シナリオセット..... | 85 |
| 3.3 離着棧操船の評価シナリオ..... | 87 |
| 3.4 まとめ..... | 88 |
| 4. あとがき..... | 89 |
| 謝 辞..... | 89 |
| References..... | 89 |

1. まえがき

海上技術安全研究所（以下、当所）では、近年課題となっている船員の減少や高齢化及び安全性の向上に対応するため、2016年から2022年までの第1期中長期計画において「船舶のICT（Information and Communication Technology: 情報通信技術）を利用した大陸間自律航行、モニタリングシステム等の支援技術に関する研究」を実施し、自動化システムによる労働負荷の低減や人的要因による事故の発生を減らし安全性の向上を図る研究に取り組んだ。

自動化システムを含む自動／無人運航船への関心は、IoT（Internet of Things）やセンシング等の自動航行を支える技術の発展等も背景に高まっており、日本でもその実現に向けた取り組みが進められている。国土交通省が2018年に公表した自動運航船の実用化に関するロードマップは、3段階で実用化に向けた取り組みを示しており、陸上からの操船やAI等による行動提案や情報提示により船員をサポートする船舶である「フェーズII自動運航船」は2025年の実用化を目標としている。また、「フェーズIII自動運航船」は、自律性が高く、最終判断がシステムに委ねられる領域が存在する船舶であり、その実現に向けた研究開発が進められている。一方、日本財団の無人運航船プロジェクトMEGURI2040では、実証実験の実施等により無人運航船の実用化を目指している。

本研究では、自動化システムとして避航操船システム、離着棧操船システム、遠隔監視・操船システム、他船等検知システムの研究開発を当所が管理する小型実験船「神峰」を用いた実船による検証を実施しつつ進めてきた。また、このようなシステムの実用化には安全を担保する仕組みも必要であり、日本財団の助成を受けて日本

船舶技術研究協会が実施した「MEGURI2040に係る安全性評価」事業の委託研究の一環として、安全評価手法の研究開発並びに安全評価プラットフォームとしてこれまでの操船リスクシミュレータに代わる SHS (Ship Handling Simulator: フルミッション型操船シミュレータ) 及び高速シミュレーションを実行する FTSS (Fast Time Ship Simulator) からなる総合シミュレーションシステムの開発と整備を進めた。

本報告では、第1期中長期計画期間で実施された安全評価に係る研究のうち、総合シミュレーションシステム (SHS) の整備及び自動航行アルゴリズムの安全評価に関する研究を紹介する。なお、自動化システムの研究開発に関しては海上技術安全研究所報告第22巻2号 (2022年9月)「小型実験船「神峰」による自動運航技術に関する研究」で報告しており、あわせてご一読いただければ幸いである。

2. SHS (操船シミュレータ) の整備

本章では、総合シミュレーションシステムを構成する「操船シミュレータ」(SHS: Ship Handling Simulator) について、その整備内容を報告する。

自動運航船の実用化には、事前に運航の安全性の評価が必要である。自動運航中に必要が生じた場合、操船権を「人」に移行することとなる。これは、有人の自動運航での巡航中のみならず、自動離着陸中や遠隔監視中においても同様である。その際には、自動航行システム、遠隔監視・制御システムと、人との間の HMI (Human Machine Interface) が適切であるかが評価の対象となる。また、自動避航アルゴリズムや自動離着陸アルゴリズムの安全評価では、網羅性の確保も重要であり、FTSS による多数の評価シナリオによる評価と SHS を用いた人による評価を組み合わせて実施することが検討されている¹⁾。「人」(実験参加者)による評価には、実験参加者による実時間の操船を基本とし、各種自動航行システム、遠隔監視・制御システム等外部モジュールとの接続機能を持つ操船シミュレータが必要である。SHS は、実船に近い環境で操船を模擬可能な船橋を備える。船橋は操船に対応した航海機器の動作や視覚・音響等の操船環境模擬機能や、離着陸等特殊な状況の模擬機能、各種船種、気象・海象や夜間・薄暮等の広範な航行環境の再現機能を備える。SHS は、シナリオ作成等実験の準備や実験環境を提示し記録を行う操作室を有する。操作室では、実験参加者による操船の記録 (ログファイル生成) 機能。実験参加者の行動や発話を記録する夜間暗視対応の監視カメラシステムをオペレータが操作する。また、自動運航船においては、運航中は陸上の ROC (Remote Operation Center) からの監視 (monitoring) が必須になると考えられることから、自動航行システムの遠隔監視を模擬するため、遅延を有し不明瞭な通信を模擬できる遠隔監視室を整備した。

2.1 船橋

2.1.1 目的と基本仕様

SHS の目的は、船員である実験参加者に実際の船舶と極力同等の感覚で航海当直を実施させることにある。そのため、実機の航海機器を用いての見張りや操船を可能とし、船橋からの視点で死角の無い景観画像を再現している。これは自動航行システム等外部モジュールを SHS と接続し、その機能を船橋において評価する際に有効である。

今回開発した SHS の仕様の特徴は、幅、長さ共に約 5m という、操船シミュレータとしては広い甲板 (床) 面にある。甲板面はフリーアクセス式のカーペット敷きとして、任意の位置にレーダー等の航海機器を設置可能であるため、利用者の求めに応じて多種多様な航海機器レイアウトが可能である。また、従来の箱形の船橋モックアップでは無く、壁を無くした舞台状の船橋とした。これにより、後方視界を含む全周 360°の景観画像を実現し、また、最近の船に見られる甲板面から天井面まで大面積のガラスで覆われた視野の広い船橋の再現を可能としている。図 2.1 図 2.2 に整備した船橋の外観と航海計器等の配置例・船橋視界を示す。



図 2.1 船橋外観



図 2.2 航海機器と船橋視界（操舵位置より）

2.1.2 航海機器

SHSの目的は、前述のとおり、船員である実験参加者に実際の船舶と極力同等の感覚で航海当直を実施させることにある。表2.1に船橋に関連するハードウェアの仕様を示す。船橋の寸法については大型船の船橋に準じ、設置場所の許す範囲で極力大きくすることとし、長さ及び幅について各5mを確保した。これは船橋内に被評価システム等を設置する際にも有効である。また、実際に操作する主要な航海機器については実機を備えることとした。レピータコンパス、操舵スタンド、レーダー及びECDIS（Electronic Chart Display and Information System：電子海図情報表示装置）、国際VHF無線機等がそれに当たる。オーバーヘッドパネルの主機回転数計、舵角指示器等については、操作することは無く表示を見る機器であるため液晶画面による模擬表示とした。これにより、シナリオ読み込み時間の短縮や、機械的不具合の低減が期待される。主機についても模擬する船種によって、FPP（Fixed Pitch Propeller）船またはCPP（Controllable Pitch Propeller）船、1軸船または2軸船に各々対応可能である。加えてバウスラスタやスタンスラスタを装備する船舶や、全方向に推力を制御できるアジマスポッドについても、3ポッド船まで対応しており、多様な船種での離着岸操船の模擬も可能である。

表2.1 船橋関連のハードウェア仕様

| 項目 | 仕様 |
|----------|--|
| 船橋モックアップ | 船橋機器等配置可能領域 幅×長さ：5m × 5m 窓枠・壁面等の無い、全周オープンな舞台状の構造 甲板面（床面）上の任意の位置に航海機器を設置可能 |
| 航海機器 | オーバーヘッドパネル（主機回転数計、CPP翼角計、速力計、舵角指示器、回頭角速度計、風向・風速計、時計、傾斜計） レーダー：FURUNO FAR-3220（S-band, X-band 各1台） ECDIS：FURUNO FD-3300 1台 レーダー信号発生装置（模擬空中線出力用） 2式 操舵スタンド：YDK テクノロジーズ PT900 1台 レピータコンパス：YDK テクノロジーズ MKR050 1台 通信コンソール 国際VHF：FURUNO FM-8900S 1台 MFD（Multi-Function Display） 機関コンソール エンジンテレグラフ（2軸）、CPPダイヤル（2軸）、バウスラスタ制御、スタンスラスタ制御、アジマスラスタ制御（3ポッド） 仮想双眼鏡：NVIS Ranger47 1個 姿勢・方位角センサ：InterSense Inertia Cube4 |

2.1.3 景観画像投影システム

船員である実験参加者が実際の船舶と極力同等の感覚で、航海当直を実施するためには、船橋からの景観画像の再現は極めて重要である。景観画像を再現するためのシステムの仕様を表2.2の景観画像投影システムと画像生成用計算機に示す。SHSが模擬する船橋視点からの景観画像の特徴は、360°の水平視野角をカバーする円筒型スクリーンと、舷側船首から船尾まで死角無しに各舷180°をカバーする下方視界スクリーンである。これによって、全周に渡って死角の無い目視見張りが可能である。離着岸時の模擬においては、円筒スクリーンから切れ目無く接続する下方視界スクリーンが有効となる。円筒スクリーンは、遠見（後述）の観点から、既存の水平視野角240°直径13mのものを活用し、120°分増設することにより全周化を実現した。当所の円筒スクリーンは、円筒中心からスクリーンまでの距離が6.5mである。一般に5mで眼の水晶体は無調節状態になると言われている。5m未満のものを見ることを近見、5mを超えて離れたものを見ることを遠見といい、円筒中心付

近に設定したコニングポジションからスクリーンを注視することは遠見となる。このことは、円筒スクリーンで水平線を注視する際、実験参加者が景観を充分遠方に感じ没入感を増すことに寄与すると考えられる。

プロジェクタは、現実の景観画像に近づけるために、高精細かつ明るいものほど望ましい。STCW 条約、及び船員法 身体適性基準では、海技士（航海）の視力は各眼（単眼）0.5 以上を要求している。視力と視角の関係は、

$$\text{視力} = 1 / \text{ランドルト環のすきまの視角} \quad (': \text{分を示す。}) \quad (2.1)$$

の式より、視力 0.5 の視角は、2'、視力 1.0 の視角は 1' となる。ここでは、視角 1' を水平視野角の解像度 1' と仮定し、必要な水平画素数を求める。全周 360° を投影するためには、投影距離や投影可能な角度との関係からプロジェクタは少なくとも 6 台は必要である。プロジェクタ 1 台の水平視野角の覆域を 63°（3° はブレンディングのオーバーラップ分）とすると、1° は 60' であるため 63° は 3,780' となる。よって、水平視野角の解像度 1' を実現するために、各プロジェクタの水平方向の解像度（画素数）は、3,780 pixel 以上必要となる。近い規格としては、4K プロジェクタの水平方向画素数 3,840 pixel があったため、今回整備するプロジェクタの水平解像度の仕様とした。

スクリーンとプロジェクタの位置関係やスクリーン形状等により、プロジェクタの有する解像度の映像がそのままスクリーン上で確認できるわけではない。ただ、視力 0.5 で判別できる画像を、ある程度の余裕をもって投影できる仕様となった。

プロジェクタの画像素子には、黒の再現に有利な DLP（Digital Lighting Processing）を採用した。また、夜間の表現において、従来のプロジェクタの機能によるブレンディング機能では、隣接するプロジェクタ間のオーバーラップするブレンディング領域が帯状に明るくなる現象が生じ、没入感を妨げる。これを防ぐために帯状のフィルタを夜間再現時に投影レンズの前に置く光学ブレンディング方式を採用し、夜間視界の再現度の向上を図った。

表 2.2 景観画像投影システムのハードウェア仕様

| 項目 | 仕様 |
|------------|--|
| 景観画像投影システム | スクリーン 円筒スクリーン 直径 13.5 m, 水平視野角 360° 下方視界スクリーン 船首～船尾 各舷視野角 180° プロジェクタ Christie Digital Systems Inc. 4K10-HS 10 台（水平視界 6 台, 下方視界 4 台） 明るさ: 11,000 lm (ANSI) 画像素子: 1 チップ DLP (Digital Lighting Processing) 解像度: 3,840 x 2,160 pixel 光源: レーザー |
| 画像生成用計算機 | Dell Technologies Inc. Precision 3930 10 台 グラフィックボード: NVIDIA Quadro RTX4000 |

2.2 操作室

2.2.1 目的

操作室では、シナリオの作成、シミュレータによる実験の実施、実験結果の解析等が行われる。このため、操作室は、実験参加者に提供される情報の内容を確認する情報表示ディスプレイ、シナリオ生成やシミュレーション操作を行う操作卓、および船橋での実験参加者の行動を撮影するとともに表示し記録する監視カメラシステムから構成される(図 2.3)。

2.2.2 システム構成

操作室で作業に従事する数人が、同時に操作内容を確認し、景観画像や交通流の状態や船橋内の様子を監視できるよう、操作室の壁面に大型の情報表示ディスプレイを設置した。情報表示ディスプレイの配置は、上段左からコントロールパネル B、オーバーヘッドパネル、景観画像 D(150度~210度)、監視カメラ映像 A、監視カメラ映像 B。中段は左から景観画像 E(210度~270度)、景観画像 F(270度~330度)、景観画像 A(330度~30度)、景観画像 B(30度~90度)、景観画像 C(90度~150度)。下段は左から、下方景観画像(左)、レーダー画像(Xバンド)、レーダー画像(Sバンド)、ECDIS、下方景観画像(右)となっている(図2.4)。

また、4名の実験者が同時に座位姿勢で作業できる広さを確保する操作卓を操作室中央に設置した(図2.5)。操作卓には、操作用のディスプレイ2面と、監視用ディスプレイ6面が備えられている。操作卓のディスプレイの配置は、図2.6に示す通りである。

なお、情報表示ディスプレイの配置による水平・垂直視野角の増大に伴い、端にあるディスプレイの視認が困難になることから、上方及び左右端のディスプレイは作業者に向けて中心側に10度傾けて設置している(図2.7、図2.8)。

実験参加者の行動を記録し、実験参加者がアクセスしている情報から状況認識を推定するため、船橋内に監視カメラ、操作室内に監視用ディスプレイとレコーダを設置した。監視カメラで、実験参加者の位置、操作している航海機器、頭部や視線の向きを捉えられるよう、パン・チルト・ズームができるPTZカメラを3台、ドーム型のカメラを5台、船橋内を俯瞰するための筒型のカメラを1台の計9台設置した。なお、PTZカメラは実験参加者がレーダーやECDIS等の操作を行っている際の手元が撮影できるよう、船橋内前方に設置している。撮影された映像は、LANケーブルを経由して操作室で監視できるうえ、同じくLANケーブルを経由して後述する遠隔監視室でも監視が可能である。また、レコーダには10TBのハードディスクが内蔵されており、9つの監視カメラで撮影される映像は約2か月間分の連続記録が可能である。



図 2.3 操作室の様子



図 2.4 情報表示ディスプレイのレイアウト (数字は画面のサイズ)

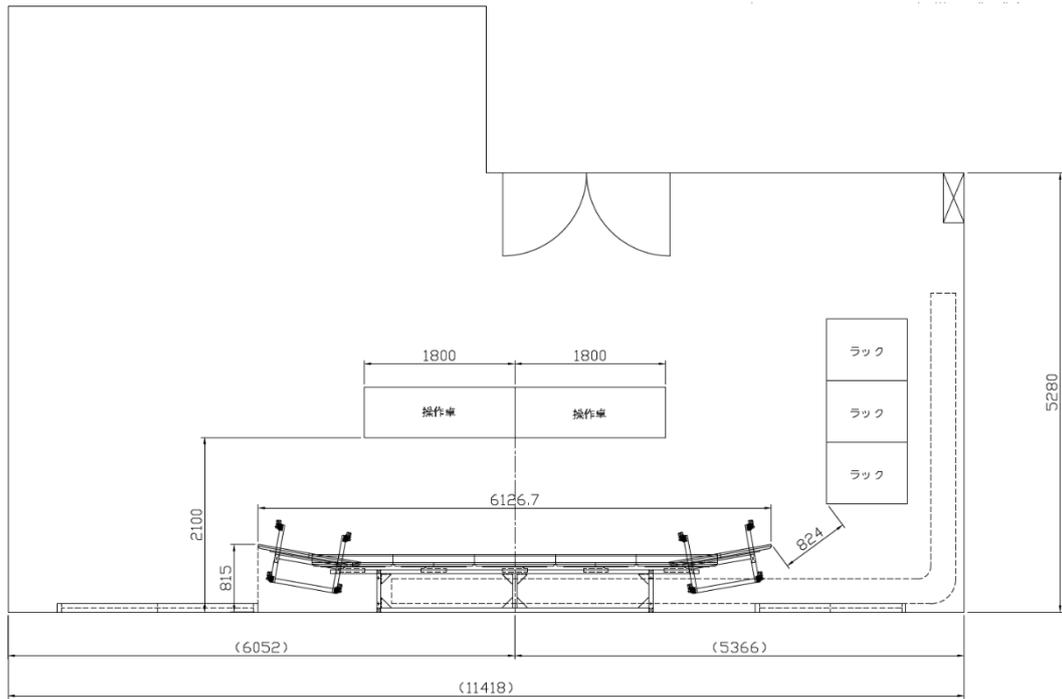


図 2.5 操作室のレイアウト

| | | | | | | | |
|------------------------|---------------------|---------------------|-------------|----------------------|----------------------|-----------|---------------|
| 機関・ウイング コンソール 21 | RADAR Xバンド 21 | RADAR Sバンド 21 | ECDIS 21 | コントロールパネル A 32 | コントロールパネル B 32 | 双眼鏡 21 | 故障ステータス 21 |
|------------------------|---------------------|---------------------|-------------|----------------------|----------------------|-----------|---------------|

図 2.6 操作卓のディスプレイのレイアウト (数字は画面のサイズ)

中央部側面図

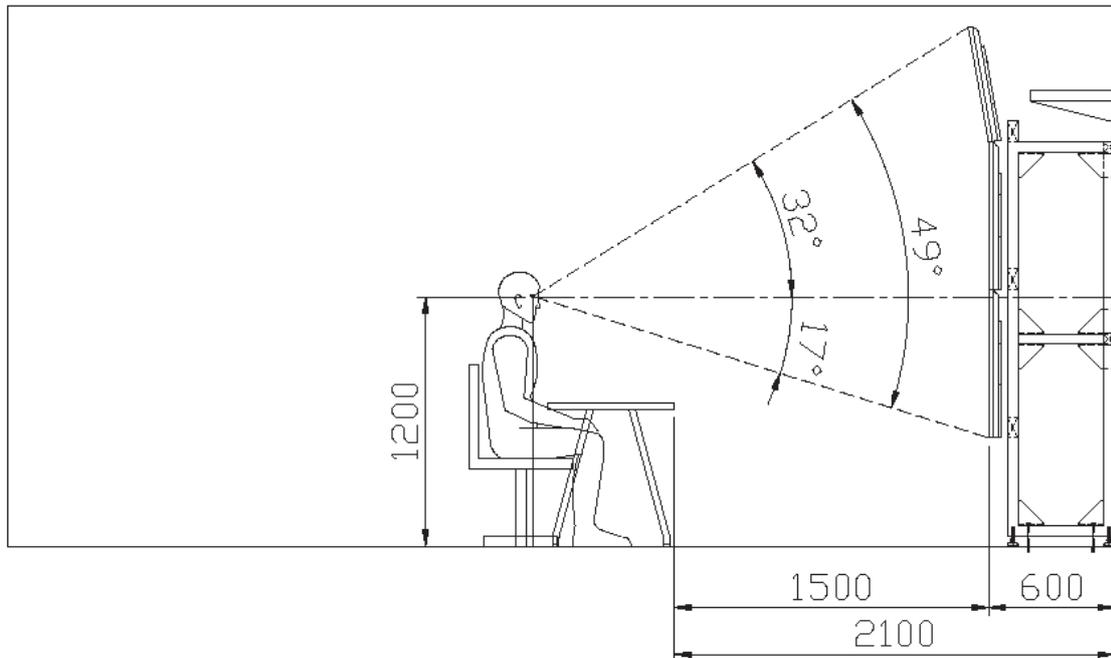


図 2.7 操作卓と情報表示ディスプレイのレイアウト

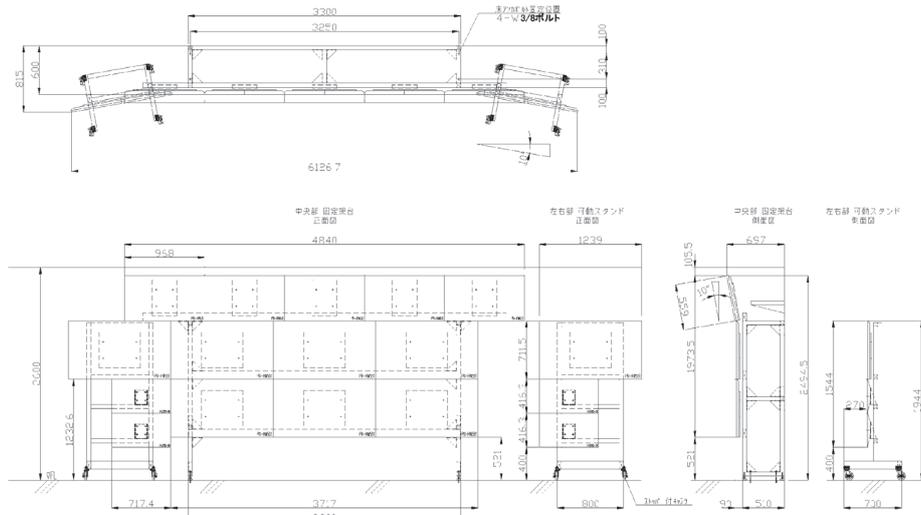


図 2.8 情報表示ディスプレイのレイアウト

2.3 遠隔監視室

2.3.1 目的

自動運航船では、陸上での監視（モニタリング）が必須となることから、SHS（操船シミュレータ）の機能の一つとして、遠隔監視室を整備した。遠隔監視室は、操作室と同等の機能を有する情報表示ディスプレイと操作卓を有し、自動で運航している船から遠隔監視室まで送信される情報として、SHS で表示している景観画像、航海機器の情報、監視カメラシステムの映像等を表示できる。

2.3.2 システム構成

遠隔監視室は、操作室で実施できる監視や操作の一部を、当所の5号館1階でもおこなえるようにする設備と機能を持つ。

遠隔監視室から監視できる情報は、景観画像、下方景観画像、オーバーヘッドパネル等、機関系・ウイングコンソール、双眼鏡、故障ステータスとした。また、遠隔監視室から操作できる機能は、コントロールパネルの一部と景観画像の拡大機能とした。

遠隔監視室には、画像を生成する機能を持つ PC および ECDIS, RADAR を表示できる機器を備える。ディスプレイは、それぞれ図に示すように 55 インチ×5 台、43 インチ×5 台、32 インチ×2 台、21 インチ×5 台あり、

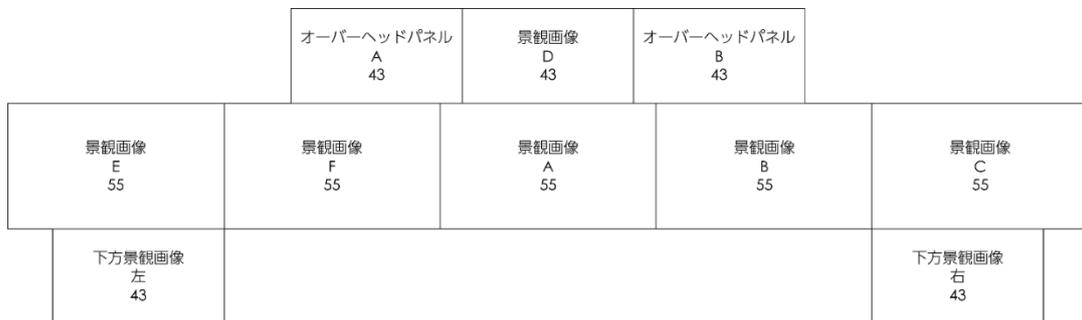


図 2.9 情報表示ディスプレイの配置 (数字は画面サイズ)

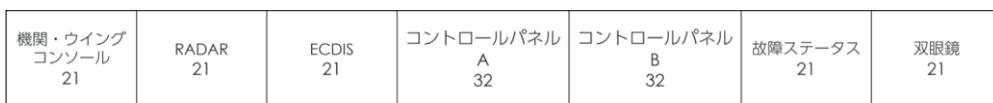


図 2.10 操作卓のディスプレイの配置 (数字は画面サイズ)

解像度はプロジェクションシステム等に表示される画像情報を欠損なく再現できる 3,840×2,160 以上（55 インチ、43 インチ、32 インチ）、1,600×1,200 以上（21 インチ）以上、水平垂直視野角ともに 178° 以上（32 インチ）であり、かつ、操船シミュレータ及びソフトウェアとの接続等が最適化されている。なお、ディスプレイ及び操作卓等は、操作室に準じて配置されている（図 2.9、図 2.10）。遠隔監視室のシステムに係る計算機および航海機器の仕様は表 2.3 の通りである。

表 2.3 遠隔監視室計算機および航海機器仕様一覧

| 項目 | 仕様 | 数量 (式) |
|--|----------------------------------|--------|
| 制御用計算機 | デル・テクノロジーズ Precision3930 | 1 |
| 景観画像用計算機 | デル・テクノロジーズ Precision3930 | 8 |
| 景観画像の拡大用（双眼鏡用）計算機 | デル・テクノロジーズ Precision3930 | 1 |
| オーバーヘッド（頭上計器）パネル用計算機 | デル・テクノロジーズ Precision3260 | 1 |
| ウイングコンソール用計算機 | デル・テクノロジーズ Precision3260 | 1 |
| MFD 用計算機 | デル・テクノロジーズ Precision3260 | 1 |
| レーダー信号発生計算機 | デル・テクノロジーズ Precision3460 | 1 |
| レーダー | 古野電気 FAR-3220, コンソール（キャスター付き）を含む | 1 |
| ECDIS | 古野電気 FMD-3300, コンソール（キャスター付き）を含む | 1 |
| プランニングステーション | 古野電気 PS-100 | 1 |
| 航海計器（レーダー、ECDIS、プランニングステーション等）のデータを接続するための専用ハブ | 古野電気 HUB-3000 古野電気 HUB-100 | 1 1 |
| 無停電電源装置 | APC SMT750RMJ1U | 1 |

2.3.3 遠隔監視室における映像遅延等の実現

自動運航船における遠隔監視室の目的、構成については前項までに述べたところであるが、自動運航船と遠隔監視室が実現された場合、情報の時間遅れが課題の一つとしてあげられる。自動運航船の運航環境が機器の故障等により運航設計領域（Operational Design Domain: ODD）の範囲を超える場合には、システムの設計にもよるが遠隔監視室に運航権限が委譲され、運航の判断を行う場合がある。この際も通常の有人運航船と同様に周囲の見張りや衝突のおそれの有無とその回避の判断が最重要タスクとなる。遠隔監視室には、自動運航船に搭載されたカメラの映像と各種航海関連データが伝送されるが、時間遅れが発生する。この時間遅れが長時間になると遠隔監視室における衝突のおそれの判断に影響を及ぼすこととなる。ここでは、遠隔操作室への映像伝送の遅延が、遠隔監視室における判断への影響を調べることができるように映像遅延の方法について検討した。

船陸間通信で衛星通信を用いる場合、赤道上空 36,000 km の衛星を経由するとすると、自動運航船→衛星→陸上局→遠隔監視室の伝送で、約 0.25 秒の遅延が発生する。沿岸航行中で、携帯電話網で遠隔監視室に伝送できたとしても、その後のインターネット回線の利用では時間遅れに加えて、実効スループットの低下、パケットロスなどが起きる可能性がある。近年インターネットによるライブ配信が多数行われているが、数秒から数十秒の遅延が発生している。

今回は、映像伝送の時間遅れを実現できるシステムを構築した。シミュレータ用の景観画像生成 PC が生成する景観画像を分配（ビデオカードのクローン機能を利用）し、分配した片側の景観画像の HDMI 出力をライブストリーミング機器に接続し、ネットワークでの伝送（例えば RTSP : Real Time Streaming Protocol）に変換する。RTSP は、インターネットのライブ配信サービス等でも利用可能なプロトコルである。この情報を別の PC（RTSP 配信に対応したブラウザ、プレイヤーが必要）で受信することによりネットワークを介した映像伝送が実現できた。ただし、ネットワーク環境が有線のギガビット・イーサネットであるため、遅延はほとんど発生し

ない。このため、RTSP 配信に変換したネットワーク情報に対して疑似ネットワークとして OS を Linux (Ubuntu) とし、2つのネットワークインタフェース (NIC) を有する PC を用意した。Linux (Ubuntu) PC は、1つめのネットワークインタフェース (NIC) で RTSP 配信情報を受信し、2つめの NIC 側のネットワークに時間遅れのコマンドとあわせて、RTSP による景観画像を配信する。これにより、RTSP による配信を受信した PC で、設定した時間の分だけ遅れた景観画像を表示することができることを確認した。システム構成の概要を図 2.11 に示す。

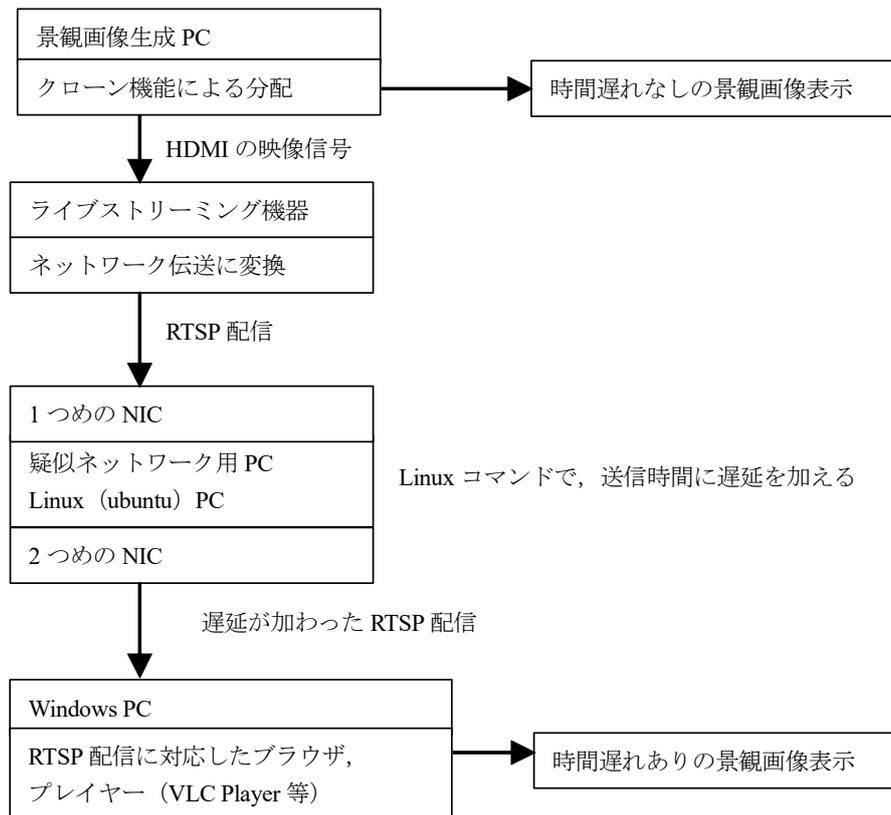


図 2.11 景観画像の時間遅れシステムの構成概要図の例

時間遅れを実現するために、Linux の traffic control 機能を使用した²⁾。Linux コマンドの例を示す。

5000ms (5 秒) 遅延させる場合

```
# tc qdisc add dev eth1 root netem delay 5000ms
```

コマンドの最後の 5000ms の数値を変えることにより、時間遅れの設定が可能となる。

上記のコマンドの場合は、一様な時間遅れ (5 秒固定) であるが、実際の船陸間通信では、ゆらぐこともある。それに対応したコマンド (例: 5 秒±0.1 秒に変更) なども可能である。

```
# tc qdisc change dev eth1 root netem delay 5000ms 100ms
```

他にもパケットロスに対応したコマンド (例: 10%のパケットロス)

```
# tc qdisc change dev eth1 root netem loss 10%
```

や実効スループットの上限を設ける帯域制限をすることも可能である。

実際に時間遅れなしの景観画像と 5 秒を遅らせ場合の景観画像を並べて比較した状況を図 2.12 に示す。図の右側画面が遅れなし、左側画面が 5 秒遅れとした場合である。自船が左に旋回している状況であり、左右画面で時間差があることがわかる。



図 2.12 時間遅れの有無を実現したシミュレータ景観画像（左に変針時，左側画面が 5 秒遅れ）

また遠隔監視室には、レーダー、ECDIS の航海計器も整備しており、これらについても情報の表示遅れを実現する必要がある。具体的には、本船の位置情報である GPS 情報、他船の位置情報である AIS 情報である。これらのデータはいわゆる NMEA (National Marine Electronics Association) 0183 と呼ばれている IEC 61162-1 で規定されており、従来シリアル通信 (RS-422) を利用していた。近年は、シリアル通信に変わり、ネットワークで情報通信を行う IEC 61162-450 が規定され、本シミュレータでも採用している。遠隔監視室の航海計器にもシミュレータの主計算機からギガビット・イーサネットでも GPS や AIS の情報が送られており、情報に遅れはほとんどない。このため、映像の遅延と同じ方法で、シミュレータの主計算機と航海計器の間に疑似ネットワークとして OS を Linux (Ubuntu) とし、2 つのネットワークインタフェース (NIC) を有する PC を用意した。映像遅延と同様に Linux の traffic control 機能を使用することにより、遠隔監視室の航海計器に表示する情報についても遅延を実現可能とした。

3. 自動航行アルゴリズムの安全評価に関する研究

自動運航船（あるいは Maritime Autonomous Surface Ship: MASS）の技術開発が進められており、国際的な規則についても議論されているところである³⁾。自動運航船の要素技術である自動避航操船と自動離着岸操船の機能の安全性を検証する手段を構築することは、これらの技術からなる自動運航船の社会実装に向けて必要不可欠である。本章では、FTSS 等のシミュレータを用いた、自動避航操船と自動離着岸操船の機能の安全性を検証するための手法³⁴⁾を概説する。

自動運航船の安全性を検証するためには、自動運航船が、自動避航操船や自動離着岸操船を実装した個別のシステムから、各システムが接続され船舶に搭載された船全体を一つのシステムとして見なす段階までの複数の開発段階が存在することを念頭に置いて、その各段階に応じて適切な検証手段を講じることが必要である。開発される自動運航船のシステムは、運航する海域、人の関与の度合い、搭載する船種や大きさ等の様々な条件により、求められる安全性が変化する。これらの自動運航船の運用上の諸条件は、自動運航船の特性を記述した文章である ConOps (Concept of Operations)、船舶の運用上の能力及び制限である運用領域 (Operational Envelop: OE)、個々のシステムが正常に動作する条件としての運航設計領域 (Operational Design Domain: ODD) といった形で記述される。ConOps, OE, ODD や自動運航船および搭載される自動航行システム (Autonomous Navigation System: ANS)³⁾の特性を踏まえて、運航中のあらゆる状況を想定したリスク評価が実施され、その安全性が評価される。この中で、自動運航船の主要な機能である、自動避航操船および自動離着岸操船のタスクにおいて、様々な条件下におけるシステムの性能を評価する手段としてシミュレーションがある。

自動避航操船および自動離着岸操船のタスクは、周囲状況の認識を行うシステムや操船計画を立案するシステム、そして操船制御を行うシステムに加え、警報やデータ記録といった複数のシステムの連携により実行される。シミュレーションを用いた評価においては、自動避航操船や自動離着岸操船の機能要求仕様、またリスクアセスメントに基づいて、求められる機能や安全性が発揮できることを示す必要がある。そのため、求められる機能や安全性、それに係るシステムの応答などを網羅的に検証できるシミュレーションのシナリオが必要である。

ここでは、自動避航操船および自動離着岸操船のタスクを実施するうえで、センサ系による状況認識システムによる情報が正常に得られることを前提として、評価されるシステムが所望の機能を有しているかを評価することをスコープとして、システムの安全評価手法を構築する。したがってシミュレータでは、自船(自動運航船)および他船の船体運動および、ANS等とやり取りされる信号のうち各アクチュエータへ入力されるものと AIS 等の ANS へ入力される信号等が模擬される。このような、数値シミュレーションを用いて次節で述べる自動航行のアルゴリズム部分の安全性評価を実施することを考える。そこで、本報告では、シミュレーションにおける安全性評価に必要なシナリオを中心に報告する。

3.1 想定するシステムの構成とシミュレーション評価のスコープ

本研究では、シミュレーション評価の対象について整理する。ANS あるいはこれに含まれる自動航行のアルゴリズムとしては、警報機能やデータ記録機能等を除いた操船を実行するために必要な主たる機能として、図 3.1 に示すような3つの機能を例として考える。ANS は、あらかじめ与えられた操船計画等に基づき、まず自船の周囲の状況認識を実行する。ここで収集・分析された情報に基づき、例えば避航操船の要否を決定したり、港内操船や離着岸操船へと操船モードを変更したりするなどして、次の行動を計画することになる。計画に基づき計算された操船制御部への指令を受けて、各制御器が船のアクチュエータを制御し、自動航行を実行する。ANS は、様々な機器やソフトウェア等から構成されるシステム群からなるものであり、各システムやソフトウェアモジュールの単体試験と、それらが相互に接続された状態での試験が必要となる。

シミュレーションによる評価においては、シナリオを設定することで実船で実施が困難な様々な条件下において評価することが可能であることが利点であるが、たとえば実機のデータの不足や実装の手間などからすべてのシステムの挙動をシミュレーションで再現することはできない。そこで、図 3.1 に示すように、自動避航操船ならびに自動離着岸操船のアルゴリズムのシミュレーションによる評価のスコープを定めた。

自動避航操船に関しては、国内であれば、主に海上交通三法(海上衝突予防法、海上交通安全法、港則法)に基づいた安全な操船であるかに関心のあるところとなる。一方で、避航操船を実施する際の操船制御に関しては、既存の HCS (Heading Control System) や TCS (Track Control System) といった装置によって十分実行できるものと想定される。以上から、自動避航操船アルゴリズムについては、避航操船の計画を担う部分をシミュレーション評価の対象とした。

一方で、自動離着岸操船のアルゴリズムについては、離着岸の経路や操船制御の計画策定に加え、速力の制御やスラスト等のアクチュエータの制御等、HCS や TCS でカバーされない低速時の操船モードが含まれる。このような事情から、自動避航操船アルゴリズムのスコープとは異なり、自動離着岸操船アルゴリズムの評価のスコ

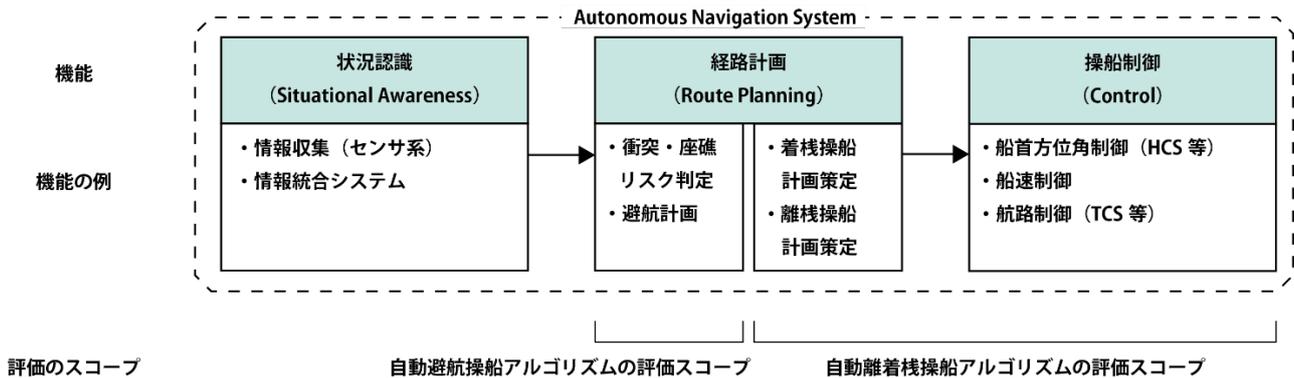


図 3.1 ANS の例および自動航行アルゴリズムとシミュレーション評価のスコープ

ープとしては、自動離着栈操船の計画部と操船制御部を対象とした。

なお、本報告では、数値シミュレーションにおいては重要となる操縦運動モデルについては取り扱わない。自動避航操船については、緊急的な避航動作を除いてその操船のほとんどは通常の船首方位角制御や航路制御が行われているであろうことを想定すれば、操縦運動モデルとしては、IEC62065などに記述される運動モデル等が利用できる。操船において、変針による減速を用いる場合には運動モデルがその特性を再現できることが望ましいが、一方で、採用する運動モデルの変針時の減速幅が実際より過大に評価される場合や、変針による減速を考慮せず他船との想定外の接近や避航タイミングの遅れで、避航操船結果の評価に影響を与える可能性が懸念される。自動離着栈操船や港内操船においては、船速が低下するとともに操船制御に対する応答性が悪化することや、港外での操船と比較して座礁や港湾設備等への接触などのリスクが増加する。そのため、より詳細な運動モデルの需要があり、国内で議論されている⁷⁸⁾⁹⁾。

3.2 避航操船の評価シナリオ

3.2.1 問題の構成と評価方法

自動避航操船アルゴリズムのソフトウェア試験として、数値シミュレーションによる評価手法を開発した。前提として、特定の海域や船種に求められる操船ではなく、あらゆる自律化のレベルや航行海域に共通するものとして、オープンシーにおける交通流を対象とする。なお、陸地や No Go Area 等の情報を含んだり、多数の相手船が含まれたりするような実海域を想定した交通流シナリオ（実海域シナリオ）については、ここでは扱わないため、参考文献⁹⁾を参照願いたい。

自動避航操船アルゴリズムを評価する上で、オープンシーにおいて遭遇しうる交通流を網羅的に検証することを目的としてシナリオセットを構築した。自動避航操船アルゴリズムの評価としては次のような項目が考えられる：

- ・ COLREGs（もしくは海上衝突予防法）で定められた航法に関する評価
- ・ 航行制限中の操船に関する評価
- ・ 幅広い時間スケールでの避航操船の評価
- ・ （漁船等の）停止船舶に対する応答の評価
- ・ 他船舶の変針に対する応答の評価

COLREGsについては、特に Rule 8, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18 を検証することとした。これは、状況認識、とくにセンサ系をスコープから除外したことによる。航行制限中の操船は、今回は取り扱わないが、航行制限の内、Rule 9 の狭い水道等や Rule 10 の分離通航方式については、今回提案するシナリオに、No Go Area や分離通航帯の情報を加えることでテストができる。

時間スケールについては、後に示す評価シナリオにおいて、設定する最接近時間（TCPA）を変化させることで対応する。時間スケールを広く取る理由は、例えば、衝突までの時間が短い場合の短期的な避航動作と見合い関係と認める前に当たる場合の長期的避航動作のように同じ見合い角でも異なる特性の避航問題となることがあるためである。アルゴリズムの検証としては、短期的（緊急時の避航動作、停止船・変針への対応）、中期的（平均的な運航状況での応答、衝突の恐れがある状況での応答）、長期的（搭載するセンサで捉えられる最大距離付近で

の避航動作、見合い関係になると認識される前の操船等) といった段階を設けて、網羅的に設計されるべきである。

また、相手船は基本的に等速直線運動をするものとして扱うが、停止船舶の始動や他船の変針についても評価が必要となる。これは、一般の船舶に加え、漁船などの存在を想定している。

評価については、システムに対するリスクアセスメントのもと、シミュレーションを用いた検証においては主に表 3.1 に示されるような項目について、避航操船アルゴリズムが出力する避航計画が求められる水準をクリアできるかを確認する。表 3.1 から、シミュレーションの結果として評価項目の列に列挙される項目を評価するために、2 船間の離隔距離、相対方位変化率、最接近距離 (DCPA)・最接近時間 (TCPA) に加えて航跡等が出力されることが期待される。また、これらの指標に加えて、その他の衝突リスク算定手法を加えることも可能である。また、本報告では取り扱わないが、実海域を想定したシナリオでは、ハザードの ID3 や 4 といった、航行海域の漂流物や海岸線、NGA 等の制約条件が加わった条件で検証できる⁵⁾。

表 3.1 自動避航アルゴリズムに対するハザード、原因、評価項目、評価手法

| ID | ハザード | 原因 | 評価項目 | 手法 |
|----|-----------------|-------------------------------|---------------------|----------------------------|
| 1 | 他船とのニアミス | 不適切な避航経路の設定、経路偏差の発生、センサノイズ、外乱 | 離隔距離、方位変化、避航経路計算結果 | 1対1および1対多のテストシナリオでシミュレータ評価 |
| 2 | 他船との衝突 | 同上 | 離隔距離、経路偏差、避航経路計算結果 | 1対1および1対多のテストシナリオでシミュレータ評価 |
| 3 | 漂流物、物標との衝突 | 同上 | 離隔距離、経路偏差、避航経路計算結果 | 1対1および1対多のテストシナリオでシミュレータ評価 |
| 4 | 進入禁止区域(NGA)への侵入 | 同上 | 経路偏差、避航経路計算結果 | 2段階の航行可能距離を設定し、経路偏差を評価 |
| 5 | 陸地への乗り上げ | 同上 | 経路偏差、避航経路計算結果 | 2段階の航行可能距離を設定し、経路偏差を評価 |
| 6 | (交通法規の違反) | 同上 | 1対1の見合い関係における、避航経路、 | 見合い関係の分類により網羅的に確認 |

3.2.2 見合い関係の分類

COLREGs においては、特に行会い (Head-on)、横切り (Crossing) における保持船と避航船、追越し・被追越し (Overtaking/Overtaken) に関する航法が定められている。COLREGs を考慮した避航操船アルゴリズムの研究では、これらの見合い関係を定義することが必要である。定義されたルールに従って自船と他船がどの見合い関係にあるかを判断し、それぞれの状況に応じた COLREGs に定められた航法を選択することになる。

見合い関係の分類については、数多くの先行研究が存在する。これは、COLREGs において、明確に見合い関係の定義が与えられているのは、Rule 13 の追越し・被追越しのみであり、その他の見合い関係については、自船と相手船がどのような関係にあるとどの見合い関係になるのかの定量的な定義は与えられていないことによる。

(1) 追越し

追越しの定義は、Rule13 において 2 船の相対方位に基づき定義されている。対応する海上衝突予防法の第 13 条の 2 では“船舶の正横後二十二度三十分を超える後方の位置 (夜間にあつては、その船舶の第二十一条第二項に規定するげん灯のいずれをも見ることができない位置) からその船舶を追い越す船舶は、追越し船とする。”とある。

自船 (MASS) が被追い越し船となる場合は、相手船が自船の正横 22.5° を超える後方から追い越していると判断されるような針路を取っている場合と理解できる。ここで単純に自船から見た相手船の位置に応じた分類として定義する場合、自分船の正横の後方 22.5° より後方に相手船がいなくても、相手船が自船を追い越すと判定される場合がある。そのような場合に、自船が針路や速力を不要に維持することにならないようにする必要がある。自船が追い越し船となる場合も同様である。

(2) 行会い

行会いについては、海上衝突予防法では“二隻の動力船が真向かい又はほとんど真向かいに行き会う場合において衝突するおそれがあるとき”とされており、ここでは、見合い関係にある2船から見たお互いの相対方位の角度により定義することができる。一方で、角度のしきい値に具体的な数値は与えられていない。

(3) 横切り

横切りについては、海上衝突予防法においては“二隻の動力船が互いに進路を横切る場合において衝突するおそれがあるとき”等が該当し、追越しや行会い以外の衝突の恐れのある見合い関係が該当する。

Hasegawa ら¹⁰⁾の研究では、自船が避航船の場合の横切りの状況に関して、自船正横より後方からくる相手船の横切りを、通常の横切りと同航に近い状態の Quarter Lee の2種類に区別している。これは、Quarter Lee に分類されるような同航に近い横切りの状態では、自船の針路、特に右舷側に転じる操船が大きく制限されるためと推察される。Xu らの研究¹¹⁾では、自船からの相対針路の大きさにより右転（相手船の船尾を航過）もしくは、左転（相手船の船首を航過）を区別している。海上衝突予防法では、動力船同士の横切りの見合い関係においては、相手を右舷側に見る動力船（避航船）は、相手船の針路を避けなければいけない旨が記されているため、やむを得ない場合を除き左転による避航は積極的に推奨されないという問題がある。

以上を踏まえて、分類図として見合い関係の定義を行った。作成した見合い関係の分類図が図3.2である。図3.2の読み方としては、図中央に自船の向きを0度として、相手船の相対方位が船首方位0度から±2ポイント(1ポイント=11.25度)の範囲にある場合で、他船の針路が180度±11.25度の範囲であれば行会いと判定される。

図3.2に基づいた見合い関係の分類では、1対1シナリオの場合は全部で13パターンの組み合わせがある。同じ色で塗られた他船配置はCOLREGsの航法上、同じカテゴリに属すると見做すと、組み合わせは6パターン（衝突の恐れのない白色の他船配置を除く）となる。この分類図に基づいて、COLREGsの検証に必要なシナリオ数は最低6パターンであり、6つの見合い関係を検証すれば、COLREGsのRule13から17までを一通り網羅することができる。

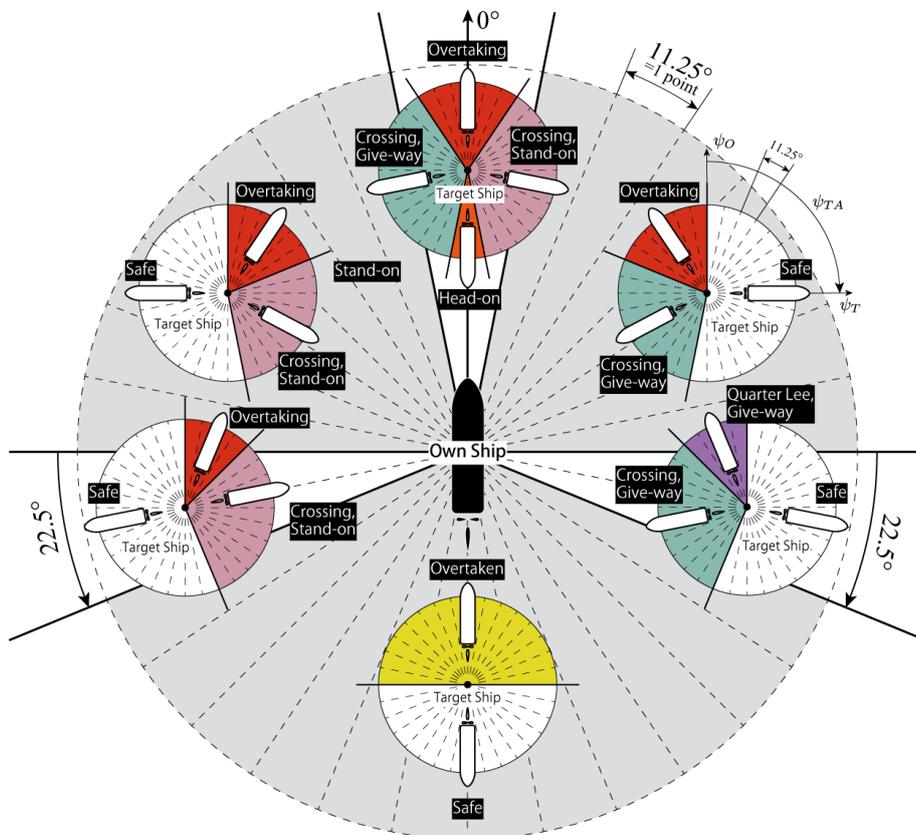


図 3.2 見合い関係の分類.

3.2.3 シナリオセット

本項では、自動避航操船アルゴリズムの評価用シナリオセットを示す。まず相手船が1隻の場合の基本的なシナリオを示した後、相手船が2隻の複雑なシナリオを提示する。相手船の数を2隻としたのは、アルゴリズムの評価を行う上で、COLREGsが基本的に2船間の航法を定めているため、他船が多数隻になるとシミュレーション結果の分析が困難になることを考慮して、相手船の数を2隻に制限した。

まず、相手船が1隻のシナリオを図3.3に示す。シナリオL,Mを除く各シナリオは、図中央に最接近点を配置するように他船を配置している。シナリオL,Mは、停止船シナリオを想定しており、停船したまま、あるいはあらかじめ設定されたタイミングで動き出し、自船の針路を妨害する。このシナリオでは、見合い関係の分類に基づいた13個のパターンが含まれ、自船(MASS)が避航船になる場合と保持船になる場合が含まれている。

前述したTCPAによるシナリオの長さの変更等を加えることで、より幅広い範囲の検証が可能になる。さらに、TCPAを固定した上で2船の速度差を設定することで、より多様な交通流の再現が可能である。1対1シナリオの総数としては、例として54パターン((基本シナリオ6パターン) × (TCPA3パターン) × (速度差3パターン))や135パターン(基本シナリオ13+2(停止船の発進含む)パターン × (TCPA3パターン) × (速度差3パターン))などで構成するものが一例として挙げられる。また、具体的なシナリオの設定例を図3.4に示す。

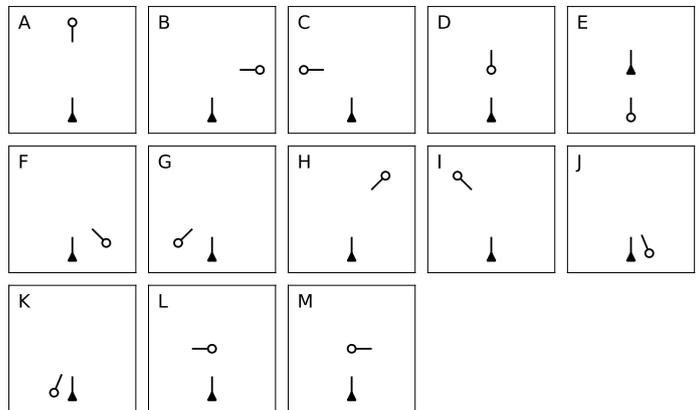


図 3.3 基本シナリオ (1 対 1) . 黒三角 (▲) は被評価船 (MASS) , 白丸 (○) は他船.

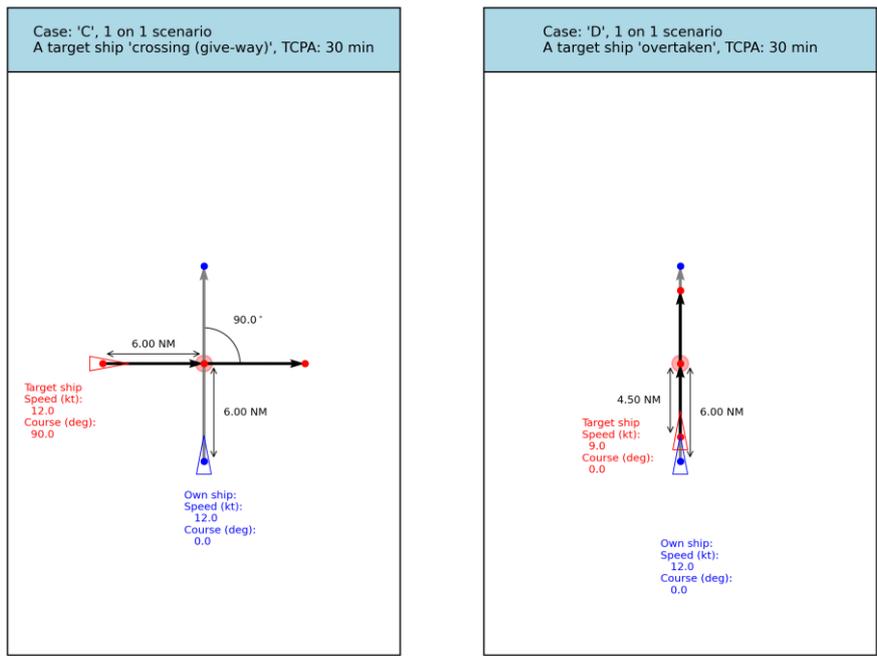


図 3.4 基本シナリオ (1 対 1) の実際の設定例 (TCPA:30分, 船速 12kt で同速の場合)



図 3.5 基本シナリオ (1 対 2) . 黒三角 (▲) は被評価船 (MASS) , 白丸 (○) は他船.

相手船が 2 隻となるシナリオセットを図 3.5 に示す. 1 対 2 の基本シナリオは, それぞれのシナリオの ID が組み合わせ元となった基本シナリオの ID を示しており, 例えばシナリオ AB は A (Head-on) と B (Crossing, Give-way) の組み合わせとなっている. 各シナリオで相手船の記号の横に番号 (#1 など) が付いているものは, CPA への到着順を表している. CPA の到着順は, 他船間で COLREGs にできるだけ従うように決めている. 例として, シナリオ AC では, 1 番目の他船が先に, 2 番目の他船の前を航行することになる. すなわち, 初期針路のまま進んだ場合, 番号が小さい順に自船に衝突するように, 少し TCPA をずらして配置される.

TCPA をずらす量については, 衝突時刻があまりに離れていると, 独立な 1 対 1 のシナリオが連続することになってしまうため, シナリオの長さ以下 (例えば TCPA が 30 分のシナリオであれば, ずらす TCPA は 30 分より短くする) に設定する. この衝突時間をずらす配置は, 相手船が変速や変針を行わない設定の場合に行う. 相手船がウェイポイントや何らかのアルゴリズムに従って変針や増減速を行う場合は, 衝突時間をずらす必要はない.

TCPA の調整により, 他船同士の衝突が避けられないシナリオ (例えば, 左右からの横切りのシナリオ BC) については, 船舶の配置自体を針路に垂直にずらすことで対応する. 特別な理由がなければ, 右側通航になるように他船を配置するのが自然である.

ここまで示した 1 対 1 および 1 対 2 の基本シナリオは, 基本的に等速かつ針路を変更しないことを前提としている. 一方で, 他船の変針についても考慮する必要がある. ここでは, 変針を含むシナリオ (変針シナリオ) を, ある時点で特定の針路を取っている他船が, 設定されたタイミングで針路を変更するシナリオとして定義する. しかし, 変針に対するシナリオの応答を評価する上では, 衝突の危険が「ない」状態から「ある」状態に変化するシナリオが基本となる.

変針シナリオの一例として, 図 3.6 に示すように, 同航船が自船の針路に向かって変針するシナリオが挙げられる. シナリオの長さは, 変針後の TCPA (最短衝突時点) を変更することで設定できる. 変針シナリオにおいて

は、他船の運動モデルを考慮する場合と、ウェイポイントを結んだ航路上で等速で動くモデルが考えられる。実際の海上では、オートパイロットがウェイポイントに向かって計算を行い、適切な運動モデルに基づいて操縦運動のシミュレーションが行われる。この場合、どのような他船の運動モデルを設定するかが問題となる。また、旋回半径や回頭による減速など、運動モデルの特性やオートパイロットのゲイン設定によって、シミュレーション中に他船の動きが設計した TCPA/DCPA からずれてしまうことがある。

一方で、ウェイポイントを結んだ航路上で他船を等速で動かす場合、運動モデルを考慮することではなく、単純な見合い関係の変化に対する自動避航アルゴリズムの評価となる。この場合、シナリオの設計は容易になるが、TCPA の設定値が小さい短期的なシナリオと、変針後の TCPA が同じ変針シナリオの差が明確でなくなるという問題が生じる。

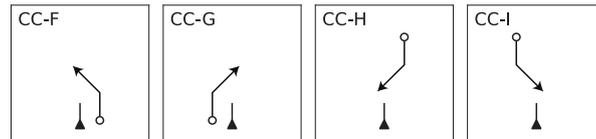


図 3.6 変針を含むシナリオの例。黒三角 (▲) は被評価船 (MASS), 白丸 (○) は他船。

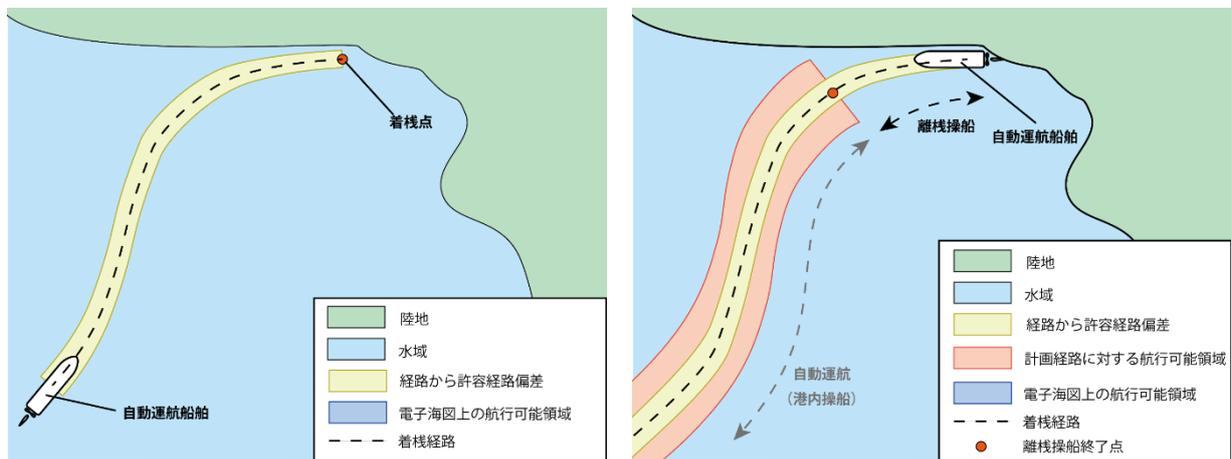


図 3.7 自動離着積制御のイメージ。左は着積操船、右は離積操船。

3.3 離着積操船の評価シナリオ

自動離着積操船タスクの評価用シナリオとして、図 3.7 に自動着積操船および自動離積操船の流れの一例を示している。自動離着積操船では、離着積操船を始める地点から着積・離積の目標地点までの経路計画と、その計画に沿った船体制御が評価対象となる。

具体的な評価用シナリオとしては図 3.8 に示すように、基本的なアプローチ操船パターンとして、4 パターン（便宜的に I, L, V, U パターンとする）と離積用に 4 パターン（便宜的に I, L, V, U パターンとする）を設定した。さらに各シナリオにおいて、自動離着積システムの ODD で定められる風況の限界となる条件に合わせて、棧橋を基準に 8 方向の一定風もしくは変動風を設定する。これらのシナリオは、システムが想定する離着積パターンに応じて選択的に、あるいはすべてのパターンを用いることができる。具体的なシナリオの設定例として、図 3.9 に着積シナリオの V パターンと離積シナリオの U パターンの例を示す。

制御結果の可否については、経路を追従する際の Cross-Track Error (CTE) および速度計画に対する各時刻の誤差が所望の範囲に収まっているかで評価される。終端条件については、図 3.10 に示す。ここでは、船体位置が一定の範囲に収まること、船速成分が各方向で一定以下であること、また船首方位角が一定以下であることの 3 点について、離着積操船終了時の状態を確認し、安全な制御が行われているかを判定する。

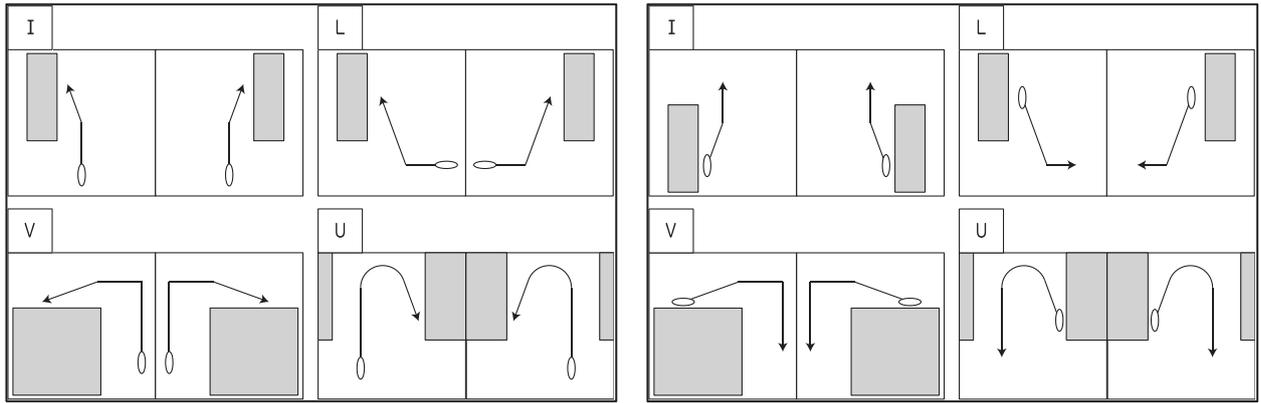


図 3.8 自動離着棧シナリオ (I, L, V, U パターン). 左が着棧操船 8 パターン, 右が離棧操船 8 パターン.

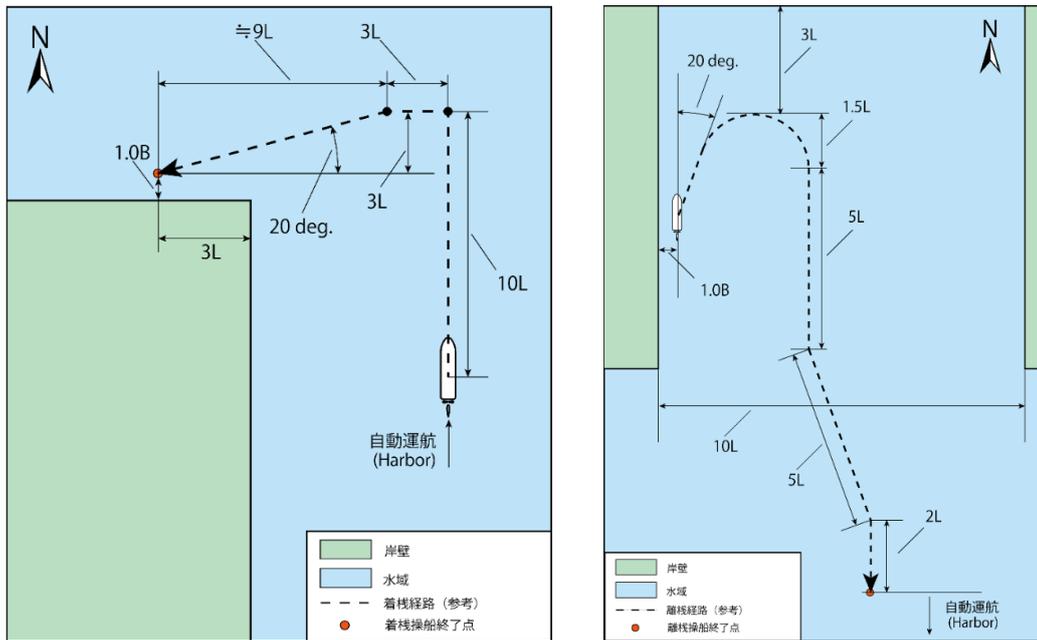


図 3.9 着棧シナリオ V パターン (左舷付) と離棧シナリオ U パターンのシナリオ設定例

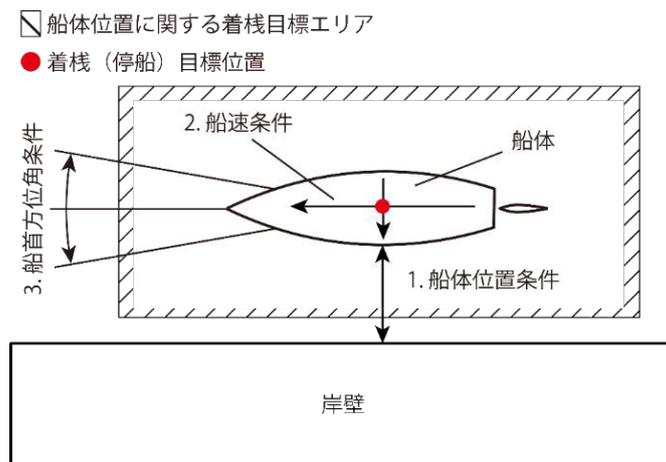


図 3.10 自動離着棧操船の終端条件

3.4 まとめ

自動避航操船アルゴリズムと自動離着棧アルゴリズムのシミュレーション評価用シナリオについて報告した。

自動避航アルゴリズムのシナリオについては、海上衝突予防法を軸として、海上で遭遇する見合い関係を網羅的に検証するためのシナリオについて説明した。提案した基本シナリオは、実海域で遭遇する見合い関係を要素的に抜き出したものであるが、今回説明しなかった実海域シナリオのような複数の見合い関係で構成されるシナリオも重要である。そのようなシナリオは AIS データから作成する方法⁵⁰⁾や、最接近を配置して意図的な航過状況を設定する手法¹²⁾¹³⁾などが研究されている。

自動離着岸については、入船出船および右舷左舷の離着岸について各4パターンのシナリオを提案した。また、自動離着岸操船の終端条件を設定し、計画した経路等に基づいた安全な離着岸操船が実施できるかを評価する手法を提案した。

提案したシナリオ群は、様々な ConOps や OE, ODD に基づくシステムであっても、ある程度共通して基本的な安全性を評価できるように努めた。一方で、より特定の状況や条件における評価用シナリオも重要である。今後も、自動運航船の実用化に向けた研究を進めていく。

4. あとがき

2016年から2022年の第1期中長期計画期間において実施した総合シミュレーションシステムの構築において整備した SHS 及び自動航行アルゴリズムの安全評価について概要を述べた。本研究では、MEGURI2040の安全評価事業の委託研究の一環として、評価用プラットフォームである総合シミュレーションシステムを構築し、またシミュレーションを用いた評価法を検討し自動避航アルゴリズム及び自動離着岸アルゴリズムの評価用シナリオを提案した。そして、2023年から始まった第2期中長期計画では整備された総合シミュレーションシステムを用いた安全評価手法の構築を進めている。この安全評価では、日本海事協会の自動運航、自律運航に関するガイドライン¹⁾に基づきシミュレーションでアルゴリズムの動作を確認することを検討している。網羅的な評価には多数の評価用シナリオを実行することが必要と考えられるため、評価用シナリオの検討に加え高速計算が可能な FTSS とリアルタイムで人の介在を含めた評価が可能な SHS とを組み合わせることで効率的、効果的に実施することを目指している。自動/無人運航船を構成する自動化システムの実用化、海難事故等の再現技術の高度化に向けた取り組み等を通じて航行の安全性の向上に寄与していく所存である。

謝 辞

本研究は、公益財団法人日本財団の助成を受けて、一般財団法人日本船舶技術研究協会が行う「MEGURI2040に係る安全性評価」事業の委託研究の一環として実施された。また、一般財団法人日本海事協会よりサポートと有益な助言をいただいた。関係各位に深く感謝申し上げます。

References

- 1) 日本海事協会: 自動運航, 自律運航に関するガイドライン(Ver.2.0), 2025.
- 2) Ubuntu Manpage: tc - show/manipulate traffic control settings,
<https://manpages.ubuntu.com/manpages/focal/man8/tc.8.html> IMO, 2024-12-27 accessed.
- 3) IMO MSC 107/5/10: Development of a Goal-Based Instrument for Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) Comments on document MSC 107/5, 2024.
- 4) IMO MSC 109/5: Development of a Goal-Based Instrument for Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) Report of the Intersessional MASS Working Group, 2024.

- 5) Sawada, R., Sato, K., Minami, M.: Framework of safety evaluation and scenarios for automatic collision avoidance algorithm, *Ocean Engineering*, Vol. 300, 117506, 2024.
- 6) Minami, M., Sato, K., Sawada, R.: Scenarios of Multiple Vessels Encounter for Safety Evaluation for Automatic Collision Avoidance Algorithm using AIS Data, *Journal of Physics: Conference Series (Proc. of 6th International Conference on Maritime Autonomous Surface Ships (ICMASS 2024))*, Vol. 2867, 012040, 2024.
- 7) Itoh, M., Takanashi, J.: Consideration on Requirements of Manoeuvring Models for Evaluating Manoeuvring Control System, *Proc. of JASNAOE*, Vol. 39, 2024, pp. 231-235.
- 8) Kitagawa, Y., Sawada R., Nakamura S., Ishida K., Taniguchi T.: Introduction of the Research Committee for Reviews on the Simple Prediction Method of Hydrodynamic Characteristics in Harbor Maneuvering, *Proc. of JASNAOE*, Vol. 37, 2023, pp. 13-16.
- 9) Kitagawa, Y., Sawada R.: Mathematical Models to Predict Ship Motion in Harbor Maneuvering and Simple Methodologies for Model Construction, *Reports of NMRI*, Vol. 22 (separated), 2022, pp.83-88
- 10) Hasegawa, K., Fukuto, J., Miyake, R., Yamazaki, M.: An Intelligent Ship Handling Simulator with Automatic Collision Avoidance Function of Target Ships, *Proceedings of International Navigation Simulator Lecturers Conference, (INSL17)*, 2012, pp.F23-1-10.
- 11) Xu, X., Lu, Y., Liu, G., Cai, P., Zhang, W.: COLREGs-abiding hybrid collision avoidance algorithm based on deep reinforcement learning for USVs, *Ocean Engineering*, 2022, Vol. 247.
- 12) Sawada, R.: On Analysis Method for the Subject Judgment of Collision Avoidance Indices, *Proc. of JASNAOE*, Vol. 38, 2024, pp.27-30.
- 13) Sawada, R.: Design of Scenario for Evaluation of Automatic Collision Avoidance Algorithm, *Proc. of JASNAOE*, Vol. 36, 2023, pp. 63-66