

自動運航船および社会実装メカニズムのモデルベース設計手法に関する研究

Study on Model-Based Design Methodology of Autonomous Vessels and its Implementation Mechanisms

○学 中島 拓也^{*1}, 村山 英晶^{*1}
Takuya NAKASHIMA^{*1}, Hideaki MURAYAMA^{*1}

^{*1} 東京大学 The University of Tokyo

Autonomous vessels are expected to solve various issues in the maritime industry, such as seafarer shortages, maritime safety assurance, and enhancement of industrial competitiveness. Model Based Systems Engineering (MBSE) can be a practical approach for the concept design of complex systems like autonomous. However, when it comes to designing the concept, the future state of technological development, infrastructure, and legal systems should be considered. This study proposes the concept of a multi-layered technical and social system design simulator and describes a use case for requirement elicitation of an autonomous vessel. By coupling simulations of different layers (ship, its operating environment, and maritime industry), which have been designed separately in the past, we can evaluate effective industrial policies, navigation rules, and autonomous vessel design in an integrated manner.

Key Words : Model Based Systems Engineering (MBSE), Autonomous Ship, Sociotechnical Systems, Simulation

1. 緒 言

近年、海事産業では、脱炭素船や自動運航船の開発、また、このような複雑な船舶の設計・製造プロセスにおける生産性確保が目下の課題となっている。これらの課題解決の有効な手段として期待されるのが、モデルベース・システムズエンジニアリング (MBSE) とモデルベース開発 (MBD) である。特に MBSE は、社会の変化やステークホルダのニーズを的確にとらえ、対象システム全体を俯瞰してモデルとして表現することで、最適な設計・開発を実現する手法であり、複雑システムの設計への適用が進んでいる⁽¹⁾。

中でも、自動運航船は、海上安全や船員不足の解消、離島航路の維持、産業競争力強化に資するとして早期実装が期待されている。国内外で実証実験が行われ、国際海事機関 (IMO) でも自動運航船に関する法制度の議論が具体化する⁽²⁾など、普及に向けた技術開発、社会制度設計が進みつつある。国内では、日本財団が 2040 年までに内航船の 50% が無人運航船となることを目指し、継続して技術開発助成を実施している⁽³⁾。

自動運航船の開発にも MBSE のプロセスに従って開発することが船級協会ガイドライン等で提案されている⁽⁴⁾。一方、課題は残存する。MBSE のアプローチで肝となるのが、ユースケースの想定およびシステムに対する要求抽出であるが、取り巻く制度やインフラの変化が想定される中で、適切な要求定義を行うことが難しい。無人運航船の普及を通じて社会変革を起こすためには、自動運航システムの設計は、本来的にはそれを取り巻く法制度や産業構造の設計と一体的に進める必要があると考えられる。

2. 目 的

本研究では、上記に対するソリューションとして、異なるレイヤーのシミュレータ群を通じた自動運航船およびそれを取りまく技術・社会システムの設計手法を提案する (図 1)。

自動運航船そのものの上流設計のためのシミュレータ (Layer 3) に加え、船舶・ルールへの要求抽出を一体的に検討する航行シミュレータを構築する (Layer 2)。自動運航船の実装に向け大きな障壁となるのが安全性の担保とその論証であるが、国際海事機関 (IMO) が提唱するゴールベースの自動運航船に対応する法制度設計⁽²⁾のためには、多くの自動運航船が共存している実海域での状況を再現したうえでの検討が必要と考え、マルチエー

ジェントシミュレーションを用いた最適なルール設計のあり方について試行する。さらに、自動運航船の社会実装に向けた産業メカニズム設計シミュレータを構築する (Layer 1)。海事産業のメカニズムをシステムダイナミクスで模擬し、互いに相互作用を持つ政策立案者の補助金・規制、製造者の研究開発投資戦略、船主の採用基準など、自律型船舶導入に関わる重要なステークホルダの適切な意思決定の組合せを明らかにする。

これらの複数のレイヤー (船舶, 船舶群, 産業全体) のシミュレーションを連成させることで、社会実装に必要な産業政策, インフラやルール, および自動運航船そのものへの要求仕様を並行して検討することを提案し, その有効性を示すことを目的とする。

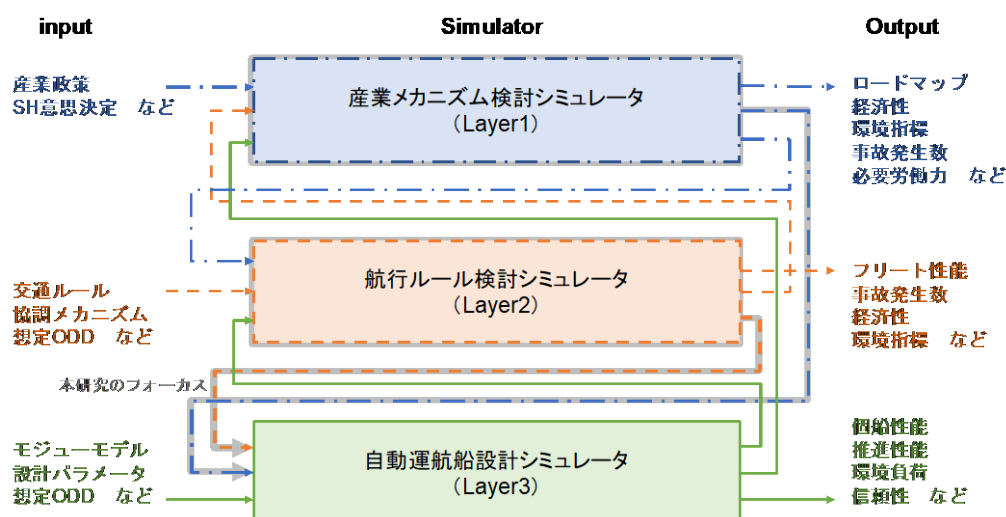


Fig. 1 Image of multi-layered sociotechnical system design simulator.

3. 手 法

本研究では、特に産業メカニズム検討 (Layer1) と航行ルール検討 (Layer2) のアウトプットである導入ロードマップや航行の安全性に加え、結果の自動運航船 (Layer3) の要件定義への活用イメージについて論ずる。

3・1 産業メカニズム検討シミュレーション

自動運航船の技術開発を行う製造者 (造船所, 船用機器メーカ, その他企業), それを購入し運航サービスを提供する船社, そして, 安全かつ安定した海上輸送の実現と産業の発展を支援する政策決定者 (国, 船級協会など) を想定し, これらの主体の意思決定の組み合わせが, 自動運航船の実現に対してどのような影響を及ぼすのかを検討するためのシミュレータを構築した⁶⁾。R&D 活動による自動運航技術の成熟度向上に伴う船舶の利用価値および安全性の向上, また, 自動運航船の建造・運航の経験値が蓄積することによる建造コストの低減や安全性の向上, さらなる技術成熟度 (Technology Readiness Level: TRL) の向上を表現した産業モデルを構築している。

各ステークホルダの意思決定として, 政策決定者の補助金の分配 (R&D, プロトタイプング, 採用時補填), 自動運航に関する規制緩和の有無, 各自動化技術 (離着岸, 航行, 船舶状態監視) への投資戦略, 新造船採用時の船主の意思決定パラメータの 4 つを設定した。

本シミュレーションより, 早期普及を実現する戦略を探索するとともに, その自動化が進展するプロセスを時系列的に可視化し, 必要となる自動化機能とその時期を洗い出す。

3・2 航行ルール検討シミュレーション

船舶および航行区域に対する安全要求を一体的に検討するため, 実海域での状況を再現したマルチエージェントシミュレータを構築した⁶⁾。本研究では, 自動運航の主要機能である自船情報把握 (Localization), 他船情報把握 (Situation Awareness), 制御 (Control) のそれぞれについて, 正規分布の標準偏差として不確実性パラメータを

定義し、実際の位置や姿勢からの認知や行動の結果のずれを表現した。モンテカルロシミュレーションを通じて、それぞれの機能に必要な精度を簡易的に検討した。

なお、シミュレータの時間間隔は 1[s]、時間積分は 4 次ルンゲ・クッタ法、各船の運動は野本モデル (K: 0.1(s), T: 50 (1/s))⁽⁷⁾、自動運航アルゴリズムは、操船者の意思決定における好ましさをルールベースでモデル化したモデル⁽⁸⁾を用いている。シナリオは今津⁽⁹⁾の提案するものを用いた。また、評価に関しては航行の危険度評価で用いられる CJ (Collision Judgement) 値⁽¹⁰⁾を用いた。

4. 結果・考察

4.1 産業メカニズム検討シミュレーション

様々なステークホルダの意思決定オプションの組合せを評価したところ、自動運航船の早期導入には、「規制緩和」「プロトタイピングへの補助金」「安全性を重視した船舶の採用」の組み合わせが必要であることがわかった。また、個別の意思決定の組み合わせで、導入促進効果に大きく違いが生じるなどの創発的な現象が見られた⁽⁶⁾。

図 2 に、最も導入が促進されるシナリオにおける船隊構成ロードマップ、および必要な船員構成の推移を示す。採用が想定される自動運航船の種類として、まずは離着棧 (Berthing) の自動化、航行 (Navigation) の半自動化船が 2027 年ごろから導入されることがわかった。このように、早期導入という上位の目標に対し、求められる技術要素を把握することができた。あわせて、自動運航に必要な船員数の具体的な推移を確認することができることから、中長期的、かつ定量的に人材確保・育成戦略を練る材料とすることが期待される。

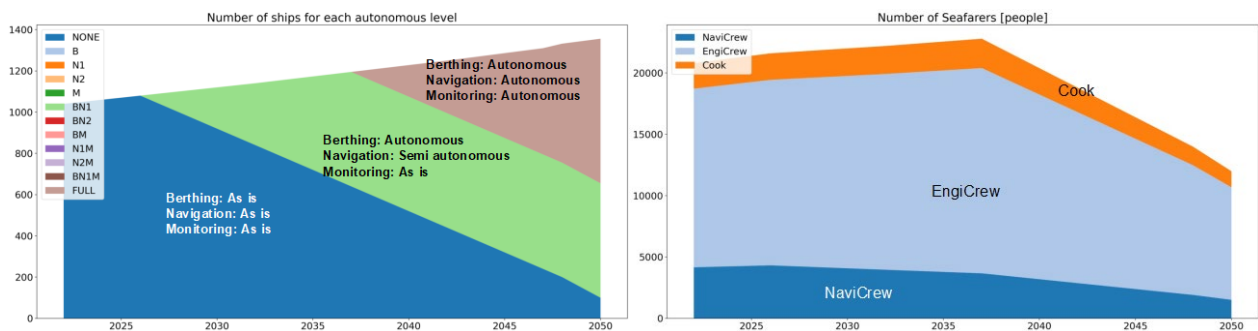


Fig. 2 Roadmaps of autonomous ship fleet transition (left) and expected number of seafarers (right).

4.2 航行ルール検討シミュレーション

図 3 に、結果の一例として、今津シナリオ 18, 19 で不確実性パラメータの組み合わせを比較したケースおよびその結果を示す。不確実性パラメータの組合せに対し、それぞれのケースで 100 回のシミュレーションを回し、航行を通じた CJ 値の最小値が小さい (衝突の危険が高い) シナリオが生じるか確認した。今後、実際の船舶運航データなどを用いた網羅的なシナリオでの検討を通じ、自動運航船のそれぞれの機能への性能要求の抽出に生かす可能性を検討する想定である。あわせて、ここに専用航路の設置、衛星 VDES (VHF Data Exchange System) などの新たな通信インフラの整備、新たな航行ルールの設定などを模擬し、船舶への要件がどのように変化するかを検討することが可能になると思われる。

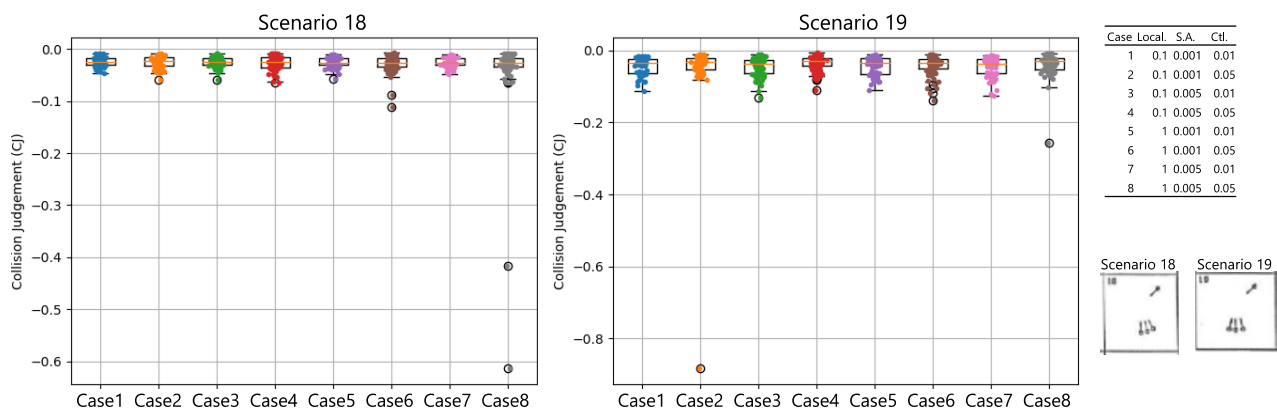


Fig. 3 Monte Carlo simulation results of two navigation scenario with different parameters for localization, situation awareness and control.

5. 結 語

本研究では、自動運航船実現のためのマルチレイヤーの連成シミュレーションの必要性について提案した。その一つの活用方法として、自動運航船のコンセプト設計段階のための要件を、異なるレイヤーのシミュレーションから抽出する事例を示した。

一方、実際の設計や意思決定に活用してもらうには、多くの改良事項があると考えられる。産業シミュレータに関しては、企業の特徴を踏まえたエージェントシミュレーション、ゲーム理論を用いた意思決定モデルの構築などを検討したい。また、航行シミュレータを用いて性能要求を具体化するには、現実的なシナリオの網羅のみならず、海象気象の認知・判断・制御への影響などの組み込み、船舶の種類等による運動性能の精査など、より現実環境に即する形での改良が必要であると考えられる。共通して、シナリオや各種パラメータの不確実性の扱いについてアプローチする必要がある。

今後、上記の異なるレイヤーのシミュレーションを連成させることによるケーススタディを多く提示し、マルチレイヤーシミュレーションの活用意義を提示したい。例えば、新たなインフラの導入などによる自動運航船の安全性について評価を行い、それを踏まえた導入ロードマップの策定とそれに必要な産業戦略の検討、また船舶システムへの要求仕様などを一体的に検討し、そのメリットを示すことを想定している。あわせて、これらのシミュレーション結果を今後検証・改善していくための方法および必要なデータについて検討したい。

文 献

- (1) INCOSE, Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, 2015.
- (2) IMO, <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx>, Accessed Nov 2022.
- (3) 日本財団, <https://www.nippon-foundation.or.jp/what/projects/meguri2040>, Accessed Nov 2022.
- (4) American Bureau of Shipping, Guide for Autonomous and Remote Control Functions, 2021.
- (5) Nakashima T, Sugimoto T, Kimura K et al., 13th Complex Systems Design & Management (CSD&M) conference, 2022.
- (6) 頼凜太郎, 中島拓也, 木見田康治他: サービス学会第 10 回国内大会, 2022.
- (7) 野本謙作, 田口賢士: 造船協会論文集, 101, 1957.
- (8) Nakamura S and Okada N. TransNav 13(1):133-141, 2019.
- (9) 今津隼馬: 避航法に関する研究. PhD thesis, The University of Tokyo, 1987.
- (10) 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, 日本航海学会論文集, 56, 1976.