

交通運輸技術開発推進制度
研究成果報告書
(ダイジェスト版)

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

令和3年3月

国立大学法人 神戸大学

株式会社 M T I

株式会社 日本海洋科学

研究成果報告要約

作成年月	令和 3 年 3 月
研究テーマ名	AI, ビックデータ等を活用した交通運輸分野における新たなサービスの創出 や生産性向上に資する技術開発
研究課題名	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
研究代表者名	神戸大学 橋本 博公
研究期間	令和 2 年 4 月 10 日～令和 3 年 3 月 31 日
研究の目的	自動衝突回避を目的とした人工知能 (AI) の開発技術を応用し, 航行中の安全性と経済性を両立する自動操船 AI を開発する。AI と操船シミュレータの相互通信を可能とし, AI 操船の定量的評価や熟練操船者との比較検証を実施する。さらに, AI による自動操船機能を備えた次世代の操船支援システムの基礎を開発し, 実船を用いた実海域での実証試験を行うことで, その有効性を確認する。
研究成果の要旨	深層 Q 学習に, 2 重バンパーによる衝突危険評価を採用することで, 輻輳海域にも対応可能な自動避航 AI を開発した。これをオートパイロットと組み合わせることにより, 実船実験に用いるための自動操船システムを開発した。 開発した自動操船システムの評価のため, 簡易型及びフルミッション型の操船シミュレータを用いたシミュレータ実験を行った。後者の実験では, 船長経験者に加えて実船実験に用いる深江丸の乗組員からもフィードバックを得た。 これと並行して, FMEA の手法を用いたリスクアセスメントを実施した。想定される故障モードを洗い出し, フォールバックを行う操船者への警報レベルを含めた通知方法及びその際の代替手段に関して検討を行った。 開発した自動操船システムについて, 輻輳海域として知られる大阪湾にて深江丸による自動操船の実証実験を行った。多数の船舶が行き交う海域においても, 周囲の状況に応じて自動的に避航を行い, 衝突危険が無くなった後は原針路へ復帰することが確認できた。 AI による輻輳海域での自動操船に成功したことにより, 今後の自動運航船の開発加速に期待が持てる。
知的財産権 取得状況	特許出願 0 件 特許出願 (予定) 0 件 著作権登録 0 件
研究成果発表実績	論文発表 : 国内 1 件, 海外 0 件 口頭発表 : 国内 2 件, 海外 0 件 その他 : 1 件

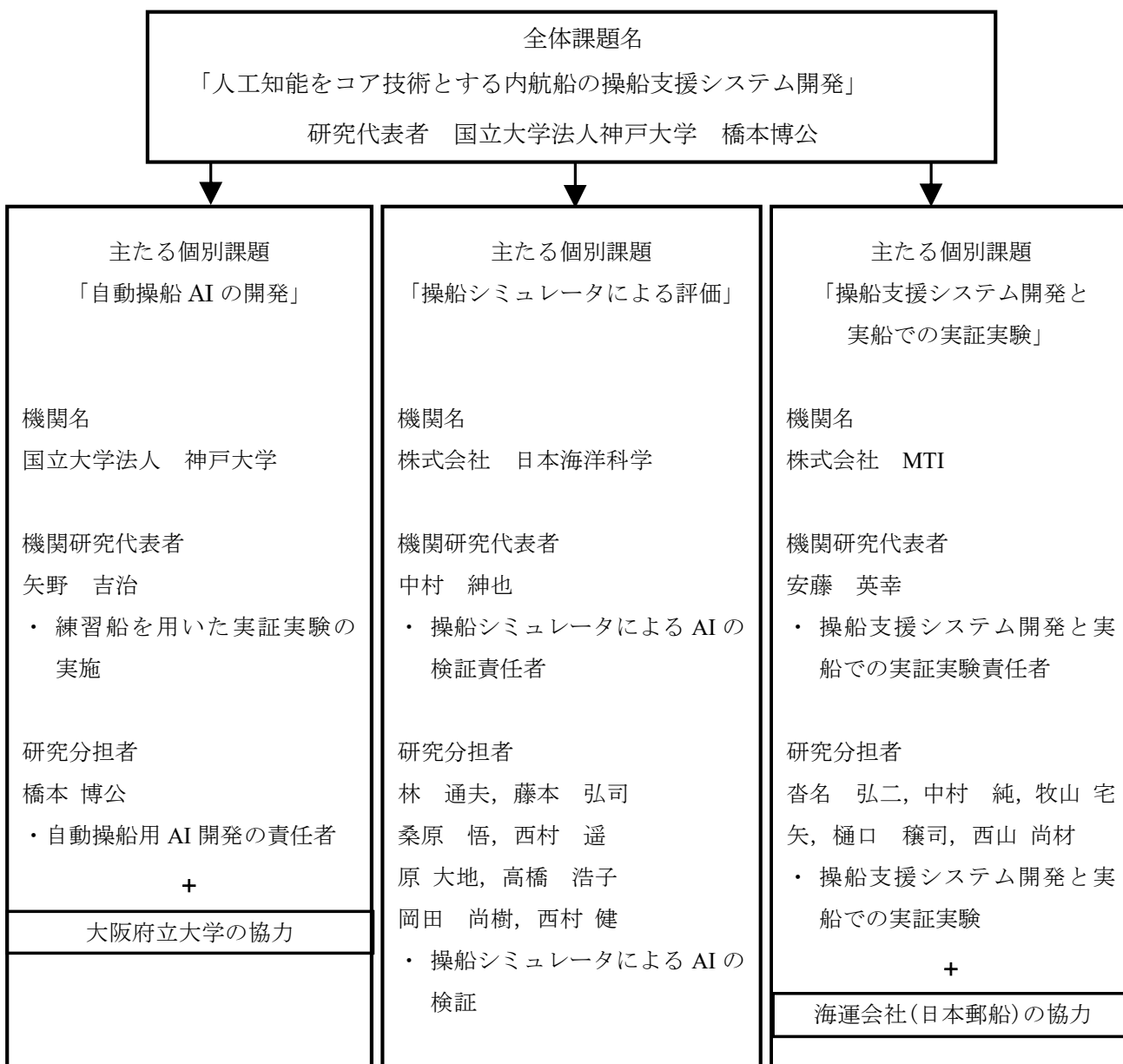
研究開発の目的及び実施体制

研究開発の目的

自動衝突回避を目的とした人工知能（AI）の開発技術を応用し、航行中の安全性と経済性を両立する自動操船 AI を開発する。この AI を操船シミュレータと組み合わせることで、操船能力の定量的評価や熟練操船者との比較検証を実施する。さらに、AI による自動操船機能を備えた次世代の操船支援システムの基礎を開発し、実船を用いた実海域での実証試験を行うことで、その有効性を確認する。

研究実施体制

本研究は、国立大学法人神戸大学を研究代表機関とし、株式会社 MTI、株式会社日本海洋科学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。



研究開発の成果

1 序論

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、世界の主要航路や都市港湾の過密化が深刻化している。多数の船舶が行き交う輻輳海域での航行安全性向上は海上輸送が抱える喫緊の課題であるが、世界的に見ても安全化技術や船員教育の高度化が海上輸送量の増大に追い付いていないのが現状である。また、衝突事故の多くはヒューマンエラーに起因するものであり、最新の航海計器を備えたイージス艦においても衝突事故が連続している実態を踏まえると、人間が操船を行う限りにおいて、航海計器による操船者の“認知”プロセスの支援だけでは不十分であり、避航操船など“判断”や“行動”のプロセスに踏み込んだ装置の開発無くしては、海上での船舶衝突事故を完全に防ぐことは困難であると言える。食糧、エネルギー資源、工業原料の大半を輸入に頼る我が国にとって、海上輸送分野で世界のイニシアティブをとり続けることは重大な国家戦略であり、今後も我が国が世界有数の経済大国としての地位を維持するためには、船舶の安全化・省力化を実現する自動運航技術の開発が欠かせない。

このような社会情勢の中、国内に目を向けると、日本は超高齢化社会に突入しつつあり、内航海運では船員不足の問題が顕在化するなど、今後は船員の数と質を維持することが困難になるものと予想される。環境負荷低減のためのモーダルシフト推進や物流の多様化・安定化などの観点から、我が国において内航船による海上物流を堅持する必要性については疑いようがなく、内航海運の維持・活性化は交通運輸分野が抱える最重要課題のひとつである。しかしながら、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内航船の技術革新に取り組むことが望まれている。

こうした中、国土交通省・海事局においては、2016年度より5年間の計画でIoT・ビッグデータなどの先進的な技術を活用した船舶・船用機器等の研究開発について、i-Shipping(Operation)として技術開発支援事業を行い、数多くの研究開発プロジェクトが採択され計画が進められている。操船に関するものとしては、日本郵船グループ、古野電気株式会社他の航海計器メーカーによる「衝突リスク判断と自律操船」があるが、周囲の船舶のうち衝突リスクの高い船舶の航海計器上での提示や遠隔操船に関する技術までが開発の対象であり、避航操船など操船の“判断”や“行動”の装置開発は対象とされておらず、操船に関する人工知能（AI）の活用についても対象とされていない。

一方、2017年度に、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。

ところで、海上の船舶は基本的にどこを航行してもよく、速度や操縦性能が全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て自動運転の技術開発が進む自動車に比べると交通流は極めて複雑である。さらに、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、船舶の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、熾烈な国際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、目的地まで効率的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、様々な分野で既に人間を上回る能力を示しつつある AI は、航行船舶の自動操船を実現するための手段として大いなる可能性を秘めている。

以上のように、我が国の海上輸送が抱える喫緊の課題である、輻輳・制限海域での航行安全の向上やヒューマンエラーによる衝突・座礁事故の防止、内航海運における船員の安定的確保について、この抜本的な解決を図るための革新的技術として AI への関心が高まっており、研究代表者らがこれまでに実施してきた輻輳した制限海域における避航操船を行う AI 開発や模型船による実証実験の技術を応用・発展させることで、実航海に耐える自動操船用 AI の開発に期待が寄せられている。

2 研究項目と目標

本研究では、人工知能 (AI) をコア技術とした、輻輳海域を航行する内航船の操船支援を行うシステムを開発し、人的要因に起因する海難事故の防止や船員の労働環境の改善を図ることで、内航船の省力化・安全化に貢献する。具体的には、図 2-1 に示すように、自動衝突回避を目的とした AI の開発技術を応用し、航行中の安全性と経済性を両立する自動操船用の AI を開発し、この AI を操船シミュレータへと組み込むことで、操船能力の定量的評価や熟練操船者との比較検証を実施する。さらに、AI による自動操船機能を備えた次世代の操船支援システムの基礎を開発し、実船を用いた実海域での実証試験を行うことで、その有効性を確認することを目指すものである。

この目的を達成するために設定した個別課題、並びに令和 2 年度の研究項目及び研究目標は以下のとおりである。

(1) 自動操船 AI の開発

研究項目 実船実験に搭載する AI の開発

研究目標 衝突回避と目的地への到達という時に相反する目的を高度に達成するための手法を確立

し、実船実験に耐える人工知能の開発を図る。実船実験に向けて、相手船に脅威を与えない操船を行うための方策を検討する。

(2) 操船シミュレータによる評価

研究項目 実船実験と同海域でのシミュレータ実験

研究目標 フルミッション型の操船シミュレータを用いて、深江丸を対象としたAI操船実験を行う。大型船の船長経験者に加えて、実際に実船実験を行う深江丸の乗組員へのデモ操船を行い、AIの操船能力についての評価とフィードバックを行う。

(3) 操船支援システム開発と実船での実証実験

研究項目 実船による実海域での実証実験

研究目標 神戸大学大学院海事科学研究科附属練習船「深江丸」を用いた自動操船実験に向けて、ハード及びソフトの構築とリスクアセスメントを行う。関係各所との調整および海上での予備試験を経たうえで、実海域での実証実験を実施する。



図 2-1 研究概要

3 自動操船 AI の開発

本研究で用いた自動操船用 AI 開発の基礎技術について述べる。AI の定義や研究分野は幅広いが、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く、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策を学習するが、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 (deep Q-learning あるいは deep Q-network と呼ぶ) を Atari 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[1]。

本研究では、目的地への到達と自動衝突回避を行う自動操船 AI の開発にあたり、研究代表者が過去に実施した深層 Q 学習を応用した複数船の自動衝突回避に関する研究成果[2]を基礎とする。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[3]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 重バンパーを考案し、採用した。強化学習では、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。外側の外洋バンパーよりも内側の輻輳海域バンパーへの侵入により大きな負の報酬を与えることで、基本的には外洋バンパーに相手船を侵入させないような操船を行い、複数の船舶の存在により外洋バンパーへの侵入が回避困難な場合でも、輻輳海域バンパーには侵入させない操船学習が期待できる。選択可能な行動選択肢に対する行動価値を推測するニューラルネットワーク (NN) の入力には、15 海里四方を対象海域として、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。学習時には、単純な見合い関係から非常に輻輳した海域まで様々な状況に対応可能とするため、エピソード毎に相手船の隻数、船速、針路をランダムに決定している。深層 Q 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が、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。

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肢は、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 種類に限定した。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

一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が実現される。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固定バンパーを用いた危険評価を採用し、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 には周辺の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。

4 操船シミュレータによる評価

AI による自動操船システムを実船に搭載するにあたり、シミュレータを活用した事前の検証と評価が重要かつ不可欠である。本研究では、簡易操船シミュレータと操船評価ツールによる定量的評価とフルミッション操船シミュレータを用いた海技者による定性的評価の二つのアプローチにより、AI 操船の安全性に関する事前検証を行った。フルミッション操船シミュレータは、実際の船舶の船橋を模擬した操船装置で、本船の主機・舵、スラスター等を使用して、操船を行う。簡易シミュレータでは、設置にスペースを要する船橋内の機器をソフトウェアで模擬する事により、デスクトップ PC 1 台のみでのシミュレーションを可能とするものである。図 4-1 に神戸大学深江キャンパスに設置されている日本海洋科学製フルミッション操船シミュレータの船橋内部の写真、図 4-1 に簡易シミュレータの操作画面を示す。

本研究においては、通常であれば操船者が操作する操舵装置に代わり、AI システムがシミュレータに対して操舵指示を行う。シミュレータからは自船及び他船の位置や速度、全長などの情報を送信し、AI システムから操舵信号を受けて自船の運動計算予測を行う。この機能は、操船シミュレータ内のシミュレータ制御部（SimServ）と自動操船用 AI 間を各スレッド間で UDP 通信を行うことで実装している。



図 4-1 フルミッション操船シミュレータ船橋内部



図 4-2 簡易シミュレータの操作画面

自動操船 AI の検証にあたり、基本となる船舶との遭遇状況、すなわち単数並びに複数の船舶により形成される代表的な見合い関係を網羅するため、熟練海技者の操船経験を踏まえ、以下のシナリオを作成した。

➤ 1 対 1 反航船シナリオ (No.1～No.3)

反航船と遭遇するパターンには、他船が正船首方向に見える場合、正船首やや右寄りの方向に見える場合、正船首やや左寄りの方向に見える場合があり、衝突予防法の観点からいえば、互いに視野のうちにある限りこれらの避航はすべて左対左でかわすことができるよう、明確に意思表示を行わなければならない。

➤ 1 対 1 追越しシナリオ (No.4)

本船前方に本船よりも船速が小さい同航船と遭遇する状況において、他船を追い越すシナリオ。この場合、本船は追越し船、他船は被追越し船の区別が生じる。基本的に後方から接近する追越し船は、追い越される船を確実に追い越し、十分に遠ざかるまで追い越される船の進路を避けなければならない。なお、追越し船は被追越し船の右側から追い越すか、左側から追い越すかについては特に決まりはない。

➤ 1 対 1 横切り船シナリオ (No.5～No.16)

横切り船と遭遇するパターンには、他船が右から左に横切る場合と左から右に横切る場合があり、また、単に右から左からといった見合いだけでなく、他船の位置によっても自船がとるべき避航行動は異なる。

➤ 1 対 1 同航シナリオ (No.17～No.20)

本船近傍で同航する船舶（速力同じ）が本船の進行方向を遮るシナリオ。他船が針路・速力を維持し続けた場合、本船が取るべき避航方法は「①減速して他船の後方を航過する操船」、「②他船の方に針路を向けて、他船の後方を航過する操船」、「③他船と反対方向で大きく 1 周する操船」の 3 通りに大別される。

➤ 複数隻による複合型シナリオ (No.21～No.23)

他船との遭遇は、実海域においては必ずしも 1 対 1 とは限らない。特に、沿岸海域においては、航行可能区域が限られており、また、複数隻が個々の目的地に向けて航行していることから、その見合い関係は互いに複雑に重なり合うことが多い。

➤ 実海域再現シナリオ (No.24)

No.1～No.23 のシナリオの応用として、準輻輳海域を再現したシナリオを作成した。再現方法は、ある一定期間の AIS の過去記録から、船種、船型、航跡（位置、速力、進路）を解析することで構築した。期間の選定は、比較的輻輳しており、かつ本船の航行を妨げる他船交通が複数見られる状況となる時期を適当に選定した。海域は紀伊水道であり、途中横切り船群（北航船・南航船）、操業中の漁船群、反航船を避航しながら進むという難度の高いシナリオである。

4. 1 操船評価ツールを用いた評価

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。(株)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[4]。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[5]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。

この操船評価ツールを利用して、用意した操船シナリオについて、AI 操船の評価を行った。試験シナリオおよび評価結果の一例を図 4-3, 4-4 および表 4-1 に示す。図 4-4 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、中央上は同航船に対する領域図を描いており、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。右上・右下のグラフ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 4-1 は、評価ツールによる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。

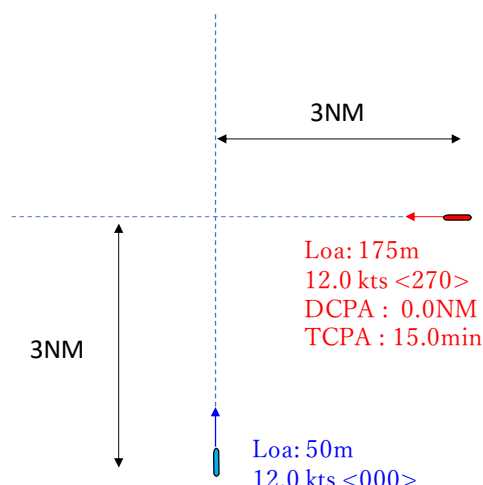


図 4-3 試験シナリオの例 (1 対 1 横切り船)

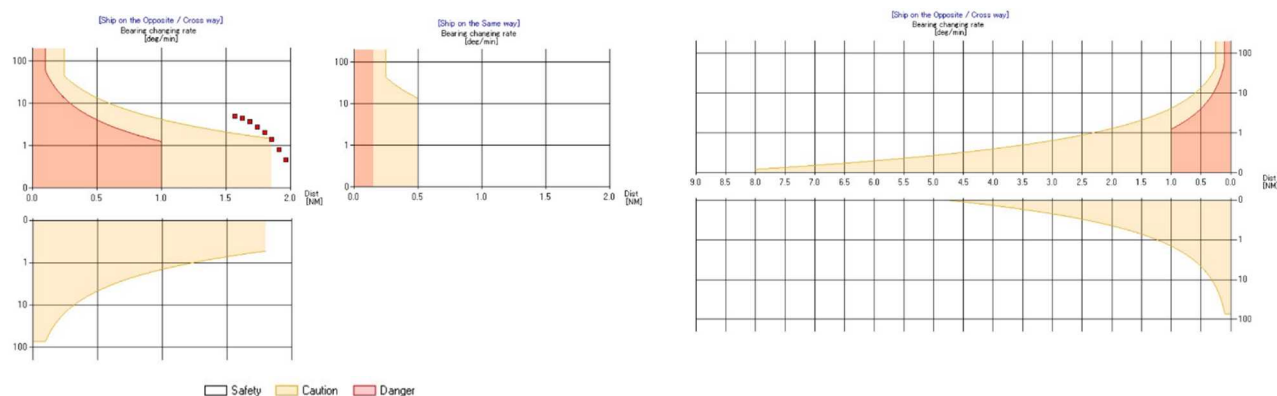


図 4-4 評価領域図の例

表 4-1 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	-	-	-	$b/a \times 100 = 0$

同様に、操船評価ツールを利用して、全シナリオに対する採点を行った。その結果を表 4-2 に示す。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」に侵入することは後方 40 度からの横切り船シナリオを除いてなく、「Caution」への侵入頻度も後述する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、速度変更やその場旋回なしには避航が難しいとされているケースであり、本研究では考慮しなかった速度変更を強化学習の行動選択肢に含めることやバンパー形状を工夫することで、更なる操船行動の改善が期待される。一方、数隻による複合型シナリオ (No.21-23) や実海域再現シナリオ (No.24) では、「Danger」と判定されることがなく、「Caution」領域も極めて少ないことから、見合い関係に対して固定バンパーの影響が強く現れる 1 対 1 のシナリオとは異なり、見合い関係が時間と共に変化していく複数船相手のシナリオでは高い評価が得られることが分かる。

表 4-2 AI 操船の評価結果

Scenario No.	Safety	Caution	Danger	Score	Total Time	Total Score
01	2079	0	0	0	2079	0.0
02	2206	1	0	-1	2207	0.0
03	2064	0	0	0	2064	0.0
04	2669	0	0	0	2669	0.0

05	917	0	0	0	917	0.0
06	665	395	0	-395	1050	-37.6
07	2884	0	0	0	2884	0.0
08	1740	1220	0	-1220	2960	-41.2
09	970	0	0	0	970	0.0
10	588	341	0	-341	929	-36.7
11	2957	0	0	0	2957	0.0
12	2114	809	0	-809	2953	-27.4
13	588	310	0	-310	898	-34.5
14	844	234	122	-478	1200	-39.8
15	2583	307	0	-307	2890	-10.6
16	1244	2239	80	-2399	3563	-67.3
17	629	0	0	0	629	0.0
18	554	338	0	-338	892	-37.9
19	2514	0	0	0	2514	0.0
20	2179	0	0	0	2179	0.0
21	3388	0	0	0	1694	0.0
22	6380	1	0	-1	2127	0.0
23	16971	207	0	-207	2454	-8.4
24	94626	54	0	-54	1578	-3.4

4. 2 海技者による評価

練習船「深江丸」での実船実験に先立ち、図 4-5 に示すようなフルミッション操船シミュレータ実験を行い、大型船の操船経験を有する複数の海技者の立ち会い検証に加えて、「深江丸」の操縦性能について十分な知識と経験を有する本船乗組員による評価を実施した。



図 4-5 フルミッション操船シミュレータを用いた AI 操船評価

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AIによる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。その結果、対象とする深江丸の操縦性能を考慮すると、自船の避航開始のタイミング並びに操船行動について、自船を視点とした自船の危険を回避するための操船としては、その操船に大きな違和感はないことを確認した。一方、相手船との距離が近づくにつれて徐々に避航角度を大きくしていく避航動作については、本来、人間であれば、最初に大きく避航動作をとることで安全な航過距離を確保し、その距離が十分であると判断したタイミングでその角度を小さくしていく動作をとることから、AIによる操船行動との乖離が大きいと評価される場面もあった。この点については、人間の方が非効率的な避航動作を行っているとも言えるため、現段階では判断が難しいが、実海域において人間が操船する船舶が存在する以上、ある程度人間の感覚に寄り添った操船行動が求められることから、今後の課題として引き続き検討していくことが望まれる。当初より課題として挙げられていた「人間が操船する他船から見て不安を与えない」という点においては、概ね解決されていることを他船の視点から確認した。自船が海上衝突予防法という「避航船」の立場にある場合における前広な避航動作を行う点についても、バンパー形状をより大きく形成することにより概ね解決されることを確認した。一方で、避航感度を高めたことにより、避航動作に関しては比較的得意なAI避航モデルが構築された傍ら、自船が海上衝突予防法という「保持船」の立場にある場合の操船行動については、改良の余地が残されている。

さらに、「深江丸」での実船実験では、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、アンケート評価とヒアリングを実施した。

これらの海技者によるAI操船の評価を通じて、表4-4のような課題を抽出し、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。後述する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。一部の操船局面においては、操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、今年度の実船実験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。

表 4-4 海技者による評価で指摘された AI 操船の課題と解決策

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

5 操船支援システム開発

5. 1 操船支援システムの開発

海上での自動操船実験には、神戸大学大学院海事科学研究科附属練習船「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[6]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 5-1 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。

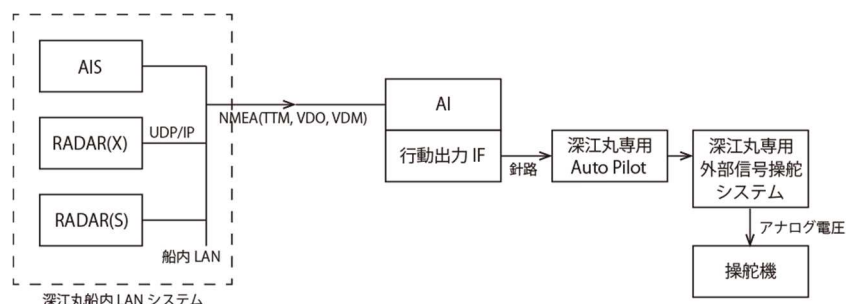


図 5-1 AI による自動操船システムの構成図

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witch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witch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。

5. 2 自動操船システムのリスク評価

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5-2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に限定し、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。

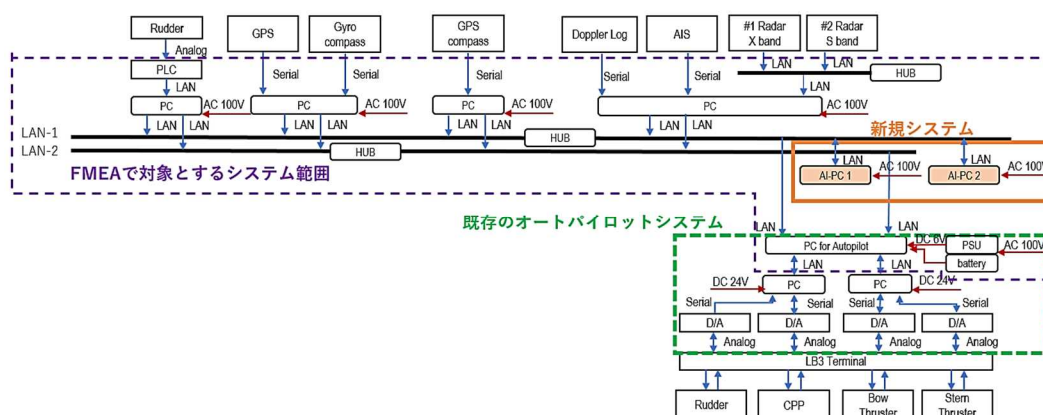


図 5-2 船内システムの構成図

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。

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。

実機システムを用いた FMEA 試験により、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。

5. 3 実船実験に向けた関係各所との協議

AI による自動操船の実船実験を行うためには、実海域での実施となるため十分な安全確保のために、関係各所との入念な事前の協議が必要となる。そのため、船級、海上保安庁を含めた関係各所との協議ならびに調整を実施した。具体的には、2020 年 5 月 19 日に海事局安全政策課ならびに海上保安庁交通部（本庁）に訪問し、試験スケジュールのアップデートを行い、その後、2020 年 10 月 8 日に実施した操船シミュレータによる AI プログラムの評価試験において、複数の試験シナリオをシミュレータ上に投影し、その操船行動について概ね問題がないこと、また、FMEA 結果へのフィードバックとそれらを踏まえた試験法案についての共有を行った。海上保安庁第五管区海上保安本部へは、2020 年 8 月 28 日、2020 年 10 月 26 日に訪問し、試験スケジュールならびに試験法案、管轄海域内での実験に際する緊急時対応などについて綿密な調整を重ね、安全な試験遂行に向けた体制の構築を行った。

6 実船試験による AI 自動操船の検証

6. 1 実施条件

内航船の操船支援システム開発という目標を念頭に、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。

6. 2 実船試験の結果

2020 年 12 月 8 日から 2020 年 12 月 10 日までの 3 日間、大阪湾にて自動操船 AI の検証試験を行った。3 日間で計 21 通りの見合い関係において AI による避航操船をおこなった。試験時は目的地と避航対象船を決定し、目的地の緯度経度を AI システムに入力後、AI による避航操船を行い、目的地方向へ針路を

戻すまでを確認した。実船試験の様子を図 6-1 に、船内の様子を図 6-2 に、開発した自動操船システムのマンマシンインターフェース（操作画面）を図 6-3 に示す。



図 6-1 大阪湾での実船試験の様子



図 6-2 試験時の船内の様子



図 6-3 実船試験用のマンマシンインターフェース

実船試験の結果の例を図 6-4、6-5 に示す。図 6-4 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うことが確認された。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 6-5 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、外側バンパー外への排除を試みつつ、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効果と考えられる。

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。

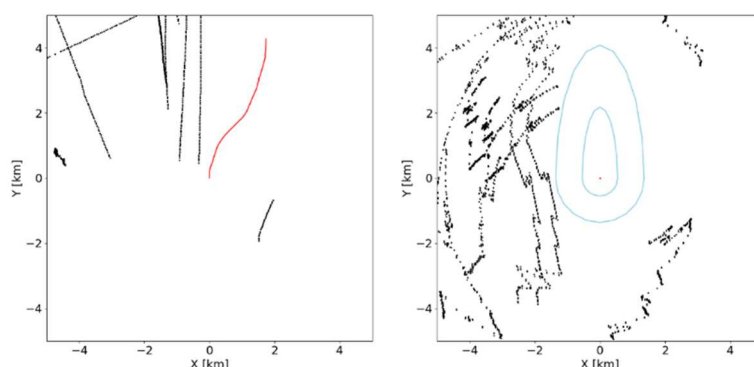


図 6-4 AI による自動操船結果
(バンパー内には相手船が存在しない状況から開始)

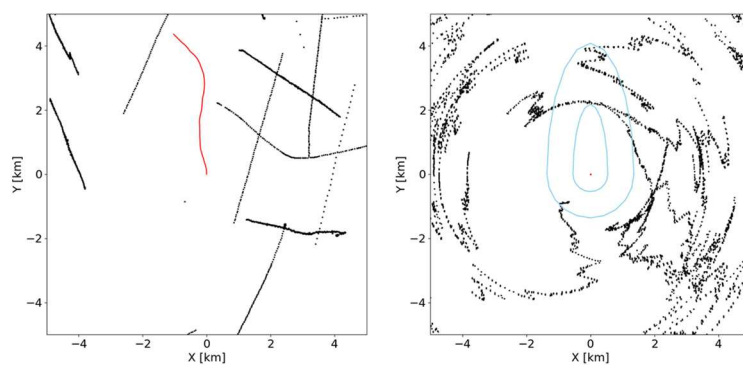


図 6-5 AI による自動操船結果
(バンパー内に相手船が存在する状況から開始)

6. 3 海技者による実船試験の評価

単純な見合い関係による操船行動については、海上衝突予防法を意識した「避航船」と「保持船」の切り分けが求められる行動を除いては、人間による操船行動と同等もしくはそれ以上に十分に安全離隔距離を保った避航を行っており、大きな違和感はない。加えて、複数の船舶が関係するやや難易度の高い見合い関係であっても、衝突することなく避航動作をとることができていた点、AI による高度な頭脳を活かした船員へのサポートが可能であることを証明している。また、AI による操船支援を導入するにあた

っては、一定の習熟度、すなわち使用前の教育訓練などが必要ではあるものの、適切なマンマシンインターフェースを構築することにより、AI が考える操船行動を人間が予想できる環境を整えることが可能であることがわかった。

一方、見合い関係が複雑になった場合には、現状のマンマシンインターフェースではAI の意図を完全に読み取ることが難しい。AI による避航操船が始まった後も、原針路に復帰するまで人間による継続監視が必要となり、AI の行動がよめないという不安からくる操船者のストレスを解消することができない。目標としている操船者の負担軽減という観点から、AI が考える未来位置を明確に示すなどの工夫が必要と考えられる。

現状の内航船における船員不足や労働負荷への対応策として、今後、AI を活用した機能により、人間による操船タスクが一部代替される可能性は極めて高い。しかしながら、あくまで、現時点ではAI は人間のサポートとして使われるべきであり、そのサポートを適切に受けるためには、操船者がこのような新しい技術について習熟し、操船者が最終的な安全を担保することができなければならない。例えば、AI の操船判断の先読み機能を導入するなどして、判断そのものはブラックボックスであってもその結果としての行動を人間に提示することが望まれる。今後は、現状の船員教育の在り方や資格の要件など、将来的な高度先進技術を備える船舶に見合った船員養成体制の構築についても、技術開発と並行して広範な議論が必要であろう。

7 結論

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 の針路指示による幅狭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可能と思われる。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。

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, 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] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.