

# 自動運航船の総合シミュレーションシステムの開発について

南 真紀子\*, 國分 健太郎\*, 小林 充\*, 疋田 賢次郎\*,  
吉村 健志\*, 佐藤 圭二\*, 齊藤 詠子\*, 澤田 涼平\*

## 1. はじめに

近年、自動運航船に対する関心が高まり、日本でも自動運航船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には、2025年を目標に一部の最終的な意思決定を機械が行う高度に自動化された自動運航船（フェーズⅢ）の実現が示されている。また、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2025年の無人運航船の実用化を目指している。自動運航船及び無人運航船ではシステムの支援により、人的要因による事故の発生を抑制し安全性の向上を図ることが求められている。一方、自動運航船が航行するためには、技術の開発だけではなく、社会に受容されることも必要である。そのためには自動運航船が安全であること、すなわち想定されるリスクが許容可能な範囲に抑制されていることを示す必要がある。海上技術安全研究所では、安全性の評価方法や評価に必要なシステム構築などの検討を進めており、本稿では、操船シミュレータをはじめ複数のシミュレーションシステムで構成された総合シミュレーションシステム及びシミュレーションを用いた評価手法の検討について報告する。

## 2. 自動運航システムの開発・認証の流れ

自動運転で先行する自動車分野における無人自動運転サービスの事業化のプロセスを図1に示す。図1は、1) ユースケースの設定、2) 走行環境や運行条件の設定、3) 車両技術、システムの開発や選定、インフラ、周辺技術の開発や整備、4) シミュレーション、テストコース、公道での技術実証、5) サービスの実証、の一連のプロセスが途中で得られた課題をふまえて見直しをしながら実施されることを示している。また、4) 技術実証及び5) サービスの実証では、開発者と認証者が協調して問題点の抽出やテストシナリオの確認等を実施しており、開発と同時に認証に必要な性能基準等の検討もされている。船舶における自動運航システムにおいても同様のプロセスにより製品化や認証の検討が進められると考えており、テストコース走行、シミュレーションによる技術実証では、それらに代わる総合シミュレーションシステムが必要となる。また、これらの検証を開発者と協調して進めるため、開発に必要な機能を備えることも本システムの目的の一つとした。

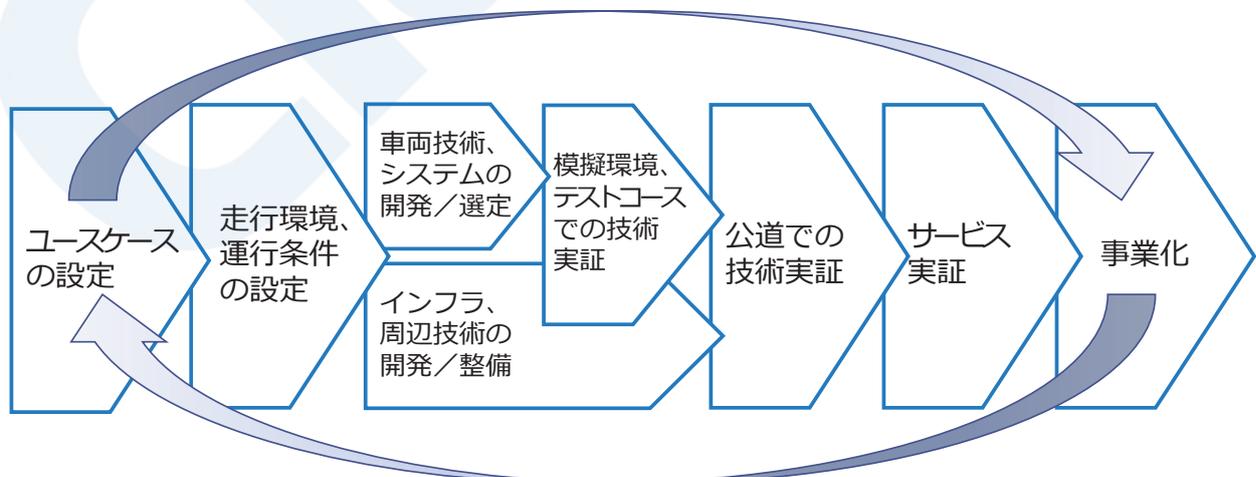


図1 自動運転サービス事業化のプロセス（出典：『自動走行の実現に向けた取組報告と方針』Version5.0）

\*国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所

### 3. 総合シミュレーションシステムの概要

総合シミュレーションシステムは次の5つのシステムで構成することを検討している。

#### 1) 操船シミュレータ (SHS : Ship Handling Simulator)

フルミッション型操船シミュレータである。ヒューマン・マシン・インタフェース (HMI : Human Machine Interface) の評価、緊急時の乗組員への操船権の移譲のタイミングの評価、既存船舶と併存する海域での操船行動評価など、人の関与を考慮した評価を可能とする。

#### 2) ファストタイムシップシミュレータ (FTSS : Fast Time Ship Simulator)

実時間よりも十分に短い時間でシミュレーションを実施し、一定の条件下で網羅的な検証を可能とする。

#### 3) センサ検証システム

自動化システムに接続する他船運航状況を検知するシステムの検知性能を検証することを可能とする。

#### 4) 避難シミュレーション

火災等の非常時の避難状況の検証を可能とする。

#### 5) 機関遠隔監視システム

機関の状態を陸上から監視することを可能とする。

各システムの名称として、FTSSを除いて機能を示す一般的なものを使用している。なお、センサ検証システム、避難シミュレーション及び機関遠隔監視システムについては、検証対象の明確化等のコンセプトの検討を2021年度に開始したところであるため、SHS、FTSSを中心に説明する。また、船上作業は多岐にわたり、評価手法は対象により異なる。SHSやFTSSが対象とするのは、操船に係わる部分であり次の機能となる。

- 1) 自動操船 (離着棧, 避航, 荒天下操船)
- 2) 遠隔監視及び操船
- 3) 緊急時操船 (システムから乗組員への操船の移譲)

SHSやFTSSを認証及び開発に用いるためには、対象となる自動化システム (自動避航操船等のアルゴリズムまたはアルゴリズムを組み込んだシステム) を接続する必要がある。FMI (Functional Mock-up Interface) と呼ばれる標準インタフェースを用いることとした。また、対象船舶を再現するための操縦運動モデルデータベースや対象海域等の情報を考慮したシナリオを作成するシナリオデータベース

の作成についても検討している。

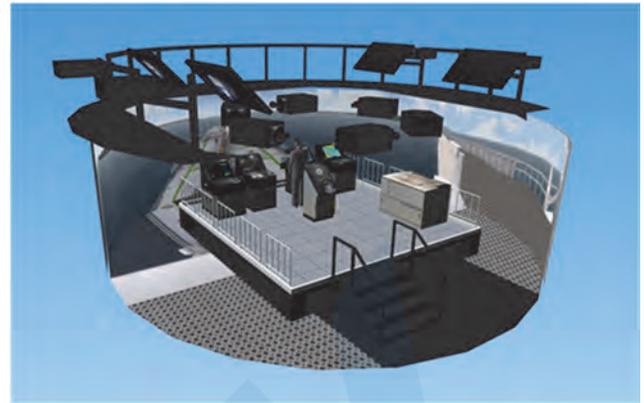


図2 操船シミュレータイメージ (2021年3月作成)

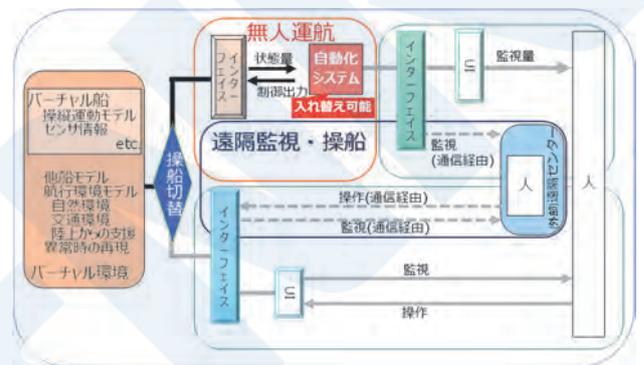


図3 操船シミュレータの概念図

### 4. シミュレーションシステムの機能

#### 4.1 操船シミュレータ (SHS) (図2)

自動運航船または自動化システムのレベルは、乗組員が判断及び操船を行いシステムはそれらの支援をする現在のレベルから、人の関与を必要とせず航行する完全な自律自動運航船のレベルまで、いくつかの段階がありステップを踏んで開発が進んでいくと考えられる。すなわち、船橋作業は完全な自律型の自動運航船にいたる開発段階では、乗組員の係わりを考慮した安全評価を行うことが必要となる。例えば、緊急時等、システムで対応できないと判断され乗組員に操船を引き継ぐ際の情報や時間の確保について検証が必要である。また、自船の開発段階にかかわらず、人が操船する既存船舶と共存することを考慮する必要がある、それらの船舶に違和感を与えない操船であることが評価の対象となる。

操船シミュレータは、このように人の関与を考慮した評価が可能であることが特徴であり、また実海域実験では再現が難しい環境やトラブルを含め、様々な条件を検証するために必要である。

操船シミュレータに求められる機能は次のとおりである。また概念図を図3に示す。

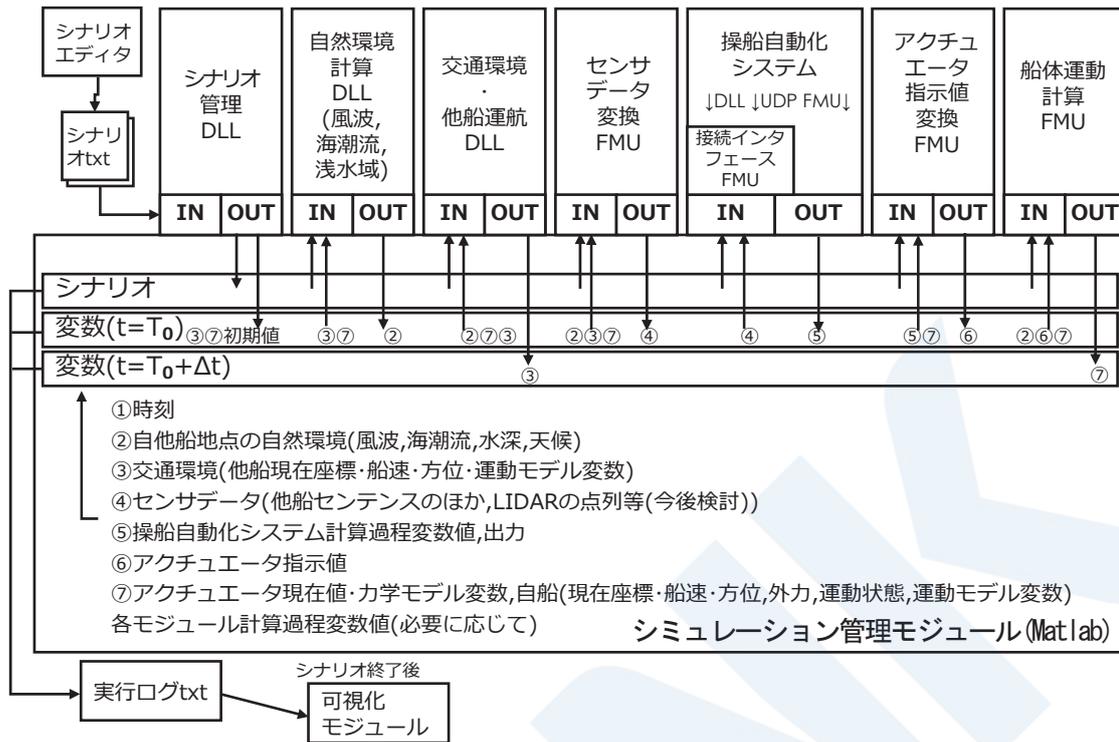


図4 ファストタイムシップシミュレータの動作概要

- 1) 自動操船
    - ・任意の自動操船プログラムの接続
    - ・評価対象に対応した船体運動モデルの組み込み
  - 2) 遠隔監視及び操船
    - ・遠隔通信システム
    - ・情報提示機能の再現
    - ・通信速度，データの欠損等の再現
  - 3) 乗組員への操船の移譲，HMIの評価
    - ・情報提供機能の再現
    - ・操船切り替え装置及び機能の再現
    - ・評価対象に応じた表示デバイスと操作デバイスの再現
    - ・航海機器等の自由な配置，外部持ち込み機器との接続機能
  - 4) 各種情報の組み込み
    - ・他船への自動避航機能の組み込み
    - ・各種センサ情報の作成
    - ・評価対象に合わせたセンサ情報の生成
    - ・情報の精度（ノイズ，データ欠損，更新間隔等）の再現
    - ・エンジン，推進器，操舵装置の組み込み
    - ・非常時イベントの発現機能
    - ・センサ，機関，電源の故障等を再現
  - 5) テスト環境
    - ・テストケース作成機能
    - ・操船結果及び各種指標値の解析結果の表示
- 現行の操船シミュレータにない新規機能も含まれ

ており，実装に向け検討を進めている。

#### 4.2 ファストタイムシップシミュレータ (FTSS)

操船自動化システムの安全評価では，多種多様な条件下でのシミュレーションが必要である。人の係わりを考慮する必要がない場合には，実時間での出力を行わず高速で計算を実施するファストタイムシミュレーションを用いることが有効である。

FTSSの概要を図4に示す。操船自動化システムや環境，他船，センサ，船舶の運動計算等FTSS上で動作する各シミュレーションモジュールは，FMU (Functional Mock-up Unit) としてFMIを通じて，またはDLL (Dynamic Link Library) としてシミュレーション管理モジュールと接続され，全体が自動運航船の動作をテストするFTSSとして機能する。各モジュールの概要は以下のとおりである。

##### 1) シミュレーション管理モジュール

シミュレータを構成するモジュール類の起動やシナリオに基づく初期化，モジュールの実行やモジュールから入出力されるデータの制御，ログ出力，可視化のための出力，シナリオに基づく終了判断，時刻更新などの一連の動作を行い，FTSSの動作を管理するものである。

##### 2) シナリオ管理DLL

シナリオ管理を担当し，シミュレーション管理モジュールに対応したシナリオ作成，及びシミュレーション実行時に使用する。シナリオ管理DLLは，シミュレーションを実行す

るために必要な設定項目をシナリオファイルから読み込み、シミュレーション管理モジュールが使用できるように、シナリオ情報をロードすることを目的とする。

3) 自然環境計算DLL

自船・他船の時刻と位置によって変化する海上風、海潮流を出力することを目的とする。自船・他船の時刻と位置 (XY) から、海上風、海潮流、水深、天候、昼夜の情報の出力を行う。計算速度向上のため、事前にこれらの24時間分のグリッドデータの計算を行いデータセットを作成する機能も持つ。

4) 交通環境・他船運航DLL

シナリオにより設定された値に基づいて、設定数の他船を発生させ、それぞれの他船を運航・自動避航させる。

5) センサデータ変換FMU

自船状態・他船状態・自然環境のシミュレーション計算で求めた真値をベースに、計測器の計測誤差を模擬したノイズを重畳し、船舶の航海機器の出力を模擬した形に加工して操船自動化システムの入力に整合するセンサデータを作成・提供する。

6) 操船システム接続インタフェース

FMI以外のインタフェースで構築された操船自動化システムをシミュレーションシステムにFMIで接続するためのインタフェースである。操船自動化システムは多様な実行形式や入力フォーマットを持つものが考えられるため、本インタフェースは容易に改造することが必要となる。現在は、FMI接続以外にネットワークを介した接続を想定している。

7) アクチュエータ指示値変換FMU

操船自動化システムからFMI等のインタフェースを通じて受信した操船指示を実際のアクチュエータが入力として受け入れられる形に変換するとともに、アクチュエータの機械的な応答を模擬してアクチュエータの現在値 (回転数、舵角等) として船体運動計算FMUに出力する。

8) 船体運動計算FMU

船体運動計算FMUは、アクチュエータ指示値変換FMU・自然環境計算DLLで計算された船舶の運転情報と自然環境の状態量を、FMIを介して入力し、自船の状態量の時間更新の計算を行い、FMIを介してシミュレーション管理モジュールに出力する。なお、主要目とアクチュエータ構成から操縦運動モデルの

設定に必要な操縦運動パラメータを出力する操縦運動シミュレーションツールを作成し、避航操船等の評価では、生成されたパラメータを本FMUを使用することを検討している。



図5 結果の可視化

上：電子海図表示，中：指標の時系列，下：3D表示

9) 可視化モジュール

シミュレーションにより出力された可視化ログを、電子海図・3D表示及び評価指標の表示により可視化することで、実行結果をより詳細に分析する機能を提供する (図5)。評価

指標については5章で述べる。

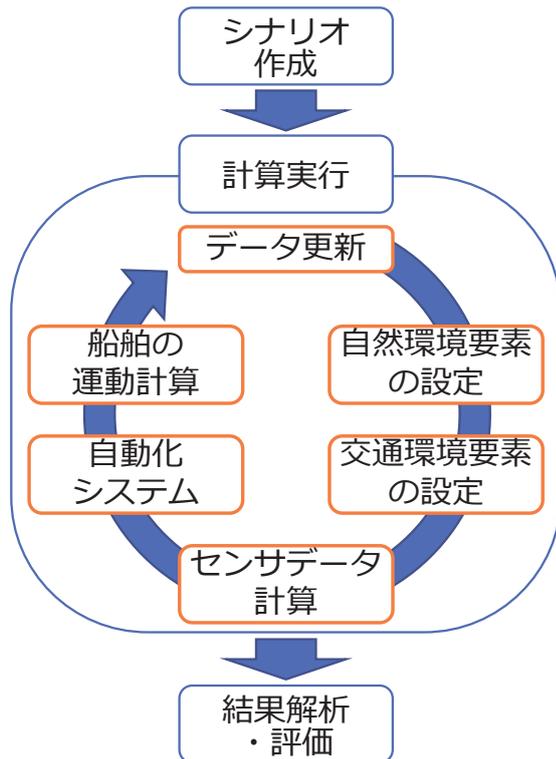


図6 シミュレーション実施手順

### 4.3 シミュレーション実施手順

シミュレーションの実施手順を、FTSSを例として図6に示す。SHSでは、計算の実行時に景観画像や航海機器の表示部分等のデータの作成が追加されるが、基本的な流れは同じである。

#### 1) シナリオ作成

シナリオ作成では、シミュレーションの初期条件を設定する。ここでは、自船の状態や位置、計画航路（変針点の情報）、他船の配置や速度等の交通流や波や風、昼夜間等の自然環境の条件、水深、航行障害物等地理的条件が設定される。シナリオ作成用のエディタを用いてテキストファイルとして作成される。

4.2節の2) シナリオ管理DLLがシナリオファイルのロードを担当する。

#### 2) 計算実行

シミュレーション計算は、図6に示すように1サイクル毎にデータを更新し終了条件を満たすまで計算を継続する。終了条件はシナリオで決定され、最後の変針点に到達した場合等が用いられる。4.2節の3)～8)が担当する。

#### 3) 結果解析・評価

自船及び他船の航跡、針路、船速に加え自動化システムの出力等も記録し、操船結果を評価することができる。また任意のタイミング

から再現を可能とするなど開発時に対象のシステムへのフィードバックが容易なデバッグ環境の構築を検討している。

### 4.4 標準インタフェース (FMI)

FMIは、XMLファイル、バイナリ、Cコードを組み合わせて1つのファイルにzip圧縮したものを使い、動的モデルを交換するためのコンテナとインタフェースを定義したフリーの標準規格であり、コード及びドキュメントは公開されている<sup>2)</sup>。

開発や利用はまず自動車分野で進められた。システムの開発において、開発各社の様々なシミュレーションツールで記述されたモデルを接続するのは容易ではないが、シミュレーションツールを統一するのは現実的ではない。そのため、ツールに依存しないモデル接続のための共通インタフェースを規格化し、異なるシミュレーションツール間でのモデルの交換と接続を目的として、欧州の公的プロジェクトとしてFMIが構築された。海事分野においても、ノルウェーを中心にFMIを適用したシミュレーションプラットフォームの構築が進められており、海事に特化したコードが公開されている<sup>3)</sup>。

当所のシミュレーションシステムにおいても、前述のとおり開発各社及び開発対象によって異なる自動化システム、センサデータ、アクチュエータ及び船体運動はFMIを用いて構築され、任意のシステムの接続を可能とする。

## 5. シミュレーションを用いた評価法検討

### 5.1 SHSとFTSS

SHSは、主に、操船者の主観的評価と限られたシナリオに対する操船結果を得るために用いられる。避航操船機能の評価においては、自船及び他船の避航操船の状況の妥当性の評価と、自動避航操船機能のHMIの評価に用いられる。また、避航操船ができない場合に操船者に操船を移譲することとなっている場合は、この移譲が適切に行われるかどうかの評価にも用いる。

SHSによる評価では、より実際の航行環境に対応した評価結果が使用体験に基づく主観的評価とともに得られるが、全ての見合い関係のシナリオを評価することは困難である。このため、妥当性確認計画に基づいたシステム安全妥当性の確認、認証者が設定する網羅的な環境条件下での妥当性試験はFTSSで評価を行うこととなる。FTSSの評価において判断の難しいシナリオを、SHSにおいて操船経験者による検証の対象とすることで効率的、効果的に評価が進められると考えている。

表1 衝突危険度

対象	評価指標	概要
衝突危険度	CJ <sup>12)</sup>	相手船との相対方位とその変化率，2船間距離とその変化率から衝突の危険度を計算する。
	SJ <sup>13)</sup>	相手船との相対距離及び相対方位変化を，見合い関係を考慮した3段階でファジー表現し，両変数の組み合わせにより2船の衝突危険度を3（安全）から-3（危険）の指標で示す。
	CR <sup>14)</sup>	TCPAとDCPAを変数として，船長及び操縦性能を考慮したファジー推論により2船の衝突危険度を示す。
操船困難度	BC <sup>15)</sup>	他船による衝突危険度に変速と変針による避航手段の選好度に応じた重みを乗じて，周囲に存在する船舶によって閉塞される度合い（避航操船空間閉塞度）を求めて操船困難性を評価する。
	ES <sup>16)</sup>	操船者に課される負荷の大きさを，障害物や他船との衝突の危険が顕在化するまでの時間余裕を操船者が感じる危険感に置き換えることにより定量化して示す。
	OZT <sup>11)</sup>	自船の進行方向で相手船の存在により妨害される領域をOZT（Obstacle Zone by Target）とし，OZTの分布から自船の避航操船余裕を評価する。

## 5.2 評価用シナリオ

自動避航操船機能等の自動化システムの認証において，ソフトウェアの信頼性，妥当性についてはハザードを特定して試験項目として設定し，その状況でのシミュレーションを行い，問題点のないことを確認する必要がある。ハザードとしては，他船との遭遇，見合い関係の判断，信号のロスト等を考慮し，網羅的な環境条件下でのシナリオを設定し，テストを行う。

避航アルゴリズムの評価をFTSSで実施する場合の評価シナリオは，1対1の遭遇で基本機能を確認するためのシナリオと，輻輳海域を想定した他船との多重遭遇シナリオが考えられる。1対1の遭遇については，見張りが行われる範囲に限定することで必要なシナリオ数は有限となり，相手船の配置，針路，速度を網羅的に設定したシナリオが作成される。また，多重遭遇については，シナリオが無限に作成できるため，避航操船機能に主題をおいた場合は，以下の観点からシナリオを作成する。

- 1) ランダムに遭遇他船を設定
- 2) AIS（Automatic Identification System：船舶自動識別装置）データ等に記録された航跡から頻発する見合い関係及び操船が困難と思われる見合い関係を抽出
- 3) 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<sup>4)</sup>
- 4) 海難事故例からシナリオを抽出<sup>5)</sup>

AISデータを用いたシナリオの作成について，自動車分野では，蓄積した交通流観測データを体系的

なカテゴリに分類して蓄積することでシナリオデータベースを形成する，データ分類型シナリオベースアプローチが提案されている<sup>6)</sup>。AISデータには，船位，対地速度，船首方位，MMSI，IMO番号，目的地等の情報が含まれており<sup>7)</sup>，個々のデータをMMSI等の船舶固有の情報で船舶毎に振り分け，時刻順にソートすることにより航跡が得られることから，同様な手法を用いてシナリオデータベースを構築することを検討している。なお，AIS非搭載船の再現は，500GT未満の内航船ではAIS搭載船のデータからの推定やレーダデータの利用等により，漁船では漁協等へのヒアリングなどにより対象となる海域の航行状況を調査し，現況を反映したモデルを作成しシナリオに付加することを検討している。

## 5.3 評価指標検討

避航操船の評価指標として，実験時に取得された航跡や操船記録を用いて最接近距離（DCPA）や最接近時間（TCPA），表1に示すような従来の衝突危険度などの定量的な評価等を組み合わせることが考えられる。また，ノルウェーを中心に法令への適合性を評価する方法が提唱されている<sup>8) 9)</sup>。この評価法では，The Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea（COLREGs）に挙げられる3種類の船舶見合い関係である，行会い（head-on），横切り（crossing），追い越し（overtaking）における避航の評価が行われている。また，操船者の主観的評価及び主観的危険度を適用した評価<sup>10)</sup>，OZTを利用した評価等<sup>11)</sup>いくつか提案されている。

自動運航船が航行のルールを遵守することは、海難事故防止のためにも重要なことであるが、現行のルールは人の操船を前提に曖昧さを含んだものとなっており、定量的な評価が困難である。ノルウェーで提唱されている手法では、複数のパラメータを用いてルールを数式で示し評価する。パラメータは過去の事故事例や避航について述べた論文等から導出しており、検討の余地があるが定量的評価手法として興味深いものである。また、複数船舶が影響し合う見合いでは、船員の常務 (Good Seamanship) に則り操船することが求められる。関係が明らかな見合いについては、ルールに従って評価し、複雑な見合いについては主観的な観点をを用いた評価を行うなど対象に応じた評価指標が必要である。なお、システムとしてはどちらの評価も満たす必要があると考えている。

## 6. まとめ

当所で開発中の総合シミュレーションシステムの概要と自動避航操船を対象とした評価法について述べた。自動運航船の実用化には、安全性評価は不可欠であり、またそれらの基準は今後開発の目安にもなるものである。MEGURI2040プロジェクトに参画の開発事業者を始めとする関係各社と連携し、開発を支える総合シミュレーションシステム、及び安全性評価基準の整備を進めていきたい。

## 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」事業の委託研究として行われております。関係各位に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 自動走行ビジネス検討会：自動走行の実現及び普及に向けた取組報告と方針 (2021年4月)
- 2) Blochwitz Torsten, Martin Otter, et al.: The Functional Mockup Interface for Tool independent Exchange of Simulation Models, Preprint of the 8th International Modelica Conference, (2011)
- 3) Open Simulation Platform, Maritime Reference Models: <https://open-simulation-platform.github.io/demo-cases>
- 4) 例えば、今津隼馬：避航法に関する研究，東京大学博士論文 (1987年)
- 5) 南真紀子，丹羽康之，庄司るり：事故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，日本航海学会講演予稿集vol.7 (2019年)
- 6) 日本自動車工業会：自動運転の安全性評価フレームワークVer1.0 (2020年10月)
- 7) 増田憲司，原大地，西澤慶介：AISの概要とデータ構成，日本航海学会誌，第188号 (2014年)
- 8) K.Woerner et al.: Quantifying protocol evaluation for autonomous collision avoidance, Autonomous Robots, Vol.43 (2019.4.)
- 9) P.K.E. Minne: Automatic testing of maritime collision avoidance algorithms, <http://hdl.handle.net/11250/2452112> (2017.)
- 10) 中村紳也，岡田尚樹：自動避航システムの安全性評価，航海学会論文集vol.142 (2020年)
- 11) 西崎ちひろ，榎野純，庄司るり，今津隼馬：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，航海学会論文集vol.139 (2018年)
- 12) 小林弘明，遠藤真：船舶避航操縦の解析-人間・機械系解析の観点より-，航海学会論文集vol.56 (1976年)
- 13) 原潔：輻輳海域における避航操船基準の有効性，航海学会論文集vol.85 (1991年)
- 14) An Intelligent Ship Handling Simulator With Automatic Collision Avoidance Function of Target Ships, INSLC17 (2012年)
- 15) 長澤明，原潔，井上欣三，小瀬邦治：避航操船環境の困難度II，航海学会論文集vol.88 (1992年)
- 16) 井上欣三，増田憲司，世良亘：海上交通安全評価のための技術的ガイドライン策定に関する研究-I，航海学会論文集vol.98 (1997年)

