

1 総合シミュレーションシステムを用いた 自律・無人運航船の安全性評価

南 真紀子*

Safety Evaluation for Autonomous / Unmanned Vessels with Comprehensive Simulation System

by

MINAMI Makiko

Abstract

Interest in autonomous and unmanned vessels has been growing, and efforts are underway in Japan to realize autonomous and unmanned vessels. The automation and unmanned operation of ships is expected to improve safety by reducing accidents caused by human error with the assistance of automated systems. In addition, automation technology is also expected to reduce the workload in order to cope with the aging and decreasing number of seafarers. Navigating autonomous and unmanned vessels requires technological development as well as social acceptance. To this end, it is necessary to demonstrate that autonomous vessels are safe, i.e., that the assumed risks are controlled to an acceptable level. The National Maritime Research Institute (NMRI) has been studying safety evaluation methods for autonomous vessels and developing a simulation system to be used as an evaluation tool. This paper introduces a comprehensive simulation system, including a ship-handling simulator, and the evaluation method using the simulation system.

* 知識・データシステム系

原稿受付 令和 4年4月27日

審査日 令和 4年5月30日

1. はじめに

船舶の自動化や無人化に対する関心が高まり、日本でも自律・無人運航船の開発が進められている。これらの開発では、自動化システムにより、近年課題となっている船員の減少や高齢化に対処するため船員の負担軽減や省力化を図ること、及び海難原因の約8割を占めるとされる見張り不十分や操船不適切等の人的要因¹⁾による事故を減少させ航行の安全性の向上を図ることが期待されている。

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を示す必要がある。自動運転で先行する自動車分野では、安全原則を「自動運転車両は、許容できないリスクを発生させないこと、すなわちその運用領域において、合理的に予見可能かつ防止可能な交通事故を発生させないこと²⁾」としており、船舶においても同様に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。当所では、国やIMOにおける自動化システムの認証基準等の策定に資することを目的とし、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、フルミッション型操船シミュレータ (SHS, Ship Handling Simulator) 及び高速シミュレーションを実行するFTSS (ファストタイムシップシミュレータ) からなる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. 自動化システムの安全性評価

2.1 概要

自動運航船の安全性評価は、船上作業を対象とした場合でも多岐にわたり、評価手法も対象により異なる。SHSやFTSSが対象とするのは、操船にかかわる部分であり次の機能を担うシステムとなる。

- 1) 自動離着棧操船
- 2) 自動避航
- 3) 遠隔監視・操船
- 4) 緊急時操船 (システムから乗組員への操船の移譲)

自動化システムの評価にあたっては、自動車の自動運転システムの安全性評価に用いられているシナリオベースの評価手法 (ISO34502)³⁾を採用することとした。自動化レベルの検討では、自動運転システムの基準を参照する動きはあるが、安全性評価への適用は当所独自の取り組みである。この評価法ではまず、図-1に示すように評価の対象となる危険シナリオを特定する。なお、図-1は、ISO34502に示されている危険シナリオ特定の流れを MASS (Maritime Autonomous Surface Ships: 自律運航船) の開発状況を考慮して変更したものである。図中では、Task1としてシステムの性能に関連する危険シナリオの特定、Task2としてHMI (Human Machine Interface) にかかわる危険シナリオの特定、Task3としてサイバーセキュリティが挙げられている。さらに、Task1の対象となる危険シナリオとして、操船の困難性に由来するもの (Task1.1)、機器の故障や誤使用等に由来するもの (Task1.2) 及び緊急時の対応 (Task1.3) があり、本研究ではTask1.1を対象とした。

操船の困難性に由来する危険シナリオの検討では、システムが運用される範囲で網羅性を確保することが求められる。そのため、自動車分野における物理原則に基づくシナリオベースアプローチ³⁾を参考に操船タスクを認識・判断・操船のサブタスクに分解し、サブタスクごとに自船に影響を与える外乱を体系化し、それぞれに支配的な物理原則に基づいてシナリオを作成することとした。なお、サブタスクに対応する外乱はそれぞれ、認識外乱、交通外乱、船体運動外乱である。これらの外乱は独立であるとして、外乱を構成する要素の出現頻度や影響度を考慮して組み合わせることにより網羅性の確保とシナリオ数を抑えることを検討している。なお、

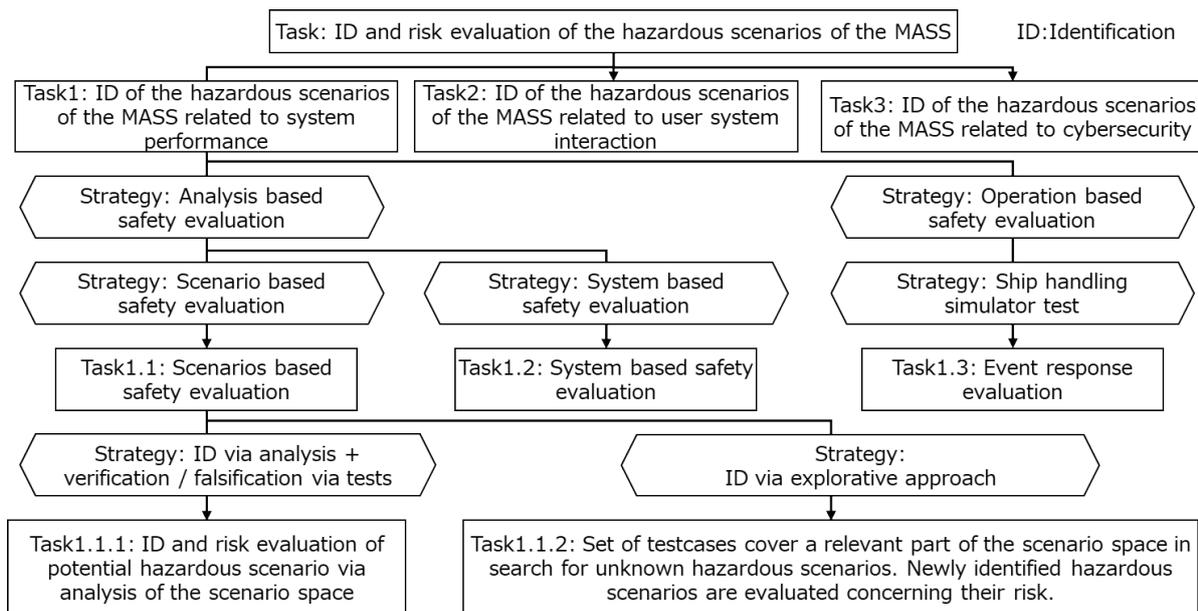


図-1 危険シナリオの特定 (ISO34502 を基に MASS に合わせて作成)

ISO34502は、高速道路に限定し移動体として二輪を含む車両のみを考慮したものである。一方、自律・無人運航船の場合、実用化の対象は多種多様な船舶が混在するエリアである。また、船舶の時定数は自動車よりも大きいため、より遠くで対象物を検知する必要があり、操船者の意思決定において他船の行動予測が重要になる。そのため、COLREGs (The Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea) 等の航行規則は、操船者の予測等に基づいた判断を考慮するため主観的な表現が用いられている。船舶においても、操船タスクは自動車と同様に認知・判断・操作のサブタスクに分解することが可能でありサブタスク毎に要因を特定しシナリオを作成する本手法を適用することは妥当であると考えられるが、このような船舶の特性も考慮する必要がある。

2.2 テストプラットフォーム

評価を実行するテストプラットフォームは評価対象に適したものを選択する必要がある。テストプラットフォームとして仮想環境 (FTSS/SHS) 及び実環境があり、仮想環境のFTSSは高速で実行するため、大量のシナリオを短時間で処理することが可能であり、SHSは、実海域で再現するには複雑なシナリオや危険を伴うシナリオを再現し人間が関わる評価を実施することが可能である。また、実海域試験は、実システムの性能と高い関連性が要求されるシナリオの実行に適している。

図-2は、自動避航システムのシミュレーションによる安全性評価のイメージである。通常シナリオは、前述した3つの外乱の組み合わせにより作成されるシナリオであり、自動化システムが正常であることを前提としている。シナリオ数が多いため、高速で実行する必要がある。このシミュレーションの結果を基に、船舶の困難性を含む重要シナリオを作成する。さらに、ISO21448 (自動車の意図した機能の安全性に関する規格)、ISO26262 (自動車の電気/電子システムに関する

機能安全規格)を参考に機能安全や意図した機能安全等を考慮したシナリオを重要シナリオに追加する予定である。重要シナリオは、操船経験に基づく主観的な評価が必要なものや人間への操船の移譲を評価する必要があるため、フルミッション型操船シミュレータによる評価が実施される。

3. シミュレーションによる評価

3.1 評価用シナリオ

通常シナリオを構成する3種類の外乱について、認識外乱は自船や相手船の位置や速度を把握するセンサに起因し、交通外乱は航路や可航幅等の地理的条件、交通流及び相手船の挙動に起因し、船舶運動外乱は天候、海象、積載状況など船舶に作用する外力に起因している。自動化システムのうち、自動避航システムの安全性評価では、他船の速度や進路、見合い関係等の他船との関係がとくに重要であるため交通外乱を中心に通常シナリオを検討することとした。シナリオとして、基本機能を検証するための1対1遭遇と、輻輳する海域を想定した他船との多重遭遇が考えられる。1対1の遭遇では、センサの検知範囲を限定することで、シナリオ数が有限となり、相手船の配置、進路、船速を網羅的に設定したシナリオを作成する。多重遭遇の場合は、無限にシナリオを作成できるため、以下の観点でシナリオを作成する。

- 1) 実測された航跡データ等から遭遇頻度の高い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。
- 2) 避航操船関係の論文から、避航機能の評価に使用されるシナリオを収集⁴⁾。
- 3) 海難事故事例からシナリオを抽出。

1)のデータとしてAIS (Automatic Identification System : 船舶自動識別装置) の利用が考えられる。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⁶⁾、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データが得られる。ただし、AISは500GT未満の内航船には搭載義務がないため、漁船及びプレジャーボートも含めてAIS搭載船のデータからの推定やレーダデータの利用、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。

3.2 評価指標

自動避航機能の評価指標としては、試験中に得られた航跡・操船記録を用いて、DCPA (Distance to Closest Point of Approach)、TCPA (Time to Closest Point of Approach) 等の従来の衝突リスクなどの定量的評価や、近年提案されている法令の適合を評価する方法⁷⁸⁾、操船者による主観的評価及び主観的危険度を用いた評価⁹⁾、OZT (Obstacle Zone by Target) を用いた評価¹⁰⁾などを組み合わせることが考えられる。

自律・無人運航船がCOLREGs等の航行規則を遵守することは海難事故防止に重要なことであるが、現行のルールは人

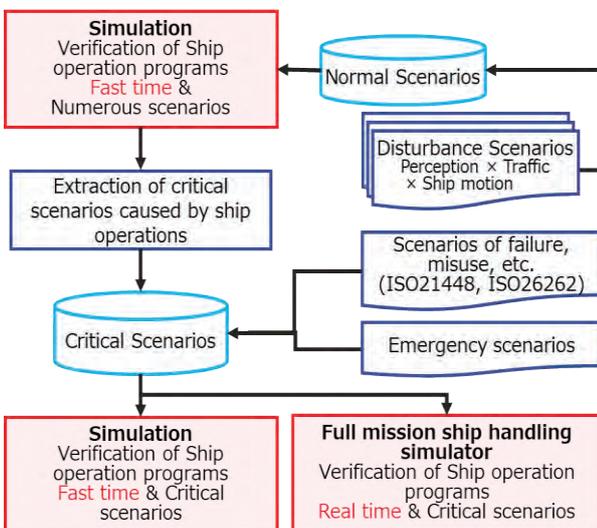


図-2 自動避航システムの安全性評価

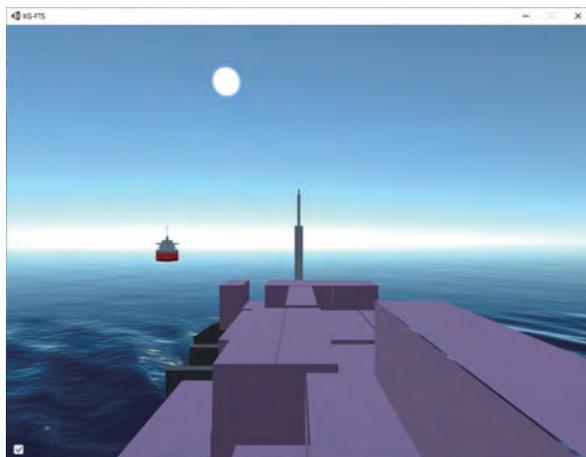
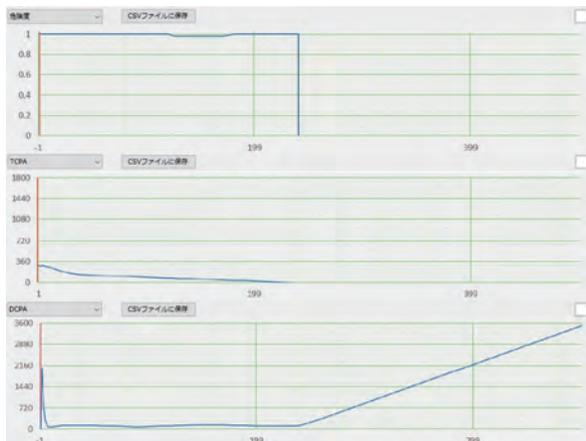


図-4 結果の可視化

(上：電子海図表示，中：指標の時系列，下：3D表示)

⑥ 操船システム等接続アダプタ

操船自動化システム等と FTSS を接続する機能を持つ。自動化システムは様々な実行形式や入力形式を持つ可能性があるため、このアダプタのインタフェースを公開し接続の利便性を図ることを検討している。

⑦ アクチュエータ指令値変換 FMU

操船自動化システムから受信した操船指示を、アクチュエータが入力として受け付けられる形式に変換し、その機械的応答をアクチュエータの現在値(回転速度、舵角など)として船体運動計算 FMU に出力する。

⑧ 船体運動計算 FMU

アクチュエータ指令値変換 FMU と自然環境計算モジュールで計算された操船状態量と自然環境状態量から、自船状態量の時間更新を計算する。主要目とアクチュエータ構成から操縦運動モデルの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の作成も検討している。

⑨ 可視化モジュール

シミュレーションから出力される可視化ログを、電子海図、3D 表示及び評価指標の表示より可視化し、実行結果をより詳細に分析する機能を提供する(図-4)。

2) SHS(操船シミュレータ)

自動化システムは、乗組員が判断及び操船を支援するレベルから、人の関与を必要としない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、自律・無人運航船の開発段階では、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、開発段階にかかわらず、人間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。SHS は、このような人間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での評価のためにも必要である。

図-5 にイメージ、Table 1 にその基本仕様案を示す。また、SHS に要求される機能は以下の通りである。

1) 船舶の自動運航

- ◆ 任意の自動操船プログラムの接続が可能
- ◆ 評価対象に対応した船体運動モデルの搭載

2) 遠隔監視・操船

- ◆ 通信システム
- ◆ 情報表示機能の再現
- ◆ 通信速度、データ欠落の再現など

3) 乗組員への運航の引継ぎ、HMI の評価

- ◆ 情報提供機能の再現
- ◆ 船舶運航切替装置と機能の再現
- ◆ 航法機器等の任意配置、外部機器との接続

4) 各種情報の取り込み

- ◆ 他船衝突回避機能搭載
- ◆ 各種センサ情報の作成
- ◆ 情報精度(ノイズ、欠落データ、更新間隔等)の再現
- ◆ エンジン、スラスト、舵取り装置の組み込み
- ◆ 緊急時イベント表現機能
- ◆ センサ、エンジン、電源等の故障の再現

5) テスト環境

- ◆ テストケース作成機能
- ◆ 船舶の運航結果や各種指標の解析結果の表示

現在の操船シミュレータにはない新しい機能も含まれており、その実装について検討をすすめている。

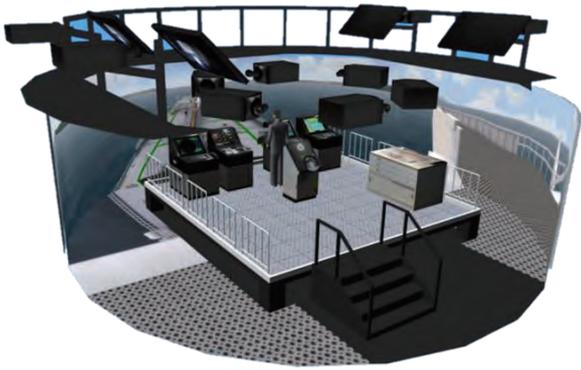


図-5 操船シミュレタイメージ (2021年3月作成)

表-1 SHSの基本仕様案

Visual system	Cylindrical screen $r=6.5m$, Field of view (H x V) 360deg. x 30deg. Screen for downward view
Bridge	Overhead Panel (Main engine RPM, Speed indicator, Rudder angle indicator, Wind direction/anemometer, clock, inclinometer, etc.) Radar x 2, ECDIS, Steering stand, Repeater compass, Navigation console, Chart table, Binoculars, etc.
Reproduction	Time changeover without steps (day, dusk, night) Ship's Lights and Shapes Characteristics of light of AtoN Weather (including restricted visibility due to fog) etc.

5. まとめ

当所で検討を進めている自律・無人運航船の安全性評価法及び評価に用いる総合シミュレーションシステムの概要について述べた。

自動運航船の安全性評価では、評価シナリオの十分性を確保することが重要であるため、自動車の自動運転システムと同様のシナリオベースアプローチを採用することとした。また、評価用シナリオの作成にあたっては、評価対象のシステムの運用範囲内での網羅性を確保するため、システムに影響を与える外乱を物理原則を考慮した認識外乱、交通外乱、船体運動外乱の3つの外乱に分類し体系化する外乱シナリオの作成手法を用いた。本手法により、物理原理を考慮することでシナリオ数を有限とすることが可能であると考えているが、それでも多数のシナリオを実行する必要があるため、高速シミュレーションが可能なFTSSを開発した。また、安全性評価ではシステムが正常である場合だけでなく、機器の故障や誤使用を含む緊急時のシナリオも考慮する必要があるため、緊急時の乗組員への操船権限の委譲や、人間が操船する船との共存など、人間が関与する行動を評価するためのSHSの開

発も行っている。自動車分野では、モデルベース開発の導入が進み、標準インタフェースを介してシステムが接続されシミュレーションが実行される環境が作られつつある。船舶分野においてもモデルベース開発の採用が進めばFTSSの活用はさらに広がると考えている。

自律・無人運航船の実用化には安全性評価が不可欠であり、これらの評価法は今後の自律型船舶の開発の指針となると考えている。当所では、安全性評価手法の確立や総合シミュレーションシステムの開発を進め、自律・無人運航船の開発を支援していきたい。

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。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きました。関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 海上保安庁：海上保安レポート 2021, <https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/books/report2021/html/top.html>, (2021)
- UN/WP29 : WP29-177-19e, Framework document on automated/autonomous vehicles, (2019)
- ISO/DIS 34502, Road vehicles-Scenario-based safety evaluation framework for Automated Driving Systems, (2021. 12)
- 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)
- 南真紀子, 丹羽康之, 庄司りり：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)
- 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)
- K. Woerner et al.: Quantifying protocol evaluation for autonomous collision avoidance, Autonomous Robots, Vol. 43 (2019. 4.)
- P.K.E. Minne: Automatic testing of maritime collision avoidance algorithms, <http://hdl.handle.net/11250/2452112> (2017.)
- 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)
- 西崎ちひろ, 榎野純, 庄司りり, 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)