

# 自動操船AIの開発と実船実験による検証

橋本 博公\*, 西村 遥\*\*, 西山 尚材\*\*\*, 樋口 穰司\*\*\*\*

## 1. はじめに

世界経済の発展とともに海上輸送量は増加の一途を辿っており、過密港湾や輻輳海域における航行安全性の向上は海上輸送が抱える大きな課題である。衝突事故の多くは人的要因によるものであり、人間が操船を行う限りにおいては、海上での衝突事故を完全に防ぐことは困難である。加えて、日本は超高齢化社会に突入しており、内航海運では近い将来に船員の安定的確保が困難になるものと予想される。これら人的要因による衝突事故や船員不足の抜本的な解決は容易なものではなく、産官学が一致団結して技術革新に取り組むことが不可欠な状況である。

こうした中、国土交通省海事局においては、交通政策審議会・海事分科会・海事イノベーション部会における審議が行われ、2025年の自動運航船の実用化を目標にロードマップ案が策定された。2020年から2025年には人工知能（AI）技術等を活用した自動運航船の技術開発や実証が位置付けられている。実際に、2020年から日本財団の無人運航船プロジェクト「MEGURI2040」が開始されるなど、今後は操船における“認知”支援に留まらず、“判断”や“行動”にまで踏み込んだ自動操船システム開発の動きが加速するものと考えられる。

海上の船舶は基本的にどこを航行してもよく、速度や操縦性能が大きく異なる大小様々な船舶が混在するなど、道路等のインフラを前提とした自動運転の技術開発が進む自動車に比べると交通流は複雑である。また、航空機のような管制システムと異なり、海上の航路管制は船舶の航路や速度の指示、他船との間隔調整を行わないため、自動航行技術の実現にあたっては、将来を見越した衝突リスクの判断と適切な回避操船をいかに個船が自ら判断し達成するかが鍵となる。さらには、熾烈な競争に勝ち抜く輸送機関とするためには、他船や障害物を避けるだけでなく、効率的に目的地に到達する必要がある。この難解な問題を従来技術の延長で解決するのは容易ではないが、様々な分野で人間を上回る能力を示しつ

つあるAIは大いなる可能性を秘めている。

本研究では、自動運航船の実現に不可欠な自動航行技術の実現を目指して、AIによる自動操船をコア技術とする内航船の操船支援システムを開発し、実船を用いて輻輳海域での検証実験を行うことで、AIによる自動操船の可能性を明らかにすることを目的としている。本目的の達成のため、以下のような個別課題・実施項目を設定した。次章以降では、各項目について詳述する。

- (1) 自動操船AIの開発
- (2) 実船実験用の自動操船システム開発
- (3) 自動操船システムのリスク評価
- (4) シミュレータによる自動操船AIの評価
- (5) 実船実験による自動操船AIの検証

## 2. 自動操船AIの開発

輻輳海域での衝突危険判断や回避行動選択のプロセスを明瞭かつ普遍的に記述することは容易ではない。特に、衝突が迫る状況下での操船の正誤を学習するための教師データはほとんど存在しないため、船舶の避航問題に関しては、機械自身に評価やチューニングを行わせる機械学習が有力な手段となる。特に衝突回避という目標が明確に与えられる行動選択問題では、投機的な探索と評価を繰り返して知能を強化する強化学習が適している。強化学習では、将来にわたる累積報酬の期待値を最大化する行動方を学習するが、実際に行動した結果をもとに行動価値を学習するQ学習もそのひとつである。Q学習自体は新しいものではないが、行動価値関数Qを深層学習（deep learning）により近似させることで、状態に対して複雑に変化する行動価値を高精度に推測することが可能となり、最大の累積報酬が期待できる最適行動の選択を実現している。このように強化学習と深層学習を組み合わせた学習は深層強化学習と呼ばれ、DeepMindが深層Q学習<sup>1)</sup>（deep Q-learningあるいはdeep Q-networkと呼ぶ）をAtari

\* 大阪府立大学

\*\* 株式会社日本海洋科学

\*\*\* 株式会社MTI

\*\*\*\* 日本無線株式会社

ゲームに適用した結果、人間の得点を大きく上回る操作が可能となったことで一躍注目を集めた。本研究で開発した自動操船AIは、この深層Q学習を応用した自動避航に関する研究成果<sup>2)</sup>を発展させたものである。

衝突危険の判定には、自船周りの排他領域を表すバンパー領域<sup>3)</sup>を用いる。バンパー領域のサイズは、海域の輻輳度に応じて異なる値が提案されているが、本研究では外洋と輻輳海域を組み合わせた2重バンパーとした。バンパー内への相手船の侵入に対して負の報酬を設定することで、衝突を回避するための最適な行動を学習することができる。ニューラルネットワーク (NN) の入力は、自船、バンパー領域、周辺他船の情報等をグレースケール化して与えている。学習はシミュレーションベースで行うため、操舵に対する操縦運動モデルが必要となる。ここでは、海上公試のZig-Zag試験結果さえあれば学習が可能となるように、1次遅れ系のKTモデルを使用した。離着岸操船などに深層強化学習を応用する場合は、拘束模型試験による低速域の操縦運動モデルの構築が必要と思われるが、避航問題ではそこまでの精緻なモデルは必要とならない。

深層Q学習では、ある状態が与えられた際に、選択可能な行動を起こした場合の将来にわたる累積報酬を推定するNNを、膨大な回数の避航シミュレーションを通じて構築していく。本研究における行動選択枝は、実船実験を念頭に置き、人間がAIの判断を評価できるように、直進、左旋回、右旋回の3種類とした。本学習の結果として獲得できる、相手船をバンパー内に入れない、あるいは相手船をバンパー外に追い出すためのAIと一般的なオートパイロットを組み合わせることにより、人間の関与無しに目的地への航行と衝突判断・危険回避を行う自動操船システムを実現している。実際の衝突危険度は、相手船との相対的な関係で動的に変化するものであるが、AIによる自動操船の前例がない現状では、静的な要素のみにもとづく危険評価を採用し、AI操船の良否について人間が船上でリアルタイムに評価できることを最優先とした。さらに、実船実験の実施にあたり、AIには相手船に脅威を与えない前広な避航を行うことが要求されることから、バンパーサイズを決定するための全長には、検証実験に使用する神戸大学大学院海事科学研究科附属練習船「深江丸」の値ではなく、自動船舶識別装置 (AIS) の1年分のデータ解析を通じて得た、大阪湾で遭遇しうる最大の船の値を採用している。

### 3. 実船実験用の自動操船システム開発

海上での自動操船実験には、神戸大学の練習船「深江丸」を用いる。本船は、船内LANに、GPS、Gyro Compass, GPS Compass, AIS, Radarなどのデータがブロードキャストされているほか、外部信号によるオートパイロットシステム<sup>4)</sup>が既設されている。自動操船システムの構築にあたり、センサー情報の取り込みやデコード、データベース化、時間差分による情報生成、送受信の監視などを行うサブPCと、データベースから本船に近い順に任意の隻数の他船・障害物データを入力として最適な行動を出力するAIプログラムを搭載したメインPCを設置した。本システム構成の概略図を図1に示す。他船や障害物の検知には、AISとレーダーTTの情報を用いているが、複数のセンサーから得られる船位や速度ベクトルなどの情報に関して照合や一致判定を要しないシステムとなっている。各PCと既設オートパイロット間で船内LANを通じたUDP通信を行い、AIが指示する最適針路に向かってオートパイロットで航行する自動操船システムを構築した。

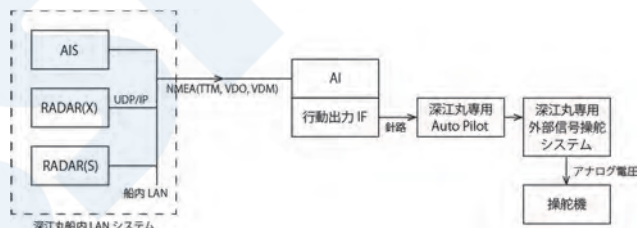


図1 自動操船システムの構成図

自動操船モードへの切り替えやウェイポイントの設定などは、図2のユーザーインターフェースを用いて行う。画面上には、自船、他船・障害物、バンパー領域、目標針路などが表示される。レーダーに近い操作性と最小のマウス操作で入力ができるように、海技者の協力のもとで仕様やレイアウトを決定した。NNは非線形の統計フィルターであり、入力と出力の関係を人間に明示することが難しいため、各タイムステップにおけるAIの針路指示が、通常の航行モードであるか避航モードであるかを識別可能としている。さらに、画面上に二重バンパーを常に表示しておくことで、相手船・障害物のバンパー内への侵入有無や侵入時間をもって、AI操船の良否を船上で容易に判断することができる。

実船実験において、通常操船からAI操船への切り替えは、船長の判断により、ハンドコントロールからリモートコントロールへロータリースイッチで切り替える。その後、メインPCのインターフェー

スから送信ボタンを押下することで、AIによる自動操船が開始される。なお、船長が危険と判断した場合には、同ロータリースイッチを切り替えるだけで、瞬時にハンドコントロールに戻すことが可能である。

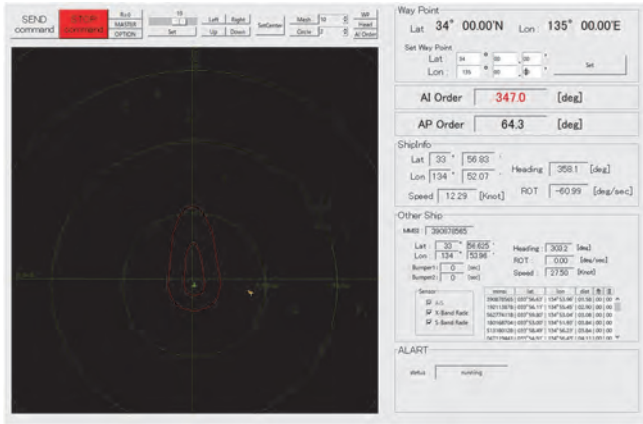


図2 自動操船システムのユーザーインターフェース

## 4. 自動操船システムのリスク評価

### 4.1 FMEAの概要

本研究ではリスク評価の手段としてFMEA (Failure Mode and Effects Analysis) を採用した。本解析は、AIによる自動操船システムの実証機を対象としたFMEAであり、想定し得る故障モードにおいてシステムに要求している機能が達成できるのか、動作不全となるのか、動作不全となった場合に代替手段が講じられているかを明確にし、予めシステムの構成および設計に不備が組み込まれていないかを論理的に検証する事が目的となる。

「深江丸」の船内システムの構成図を図3に示す。AI-PC2 (サブPC) が収集した本船情報および周辺情報をAI-PC1 (メインPC) に伝送し、それら情報からAI-PC1が最適方位を出力する。PC for AutopilotはAI-PC1からの方位指示に従って本船の舵を制御する。FMEAで対象とするシステムは、AIによる自動操船の実証機のみ限定し、通常の運用で使用する機能に関しては適用対象外とした。したがって、新たに追加した設備とこれに接続する設備が対象となる。

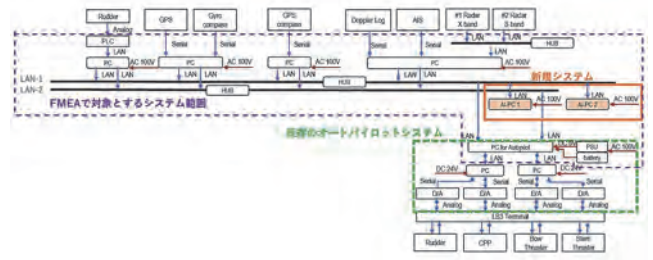


図3 船内システムの構成図

FMEAで対象とするシステムのモードはAI制御ON時のみとし、OFF時はすべての新設機器はOFFとして通常運用と同等とみなし、以下の通りとする。

- AI制御ON (機器故障)  
ON時におけるシステムの不具合が通常の運航に波及しないことを併せて検証する。
- AI制御ON (信号喪失)  
ON時におけるシステムの不具合が通常の運航に波及しないことを併せて検証する。

機器故障、信号喪失のFMEAは一つのシートで表現するものとする。FMEAは日本海事協会が発行する「FMEAの実施に関するガイドライン」を参考に実施した。

### 4.2 実機システムを用いたFMEA試験

実船実験では、AI操船の要となるAI-PC1とAI-PC2またはその周辺装置に異常が発生した場合に、その異常をシステムの操作者が検知し、異常を認知した操作者がパイロットスタンドに用意されたスイッチを切り替えることで、安全に航行を継続させる事を想定する。本システムが本船上で設計通りに操作者へ異常を伝達できるかを確認するため、FMEAの結果を基に動作試験を実施した。

FMEAでは、電源異常、機器故障、通信異常、配線異常、センサー異常とそれぞれの Failure Modeを設定しているものの、周辺装置の各種異常がAI-PC1およびAI-PC2に及ぼす影響としては、該当する装置からの信号が途絶する通信異常に至るものとして捉えることができる。そのため、本試験においては主要な通信経路となるAI-PC1, AI-PC2, LAN1 HUBおよびLAN2 HUBそのものの電源異常とシステムの核となる両AI-PCに対する通信異常を試験の対象とした。

試験結果より、機器に異常が発生した場合にシステムの操作者に対して通知するなどして、異常をシステム操作者が認識できる設計となっていることを確認した。なお、本結果に至るまでに複数回のFMEA試験を実施しており、試験を通して設計上の不備に対する有効な対策を施し、安全な試験航海に寄与できたことも、FMEAを実施した一つの成



果であると考える。

## 5. シミュレータによる自動操船AIの評価

AIによる自動操船システムを実船へ搭載するにあたり、シミュレータを活用した検証と評価が不可欠となる。本研究では、シミュレータを活用した、操船評価ツールによる定量的評価と海技者による定性的評価の二つのアプローチにより、安全性の事前検証を行った。

### 5.1 操船評価ツールを用いた定量的評価

#### 5.1.1 操船評価ツール

操船者が他の船舶との衝突の危険性を認識する主要な要素として、自船と他船との間の相対距離、方位の変化率、船首航過か、船尾航過か等を挙げることができる。㈱日本海洋科学は避航操船結果を評価するための指標として、他船との相対距離と相対方位変化率を用いて「危険領域：Danger」「注意領域：Caution」「安全領域：Safety」を定義する評価領域図を提案している<sup>5)</sup>。評価領域図は、他船との見合い関係ならびに他船との相対距離と相対方位変化率との関係から複数のグラフに分類され、それぞれに「Caution」「Danger」の領域が設定される。自動操船システムによる操船では、海上衝突予防法で定める「保持船」に可能な限りならないことが望ましいという観点から、横切り関係では右からの横切り船と左からの横切り船を区別した新たな評価領域図<sup>6)</sup>による評価を実施した。

操船結果の評価では、船舶が「Danger」に入ったときの重み係数を「-2」, 「Caution」を「-1」, 「Safety」を「0」とし、減点方式で評価する方法についても併せて提案している。領域図作成のための評価式と領域の定義を表1に示す。

表1 領域図作成のための評価式と領域の定義

Encounter situation		Evaluation formula		Evaluation	
Head-on/ Crossing from Starboard	Bow	$\theta < \infty$	$R < 185.2 [m]$	Danger	
		$\theta \leq 4.5 \times 10^5 \cdot R^{-1.7}$	$R < 1852.0 [m]$		
	Crossing	$\theta < \infty$	$R < 463.0 [m]$	Caution	
		$\theta \leq 15.0 \times 10^5 \cdot R^{-1.7}$	$R < 3,426.2 [m]$		
	Range excluding danger area and caution area				Safety
	Stern Crossing	-			Danger
$\theta \leq -5.2 \times 10^5 \cdot 170^{-1.7}$		$R < 185.2 [m]$	Caution		
$\theta \leq 15.0 \times 10^5 \cdot R^{-1.7}$		$R < 3,333.6 [m]$			
Range excluding caution area				Safety	
Same-way	$\theta < \infty$		$R < 277.8 [m]$	Danger	
	$\theta < \infty$		$R < 463.0 [m]$	Caution	
	$\theta \leq 15.0 \times 10^5 \cdot R^{-1.7}$		$R < 926.0 [m]$	Safety	
	Range excluding caution area				
Crossing from Port	Bow	$\theta < \infty$	$R < 185.2 [m]$	Danger	
		$\theta \leq 4.5 \times 10^5 \cdot R^{-1.7}$	$R < 1852.0 [m]$		
	Crossing	$\theta < \infty$	$R < 463.0 [m]$	Caution	
		$\theta \leq 15.0 \times 10^5 \cdot R^{-1.7}$	$R < 14,816.0 [m]$		
	Range excluding danger area and caution area				Safety
	Stern Crossing	$\theta \leq -5.2 \times 10^5 \cdot 170^{-1.7}$	$R < 185.2 [m]$	Caution	
$\theta \leq -5.2 \times 10^5 \cdot R^{-1.7}$		$R < 9,260.0 [m]$			
Range excluding danger area and caution area				Safety	
$\theta$ : Rate of change in bearing (deg./min.)		$R$ : Relative distance (m)			
Danger (危険領域)		: Unacceptable area			
Caution (注意領域)		: The area where own ship commences to avoid or expect another ship to avoid			
Safety (安全領域)		: Acceptable area			

当該領域図は、外航船の船長および水先人を被験者とした操船実験によって、約30,000点のデータに基づき定式化されたものである<sup>5)</sup>。加えて、内航タンカーによる実船での自動避航実証実験の結果などにより、全長50m以上の船舶における輻輳海域を想定した評価領域図として、妥当性が示されていることから、今回のAIによる自動操船結果の評価を客観的に行う手法として採用した。

#### 5.1.2 操船評価結果

前節の操船評価ツールを利用して、典型的な1対1の見合いシナリオや相手船が複数隻のシナリオ、実海域の交通流を模擬した計39のシナリオについて、自動操船の採点を行った。試験シナリオおよび評価結果の一例を図4、5および表2に示す。図5上段の左上のグラフは前方を横切る船（右からの横切り船）に対する領域図、左下は後方を横切る船に対する領域図、右上は同航船に対する領域図を描いており、図4の見合い関係における操船結果を他船との相対距離と相対方位変化率との関係から、10秒毎に赤点でプロットした結果を示している。図5の下段は左からの横切り船を対象とした評価領域図であるが、今回のシナリオでは該当する船舶は存在しない。また、表2は、図4の試験シナリオに対する、評価ツールの採点結果を示している。すなわち、自船の前方を横切る右からの横切り船に対して自船はCaution・Dangerに侵入することなく航過したこ

とが、領域図ならびにスコアの両方から読み取れる。

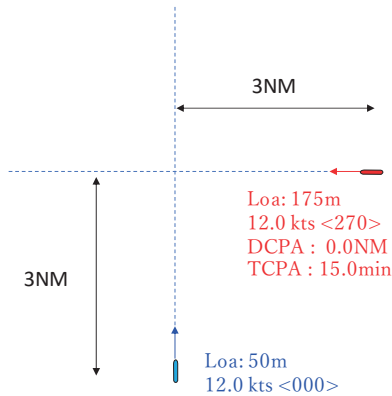


図4 試験シナリオの例 (1対1横切り船)

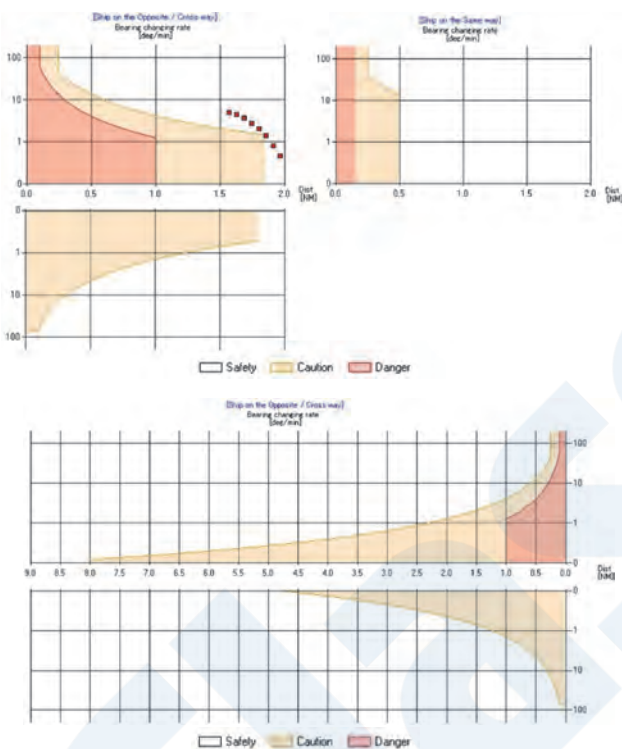


図5 評価領域図の例

表2 操船評価結果の例

	Safety	Caution	Danger	Total
Sum Counts	917	0	0	917 (a)
Weight Factor	0	-1	-2	-
Sum Score	0	0	0	0 (b)
Total Score	-	-	-	b/a x 100=0

このように、全てのシナリオについて採点を行った結果、減速を認めていない条件下でありながら、「Danger」に侵入することはほとんどなく、「Caution」への侵入頻度も次節に記す通り海技者からみて許容範囲に収まることが確認できた。これらのシナリオは、速度変更なしには避航が難しいと

されているケースであり、現在は考慮していない速度変更を強化学習の行動選択枝に含めることやバンパー領域を工夫することで、更なる操船行動の改善が期待される。

## 5.2 海技者による定性的評価

大型船の操船に関し豊富な経験を有する海技者計5名（船長4名・一等航海士1名）を評価者として、シミュレータ上で自動操船を観察した後、各人にフィードバックを求める形で操船評価を実施した。各シナリオにおいて、自船を視点とした見合い状況の確認に加えて、任意の他船（大型船）を使用した見合い状況の確認も実施し、「人間が操船する他船から見て不安を与えない」という点において、自船の動きに違和感がないことを確認した。

さらに、「深江丸」での実船実験に際し、最終的な操船判断の権限を有するのは本船の船長であることから、「深江丸」の乗組員の協力を得て、操船シミュレータ上で「深江丸」の運動モデルを用いた自動操船を再現し、乗組員を評価者として避航開始のタイミング、避航の方法と避航角度、原針路復帰のタイミングなどの観点から、評価を実施した。

これらの評価者による検証を行った結果、総じて、自動操船の動きに違和感がないという回答が得られるも、輻輳海域における実船実験であることを十分に考慮し、表3に示す通り課題を抽出し、それぞれについて実船実験に必要とされる対応策を講じた。実船実験においては、これら全ての課題が解決されたことを確認した上で実施した。

表3 実船実験に向けた自動操船の課題と対応策

課題	解決策
右からの横切り船に対し航法に反して左転する恐れがある	学習環境を工夫し、航法適用されるアクションとなるよう調整した
船首のふらつき（一度舵を右にきった後、左にきりなおす行為）が見られる	報酬の与え方やオートパイロットとの接続方法を見直し、ふらつきを低減させた
AIによる操船意図が不明瞭である	操船者がAIの操船行動を予想できるよう、バンパーと周辺他船を表示するインターフェースを準備した
周囲の輻輳状況や気象海象など、環境によっては実験が困難である	試験法案にて環境条件を明確に定めた

一部の操船局面においては、舵による避航ではなく、機関による減速の必要に迫られる場合があるとのフィードバックも挙がったが、今回の実船実験に

において当該減速オプションは装備せず、減速が必要な局面に遭遇した場合には、人間がフォールバックすることにより安全性を担保することとした。

## 6. 実船実験による自動操船AIの検証

2020年12月8日から10日の3日間、輻輳海域である大阪湾にて自動操船システムの実証実験を行った。実験を実施した海域は神戸港以南～洲本沖灯浮標以北である。AI操船の検証実験を実施するうえでの安全基準は以下のように定めた。

- ・ 「風力10m/s以下」、「波高2m以下」、「視程2マイル以上」である場合
- ・ 本船の航海計器並びに機関、AI操船機能に異常がない場合
- ・ 船長又は航海当直責任者が、輻輳状況などが試験に適した状況と判断する場合

実船実験の実施体制を図6に示す。実験中は、安全確保のため、本船の通常当直状態を維持し、試験統括責任者ならびに当該AI操船機能を担当するエンジニアは絶えずシステムの監視を行い、不測の事態に備えた。

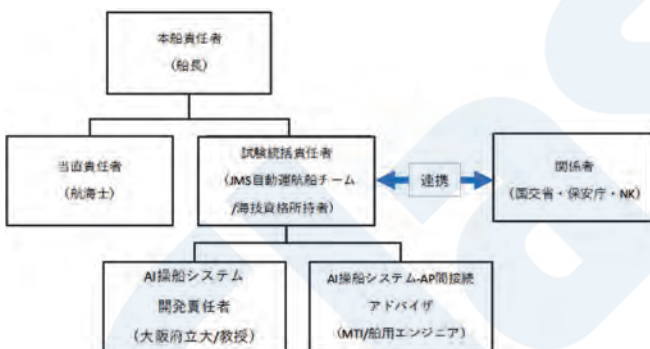


図6 実船実験の実施体制

実船実験では、3日間で21通りを超える見合い関係に対してAIによる自動操船を行った。実験時には衝突危険が生じるような見合い関係を意図的に作り出すようにマニュアル操船を行い、ウェイポイントの緯度経度を自動操船システムに入力した後、AIによる自動操船モードへの切り替えを行い、目的地方向へ針路を戻すまでを確認した。本実験に使用した練習船「深江丸」の写真を図7に、自動操船時の様子を図8に、実験時の船橋内の様子を図9に示す。



図7 検証実験に用いた練習船「深江丸」



図8 大阪湾でのAIによる避航操船の様子



図9 実船実験時の船橋内の様子

自動操船の検証に際しては、設定されたウェイポイントに向かってオートパイロットで航行し、衝突の危険が生じた場合に、AIの方位指示によって衝突が適切に回避できるかを確認した。実験結果の一例を図10-11に示す。図10のように、相手船がバンパー外にいる状況から自動操船を開始した場合は、外側の外洋バンパー内に相手船を侵入させないように避航操船を行った。また、反航船との衝突リスクが回避された後に、原針路に復帰する結果が得られた。図11のように、相手船がバンパー内に存在する状況から自動操船を開始した場合は、内側の輻輳バンパー内に相手船を侵入させないように避航操船を行うことが確認された。輻輳度合いに応じて適切な避航操船が得られたのは、衝突危険度に応じて異なる負の報酬を与えた2重バンパーの採用によるものと考えられる。



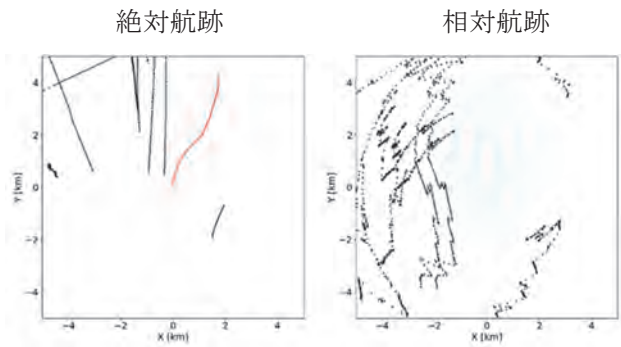


図10 AIによる自動操船結果  
(バンパー内に相手船が存在しない状況から開始)

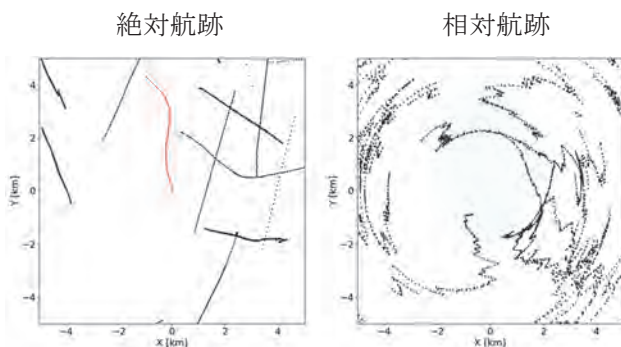


図11 AIによる自動操船結果  
(バンパー内に相手船が存在する状況から開始)

一般商船に加えて操業漁船や浮標が存在する非常に輻輳した海域での実験であったが、AIによる針路指示により、適切なタイミングで相手船との衝突を回避し、周辺状況が許せば元の針路に復帰することが確認できた。実船実験では、各種センサー情報がAIに引き渡されるまでのタイムラグや、AIによる針路指示に対して実際に舵が動作するまでのタイムラグが存在し、自然外乱やオートパイロットの小刻みな操舵による不規則な方位の揺れが存在するなど、シミュレーションのように理想的な環境ではなかったものの、総じて、陸上で実施した操船シミュレータによる事前検証と類似の操船結果が得られたことは大きな収穫といえる。

## 7. おわりに

深層強化学習にもとづく自動避航AIとオートパイロットを組み合わせた自動操船システムを開発し、操船シミュレータによる検証を経て、大阪湾において実船試験を実施し、AIの針路指示による輻輳海域での自動航行試験に初めて成功した。実船実験においても、事前の操船シミュレータ実験と類似の操船結果が得られたことから、今後のAI改良と評価はシミュレーション/シミュレータを中心に進める

ことができる。一方、本格的な実用化に向けては、AIによる操船指示の見える化を強化し、乗組員がAIの意図を理解し、追認することができるようなマンマシンインターフェースの開発が望まれる。今回は衝突危険度が見合い状況に寄らない固定のバンパーモデルを用いたが、AIによる自動操船実験が成功裏に終わったことで、これからは衝突リスクが動的に変化するような海技士の判断に近い出力を返すAIの検証・導入が進むものと期待される。

実船実験を通じて得られた知見と経験を活かして、自動航行技術の早期実用化を実現し、人的要因による海難事故の防止や船員の労働環境改善を図ることで、内航船の省力化・安全化に貢献していきたい。今回の実船実験の成功が、今後の自動運航船の研究開発の一助となれば幸いである。

## 謝辞

AIによる自動操船システムは、国土交通省交通運輸技術開発推進制度の採択課題「人工知能をコア技術とする内航船の操船支援システム開発」(平成30年～令和2年度)の一環として開発・検証したものである。AI開発と実船実験システム構築の一部は、JSPS科研費(20H00284)の助成を受けた。「深江丸」の船内システムに関しては神戸大学の若林伸和教授から多くの助言を授かった。最後に、本研究にご協力頂いた全ての関係者に厚く御礼申し上げる。

## 参考文献

- 1) Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Graves, A., Antonoglou, I., Wierstra, D., Riedmiller, M., Playing Atari with Deep Reinforcement Learning. Tech. report. Deep Technol. arXiv1312.5602 [cs.LG], 2013.
- 2) Shen, H., Hashimoto, H., Matsuda, A., Taniguchi, Y., Terada, D., Guo, C., Automatic collision avoidance of multiple ships based on deep Q-learning, Applied Ocean Research, Vol.86, pp.268-288, 2019.
- 3) 井上欣三, 操船の理論と実際, 成山堂書店, 2011.
- 4) Watanabe, T., Wakabayashi, N., Urakami, M., Terada, D., Development of Track Control System utilizing Heading Control System for Ocean Observation Sailing, Proceeding of the 27th International Ocean and Polar

Engineering Conference, pp.530-531, 2017,  
San Francisco

- 5) 原潔, 長澤明, 中村紳也, 海上交通状況に関する操船者の主観的危険度評価, 日本航海学会論文集, 83, pp.71-80, 1990.
- 6) Nakamura, S., Okada, N., Development of Automatic Collision Avoidance System and Quantitative Evaluation of the Manoeuvring Results, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 13(1), pp.133-141, 2019.

ClassNK