

自動運航船および実装メカニズムの多層的モデルベース設計手法の提案

Multi-Layered Model-Based Design Methodology of Autonomous Vessels and Implementation Mechanisms

○中島拓也（東京大学大学院）*1 村山英晶（東京大学大学院）*2 青山和浩（東京大学大学院）*3

*1 Takuya Nakashima, 5-1-5 Kashiwanoha, 277-8568, nakashima@s.otpe.k.u-tokyo.ac.jp

*2 Hideaki Murayama, 5-1-5 Kashiwanoha, 277-8568, murayama@edu.k.u-tokyo.ac.jp

*3 Kazuhiro Aoyama, 7-3-1 Hongo, 113-8656, aoyama@race.t.u-tokyo.ac.jp

キーワード: 自動運航船, MBSE, 社会技術システム, システムオブシステムズ (SoS)

1. 緒言

自動運航船は、ヒューマンエラーが約 8 割を占める海上事故の減少、船員不足の解消と離島航路の維持、産業競争力の強化など、産業や社会における様々な問題を解決するものとして期待されている。

このような新しいコンセプトの船舶を実装するためには、船舶のみならずそれを取り巻くインフラ、規制、ビジネス環境なども考慮した設計が必要である。つまり、自動運航船が導入された社会をシステムオブシステムズ (System of Systems: SoS) としてとらえることが必要である。

モデルベースシステムズエンジニアリング (MBSE) は、複雑なシステムの実現を、対象のモデル化を通じて支援する手法であり、自動運航船の概念設計・開発にも有効である。しかし、システムオブシステムズの構成要素としての自動運航船の要件定義手法について議論されている文献は見当たらない。

そこで本研究では、自動運航船の実現のための多層的な技術的・社会的システム設計シミュレータを提案するとともに、活用イメージを紹介する。自動運航船の導入過程を模擬する産業メカニズムシミュレータにより、政策立案者や製造者、船主など、導入に関わるステークホルダの適切な意思決定の組合せを探るとともに、自動運航船の導入ロードマップや、目標達成に必要な船舶システムへの要求を抽出する。その後、自動運航船の航行シミュレータにより、船舶システムの要求を達成するための各種搭載サブシステムに対する性能要求を抽出する。

本アプローチを用いることで、これまで個別に検討されてきた異なるレイヤの設計オプションを統合的に議論、評価することが可能となる。

2. 背景

2.1. 自動運航船

2.1.1. 開発状況 自動運航船の社会実装に向けた実証実験、研究開発が世界各国で進んでいる。国内でも、船舶の自動化については 1960 年代から機関室業務の自動化を中心に検討されてきた⁽¹⁾。2010 年代に入り、欧州において

Rolls Royce が主導する MUNIN、DNV GL の ReVolt 等のプロジェクトが組成し、研究開発が進んできた。日本でも 2010 年代後半から国土交通省海事生産性革命 (i-shipping) プロジェクト等で研究開発が本格化し、2022 年、日本財団が主導する無人運航船プロジェクト MEGURI2040 において、内航船の無人運航を世界に先駆けて成功させた⁽²⁾。「2040 年には国内を走る船の 50% が無人運航船となる」ことを目指し、2023 年 7 月には社会実装に向けた第二弾の始動が発表されている⁽³⁾。

2.1.2. 自動運航船の特徴 自動運航船の特徴について自動運転車との違いを踏まえて述べる。自動車の場合は 1 人の運転手の運転タスク (Dynamic Driving Task: DDT) を自律化の対象とするが、船舶は、見張り、操船、機関保守、離着岸等を複数の人間が分担して担当しており、自律化の対象タスクその度合いが多様である。あわせて、長期間海上での勤務を前提としていることから、業務実施場所を陸上に移す遠隔化による業務遂行のメリットと合わせて検討されることが多い。上記のことから、自動運転は明確に SAE J3016⁽²⁸⁾の自律化レベルが定義される一方、自動運転は複数の異なる定義が提唱されている状況である⁽²³⁾⁽²⁴⁾。

さらに、大型船の場合は特に急停止、急旋回が困難なうえ、波や潮流によりその性能が大きく変化する。また、長期間海上での運航がなされ、頻繁な保守・交換などが難しいことから、一部機器の故障や不具合がある中での運航も想定される。また、自動車は道路や信号等、移動可能範囲および制約が多い一方、海上ではその自由度が高い。航行ルールを定めた海上衝突予防法 (COLREGs) にも遭遇するすべての場合が記載されているわけではなく、時と場合に応じた臨機応変な対応が必要である。

このような制約の中、完全な自動運航、無人運航のハードルが高い。タスクや遭遇状況に合わせて、人と機械との役割分担を設計していく必要がある。

2.2. モデルベースアプローチ

自動運航船を効果的に設計するうえでは、設計対象をシステムとしてとらえるシステムズアプローチ、およびその

機能や振る舞いを抽象化して表現するモデルベースアプローチが有効である⁽¹⁾。以下に主な手法と適用するうえでの課題を整理する。

2.2.1. MBSE (モデルベース・システムズエンジニアリング) Systems Engineering (SE) とは、システムを実現するための学際的かつ統合的なアプローチおよび手段 (INCOSE⁽⁴⁾) であり、システムを仕様化、設計、統合、評価、検証するプロセスを体系化したものである。航空宇宙等、領域をまたぐ大規模かつ複雑なシステムを扱う組織やプロジェクトで活用されてきた。SE では、そのアプローチを体系的に表現した V モデルがよく参照される (Fig.1)。システム設計フェーズでは、運用概念 (Concept of Operation: ConOps) を明確に記載するとともに、システムの概要を示すことからシステムレベルの要求抽出、アーキテクティングが開始される。

中でも、Model Based Systems Engineering (MBSE) は、統一された「記述モデル」(SysML, OPM 等) によりシステムに対する要求、振る舞い、アーキテクチャ (構造) を表現することで、SE における表現の曖昧さを排除したものである⁽⁵⁾。

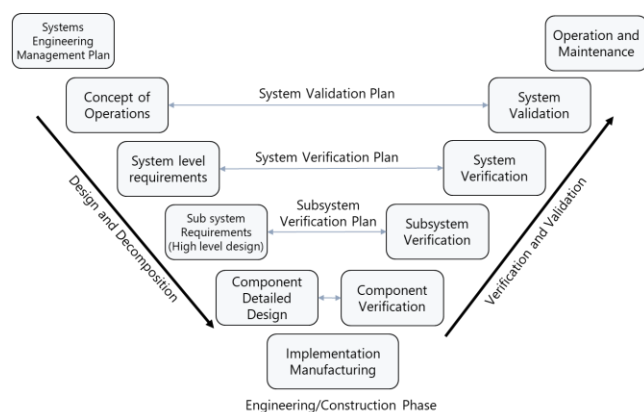


Fig.1 Systems Engineering Vee Model (Allouis et al. ⁽⁶⁾等をもとに著者作成)

2.2.2. MBD (モデルベース開発) Model Based Development (MBD) は、製品・要素の機能を数値モデルで表現し、シミュレーションを行いながら開発を進める手法である。実機を構築する前 (V モデルの左側) にてシミュレーションを通じて検証を実施することで、開発の手戻りを少なくすること (フロント・ローディング⁽⁷⁾) を目的とする。航空業界および自動車業界で導入が進んでおり、モデルの標準化等の動きも進んでいる⁽⁸⁾。実現したい機能およびその「数値モデル」が確立されている前提で成り立つものである。

2.3. 自動運航船の MBSE, MBD 導入における課題

自動運航船の開発において MBSE, MBD を採用するうえでは様々な課題があるが、特に ConOps (運用コンセプト) 設計、および要求抽出・分解に大きな壁があると考える。

2.3.1. 運用コンセプト 前述の通り、一口に自動運航船といっても対象となる船舶の種類や海域、自律化されるタ

スクおよび自律化レベル、遠隔化の有無等様々な形態がある。Negenborn et al. ⁽⁹⁾も、これらを認識する重要性およびユースケースを想定ことの必要性を提起している。導入目標等は示されている例があるものの、その社会実装に至る具体的な道筋について示している事例は見当たらない。また、国際海事機関 (IMO) において、自動運航船に関する国際規制にて議論が開始されており、2028 年より発行する強制 Code のあり方が議論されている⁽¹⁰⁾ほか、衛星 VDES 等海上通信インフラの進展に向けた動きが進んでいる⁽¹¹⁾など、取り巻く法制度、インフラ、その他ビジネス環境も変化し続けることが想定される。通常 20 年以上使われる船舶システムを設計するうえでは、これらの外部環境の変化を考慮したコンセプト設計が望まれる。

2.3.2. 要求抽出と分解 究極的に目指すべきは、自動運航船が導入されることで社会的便益を生むことであり、それを達成するための自動運航船の望ましい特性を可視化することが必要である。その自動運航船の特性も、運用環境にも左右されるほか、構成要素間の相互作用にも依存する。例えば、計画策定を担うサブシステムの精度が高かったとしても、そのための状況把握の精度が十分でなければシステムとしての自律化は達成できない。システムの特性和構成要素の特性との関係性を可視化することも必要である。

現状では、目的から要求を抽出し、振る舞いやアーキテクチャを記述する際は「記述モデル」を用いた MBSE、その振る舞いやアーキテクチャが要求を満たすかシミュレーションで検証する際は「数値モデル」を用いた MBD が用いられている。ただ、システム構築の目的を整理し、そこからシステム要求を抽出する際、またサブシステムレベルの要求を分解する際にも、「数値モデル」を用いたシミュレーションが有効と考える。

3. 目 的

自動運航船の MBSE および MBD を進める上では、特に、システムズ・エンジニアリングの最上段である ConOps の作成、およびシステム・サブシステムレベルでの要件定義が重要な要素である一方、社会実装を踏まえた具体的な構築方法については体系化されていない。

そこで、本研究では、自動運航船の社会実装の実現を踏まえた初期設計プロセス、具体的には ConOps の設計、および船舶システムに対する要件定義を効果的に行うための、モデルベースアプローチ手法について提案する。社会技術システムを構成するステークホルダ、およびシステム開発におけるステークホルダ間の合意形成の支援を目指す。また、内航貨物船の見張り・操船タスクの自律化を題材に、本手法を適用したケーススタディを実施する。

4. 手 法

自動運航船の社会実装のために、船舶コンセプトや関連ルール、政策を統合的に議論するためのマルチレイヤのモデルベース設計手法を提案する。ここでは、国内の内航貨物船における自動運航船の導入、を例に概説する。手法の全体像を Fig.2 に示す。

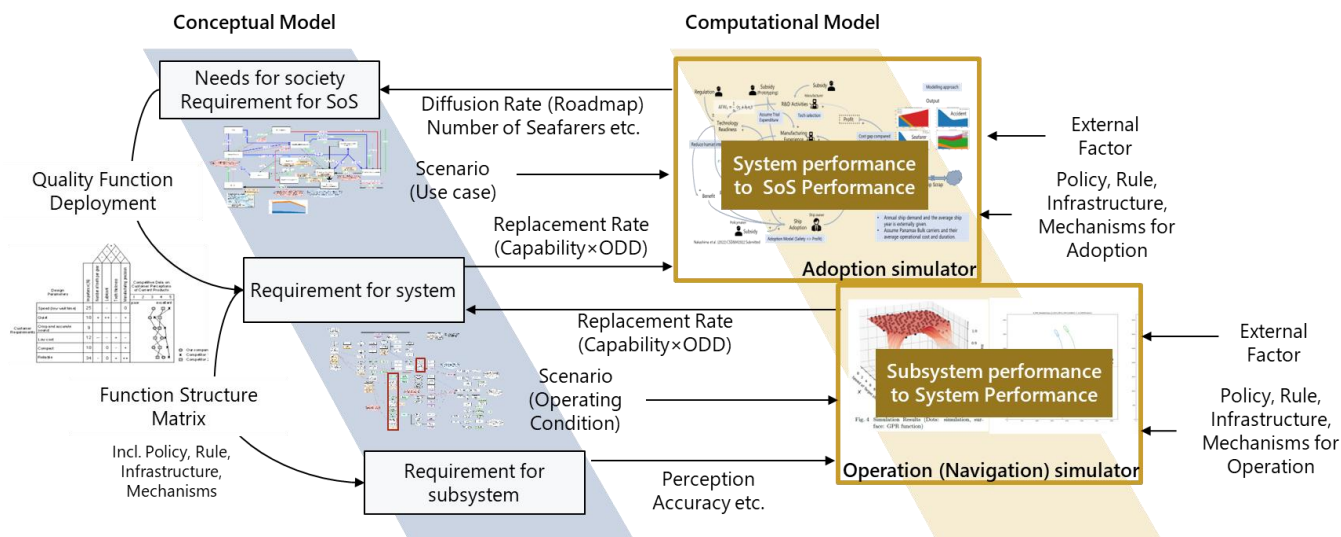


Fig.2 Schematic Image of the Methodology

4.1. 記述モデルを用いた問題の構造化

まずは、記述モデルを通じて自動運航船を取り巻く社会システム、および自動運航システムそのものを構造化し、異なるレイヤの要求の関係性を具体化する。

4.1.1. System of Systems のモデル記述 自動運航船が社会・産業にもたらす価値を整理するため、まずは Stakeholder Value Network を用いて、自動運航船が関与するステークホルダと価値の流れを可視化した。また、自動運航のメリットとして、Kim et al.⁽¹²⁾は安全性（事故削減）、セキュリティ（人質リスク解消）、環境（燃料削減）、経済性（貨物量増加）、人的要素（陸上勤務の実現）、その他社会影響（船員不足解消）等を挙げている。これを踏まえ、自動運航船が影響を与えうる価値（矢印）に属性を付記する形で整理した。

4.1.2. 自動運航船のモデル記述 自動運航船の機能とその構成を、Dori によって提唱されたシステム記述方法である OPM (Object Process Methodology)⁽¹³⁾を用いて記述し、機能・振る舞いと構成を明確化した。また、自動運航船のもたらす価値について、機能の属性として合わせて整理した。

4.1.3 SoS およびシステム特性の構造化 上記を踏まえ、SoS および自動運航船に求められる特性について整理し、その関係性について品質機能展開⁽¹⁴⁾を用いて整理した。産業の要求品質、船としての品質特性、機能別サブシステムとしての特性、の3段階に分けてその関係性を整理した。

4.2. 数値計算モデルを用いた定量化

記述モデルを用いた整理により、顧客のニーズとシステム、サブシステム特性の関係性を可視化できるものの、具体的な顧客ニーズを達成するうえで求められる定量的な要求についてアプローチすることは難しい。そこで、記述モデルを参考にしながら、異なる時間スケールでの数値シミュレーションを実施する。

4.2.1. 産業メカニズムモデル 自動運航船の導入率を見積もるための産業メカニズムモデルについては、Nakashima et al.⁽¹⁵⁾を用いた。ストック・フロー図で表現されたモデルの概要を Fig.3 に示す。船隊ストックに船の新規建造および解撤によるフローを考え、新造船の導入は船主の採用モデルに従って導入される。あわせて、必要に応じて船主がレトロフィットを判断するプロセスを追加している。Nakashima et al.では、搭載される自律化技術は離着桟 (Berthing)、航行 (Navigation)、船体・機関監視 (Monitoring) の3つのタスクに分けて考えている。ここで、航行に関しては、開発プロジェクトの状況を考慮して、半自律化 (Semi-autonomous) のオプションを設けている。各自律化技術の R&D 活動、および技術の運用による経験値が蓄積することで、技術成熟度 (Technology Readiness Level: TRL)⁽¹⁶⁾が向上することにより、その技術を採用している船の自律化による利用価値及び安全性が向上する。そこに、新たな技術を用いて船を建造することによる経験値によるコスト低減等のファクターも加えている。ここに、外部の補助金や補助事業、規制を導入することを想定する。

ここで、各自律化技術の TRL はタスクの代替度合と想定し、TRL6 以下は 0%、TRL7 は 25%、TRL8 は 50%、TRL9 は 100%として設定している。また、TRL は研究開発投資及び運用経験によって増加する関数として表現している。

対象は内航海運全体、船のサイズは代表的な 499G/T に代表させ、2022 年から 2050 年までの計算を行った。5 名乗員⁽¹⁷⁾とし、内航船の全隻数 (5,213 隻 (令和 5 年)⁽¹⁸⁾) に掛け合わせることで大方の船員数⁽¹⁷⁾を再現する。自動運航船の導入ロードマップ (各年の自動運航技術・レベル別の導入割合)に加え、船員数、想定事故発生数、および各自律化技術の TRL の推移が出力される。

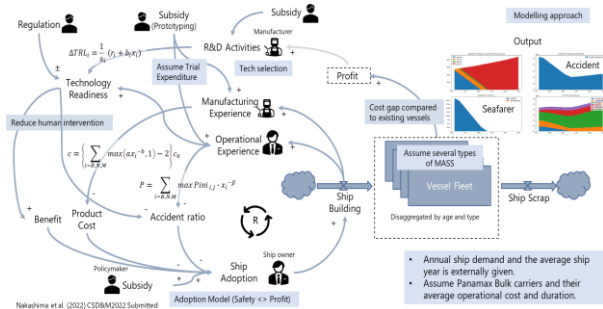


Fig.3 Image of Industry Mechanism Model⁽¹⁾

4.2.2. 自動運航船ポテンシャル評価モデル 上記を通じて、必要な自動運航船の自律化タスクごとの要求に関する時系列目標が提示される。これを踏まえて、本研究では、航行 (Navigation) について、その達成可能性を評価するため、航行シミュレーションを用いて評価する事例を提案する。自律航行システムは、各機器レベルではなく、航行サブシステムを構成する認知 (自船状況、目的地、他船の把握等)、判断 (避航計画策定)、操作 (避航計画に合わせた舵角や出力の調整) の3つのサブシステムで構成されると仮定する。簡易的に、自船・他船認知誤差をガウス分布で仮定し、それぞれの標準偏差を設定する形で、センサの位置推定機能の精度を表現した。また、計画策定サブシステムについては、Nakamura and Okada⁽¹⁷⁾の避航モデルを用いた。各船の運動は野本のモデル⁽¹⁸⁾を用いて表現している。制御の不確実性については、運動モデルの係数の実値をガウス分布に従って毎ステップ変化させることで表現した。なお、シミュレータの時間間隔は1秒、時間積分は4次ルンゲ・クッタ法を用いる。水深や陸地などの地理的環境や、海象・気象条件については考慮していない。概要を Fig.4 に示す。

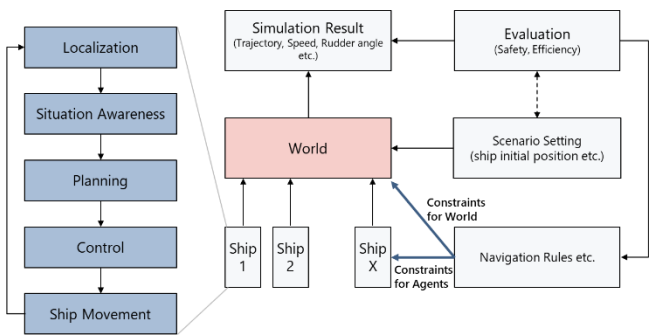


Fig.4 Image of Ship navigation Model⁽¹⁹⁾

なお、想定する航行シナリオは、本来的にはすべての考えられる航行環境、すなわち自動運航船の運航時の遭遇状況をカバーする形で、自動運航システムの運航設計領域 (Operational Design Domain: ODD)⁽²⁰⁾が設定されるのが望ましい (遭遇状況においては、ISO34503⁽²⁰⁾においては Target Operational Domain: TOD と表現される)。

ただし、そのすべての状況を網羅するにはシミュレーションとはいえ膨大な計算が必要である⁽²¹⁾ことから、検証のための効率的なシナリオ抽出方法が望まれる。シナリオ抽出方法については現在自動運転の分野などにおいて多くの研究がなされているが⁽²²⁾、本研究では議論しない。

4.2.3. 自動運航システムの性能の解釈 ここで、自動運航システムに求められる性能については、自律化タスクごとに、自律化度合と、ODD の TOD カバー率によって、そのタスクの負荷軽減度合いが設定されると考える。なお、ODD/TOD は単純な指標化が難しく、ODD 該当項目ごとの発生確率の分布、およびその相関関係も含めて算出されるが、本論文では考え方の提案のみにとどめる。

自律化度合 (レベル) については、ロイド船級協会⁽²³⁾や自動運航船に関するコンソーシアム One Sea⁽²⁴⁾等が提案をしているが、今回は人のタスクの代替度合いと考える。

また、日本海事協会⁽²⁵⁾は、「目標指向型で自動運航船の具体的な安全要件を検討する際には、システムの自律レベル、自動運航船の運航可能領域、オーバーライドの方法、の3つの視点から総合的に検討することが重要」としている。人の関与とオーバーライドも含めて自律化度合とし、自律化タスクを軸に取る形で整理すると、この体積そのものがタスクのカバレッジ、すなわち自動運航システムの性能として定義されうる。イメージを Fig. 5 に示す。

今回の産業メカニズムモデル用いた TRL についても基本的にはこの解釈であり、例えば TRL7 の場合は 25% の負荷軽減が実現された状態、となる (技術的には実現されるが、導入是非は規制やコスト等他要因に委ねられる)。

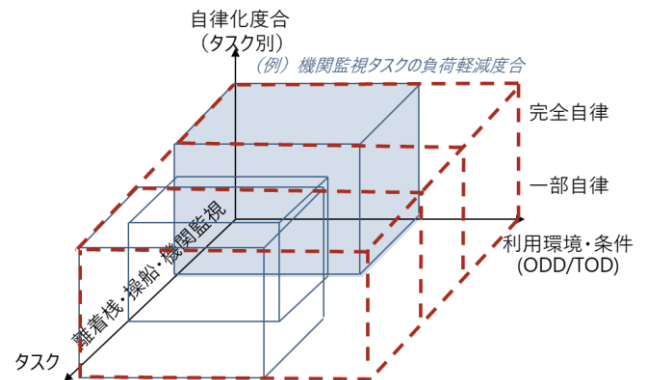


Fig.5 Performance evaluation model of autonomous ship

5. ケーススタディ

5.1. 産業メカニズムを用いた社会実装シナリオの作成

日本財団の目標である、「2040年時における無人船50%」の達成を、内航貨物船全体で達成することを目標とした際に、どのような社会実装シナリオがありうるかを検証した。

「2040年の完全自律船の普及率50%」を達成したあるケースの船体構成の遷移を Fig.6 に示す。離着棧自律化・航行半自律化船が2027年から導入され始め、2035年に完全自動運航船が導入される。2040年にはレトロフィットも加速し内航船の「完全自動運航船」50%を達成する。Fig.7 に、当該シナリオにおいて想定される船員数の推移を示す。ここで、内航船の船員数は2040年にはおよそ半減するものの、追加的に遠隔オペレータが6000人強配置される結果となっている。また、Fig.8 に各技術のTRLの伸びを示す。離着棧、航行、船体・機関監視の自律化技術の成熟度が、2030年、2034年、2038年にTRL9に到達することが想定

されている。

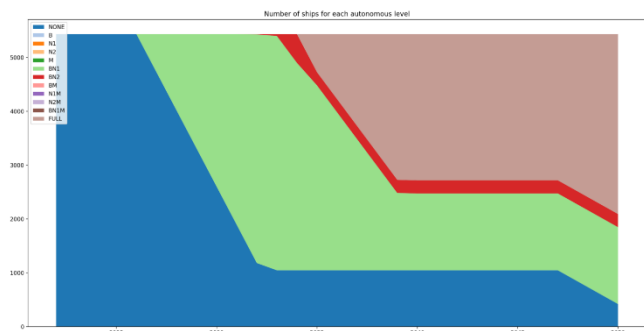


Fig.6 Timeline for estimated fleet composed by autonomous ship type

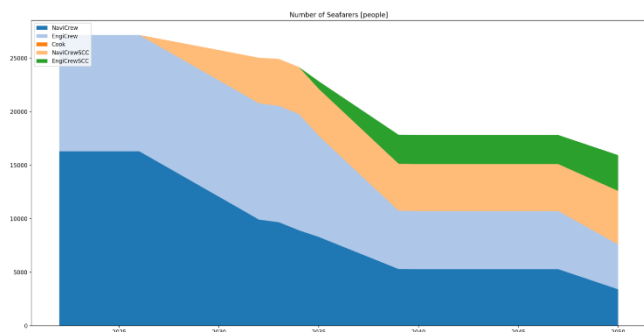


Fig.7 Timeline for estimated number of seafarers

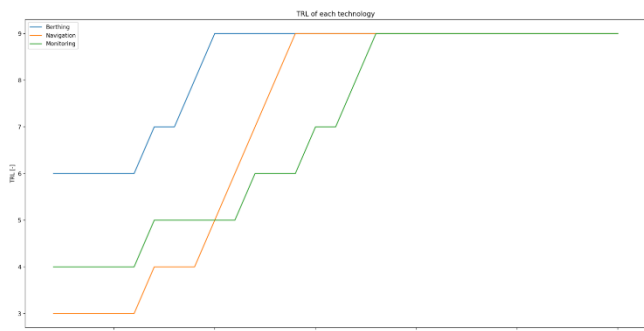


Fig.8 Timeline for estimated TRL for each technology

5.2. 航行シミュレーションを用いた性能要求

上記により、抽出された目標達成シナリオを踏まえた際の自動運航技術開発の目安が抽出された。この航行(Navigation)部分の目標を達成するためのサブシステムの要求性能を測るべく、航行シミュレーションを用いて算出する。今回の目標設定シナリオにおいては、2034年に100%のタスク代替を達成することが期待されている。

今回、航行シミュレーションについては、自船位置把握の精度は十分に担保できるとし、サブシステムの性能要求として、操船時の他船認知および制御の精度に絞って評価を行った。計画策定サブシステムは前述の Nakamura and Okada の避航アルゴリズムを用いると仮定した。

想定される運航領域 (TOD) について、今回は、簡易的に、平水中、かつ1対1の避航に特化したシナリオのみを抽出した。具体的には、他船の速力および相対角のみをシナリオパラメータとして設定した。

評価メトリクスとしては他船からの距離が 50 m 未満になる危険事象の発生確率とした。Sobol' 列を用いたサンプリングで準モンテカルロシミュレーションを行い、ガウス過程回帰を用いて応答関数を作成することで面的かつ確率的な評価を行った。

結果の一例として、他船認知の不確実性を 0.002, Control の不確実性を 0.1 と設定した結果を Fig.9 に示す。クライテリアを満たした面積は約 98%であったが、この値そのものが ODD/TOD となるわけではなく、発生状況の分布状況や実際の運用を踏まえて、より実用的な値が設定されることが想定される。

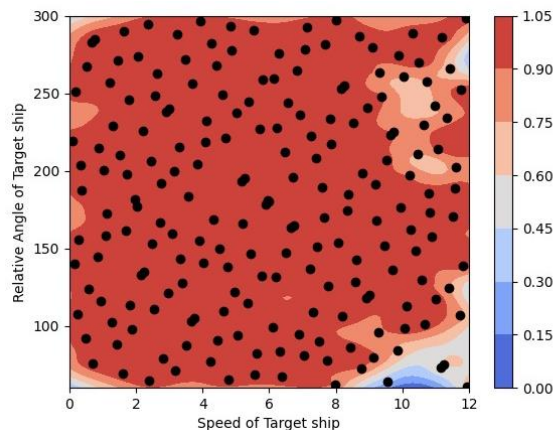


Fig.9 Sample results for navigation simulation

これを踏まえて、想定されるサブシステムの構成やサブシステム特性 (認知・制御精度や計画策定アルゴリズムそのもの) を変化させながら、目標達成シナリオに合わせた性能要求が具体化される。

その後、同様に、サブシステム要求を達成するために、認知側のレーダやカメラ、制御側の舵、プロペラ等の構成機器の相互作用を踏まえつつ、目標を達成しうる可能性を評価する必要がある。材料力学の分野で材料選定の手法として活用されている Ashby 法⁽²⁶⁾では、材料・プロセスを設計の重要な要素と考え、最初に材料・プロセスを決めるのではなく、要件を定めて設計というプロセスを通して柔軟かつ合理的に材料・プロセスを決定していく。自動運航システムにおいても、様々な搭載機器・技術が開発される中、サブシステムの要求を明確化したうえで設計を進めることが有効である可能性がある。

6. 考 察

本研究では、自動運航船の実現のための多層的な技術的・社会的システム設計シミュレータを提案した。以下に、提案した手法のユースケースと限界について述べる。

6.1. 本手法のユースケース

本手法のユースケースとして、段階的なワークショップを通じ合意形成を支援することが考えられる。まず、自動運航船の実装に関連するステークホルダ (行政や保険会社等を含む) で社会実装シナリオシミュレーションを実施し、有望な社会実装シナリオを(場合によって複数)選択する。

その後、開発者（造船所、船用機器メーカー等）で各サブシステムの性能目標幅やオプションを提示、サブシステムの性能目標についてシナリオ別に評価を行うことで、ConOpsおよび要求を具体化する。

また、通常、産業政策とシステムの導入現場に関する政策については、異なる行政組織・部署が所管している場合が多い。例えば、新たな通信インフラ導入等の運航支援施策の効果について、産業支援施策の観点での一体的な評価が可能となる。具体的には、導入により X%増加することができたことは、自動運航船の導入に関しては Y 年分、Z 円規模の施策となる、といった議論がなされることが想定される。これまで個別に検討されてきた異なるレイヤの設計問題を統合的に議論、評価することが可能となる。

6.2. 研究の限界

本研究では、シナリオモデルを抽出した産業モデルにおいて、船隊構成をある船型に代表させて計算する等、様々な仮定を置いている。前述のワークショップ等を通じ、意見を踏まえながら、合意形成を図ることが望ましい。作成したシナリオモデルについては、実際のステークホルダによる評価を通じて実施してもらうのが望ましい。

社会実装のあり方についても、内航船の船員の代替のみに絞って記述しており、活用ユースケースの拡大等は踏まえていない。ユースケースを拡張することで、SoS としての社会実装のあり方も変化しうるほか、望まれる技術要求も変化することが想定される。

また、安全性の検証のための網羅的かつ効果的なシナリオの抽出は、非常に大きな課題であり、自動車の自動運転でも盛んに議論されている (ISO34502⁽²⁷⁾) など。本研究においては平水中、かつ避航に特化したシナリオのみを抽出しているが、本来、想定されうるすべて航行パターンにおけるシナリオについて、網羅性を踏まえた評価がなされることが望ましい。

7. 結 言

本研究では、自動運航船の実現のための多層的な技術的・社会的システム設計シミュレータを提案するとともに、活用ユースケースを紹介した。本アプローチを用いることで、自動運航船の導入ロードマップや、目標達成に必要な船舶システムの ConOps および要件定義を支援する。

本アプローチは、自動運航船のみならず、社会実装を通じた業界変革を期待される社会技術システム (Sociotechnical System: STS) にも応用可能な枠組みと考える。システムバウンダリの外にある社会と、開発システムの相互作用を認識した上でシステム設計を行うためのアプローチとして、システム設計における認識共有、場合によっては合意形成に有効であると考えられる。

文 献

- (1) 平井忠, 自動化船の推移と動向, 日本船用機関学会誌, Vol.23, No.8, 1988.
- (2) 日本財団: 日本財団ジャーナル: <https://www.nippon-foundation.or.jp/journal/2022/71652> (参照日 2023 年 9 月 3 日)
- (3) 日本財団: 無人運航船の実現に向けたセミナーを開催: <https://www.nippon-foundation.or.jp/who/news/information/2023/20230720-92554.html> (参照日 2023 年 9 月 3 日)
- (4) INCOSE: INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, 2015
- (5) Shevchenko, N.: An Introduction to Model-Based Systems Engineering(MBSE): <https://insights.sei.cmu.edu/blog/introduction-model-based-systems-engineering-mbse/> (参照日 2023 年 9 月 3 日)
- (6) Allouis, E. et al., A FACILITY FOR THE VERIFICATION & VALIDATION OF ROBOTICS & AUTONOMY FOR PLANETARY EXPLORATION, Proceedings of DASIA 2013 DAta Systems In Aerospace, 2013
- (7) MBD 推進センター: <https://www.jambe.jp/> (参照日 2023 年 9 月 3 日)
- (8) S. Thomke, T. Fujimoto: The Effect of 'Front-Loading' Problem-Solving on Product Development Performance. Journal of Product Innovation Management, 2000.
- (9) Negenborn, R. et al.: Autonomous ships are on the horizon: here's what we need to know. Nature 615, 7950, pp. 30-33, 2023
- (10) IMO: Autonomous shipping: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shiping.aspx> (参照日 2023 年 9 月 3 日)
- (11) 衛星 VDES コンソーシアム: <https://www.vdes.jp/index.html> (参照日 2023 年 9 月 3 日)
- (12) Kim, T. et al.: Safety challenges related to autonomous ships in mixed navigational environments, WMU J Marit Affairs. 21(2), 141-159, 2022.
- (13) Dori, D.: Object-Process Methodology - A Holistic Systems Paradigm, 2002
- (14) Kato, T. et al., QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT USING MULTISPACE DESIGN MODEL AND ITS APPLICATION, Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15) Vol 5, 2015
- (15) Nakashima, T. et al: Accelerated adoption of maritime autonomous vessels by simulating the interplay of stakeholder decisions and learning, Technological Forecasting and Social Change, Volume 194, 2023
- (16) National Aeronautics and Space Administration (NASA): Robotics and Autonomous Systems. NASA Technology Roadmaps TA4, 2015
- (17) 国土交通省: 船員の現状など: https://www.soumu.go.jp/main_content/000727908.pdf (参照日 2023 年 9 月 3 日)
- (18) 日本内航海運組合総連合会: 内航海運について: https://www.naiko-kaiun.or.jp/about/about_naikou/ (参照日 2023 年 9 月 3 日)
- (19) 中島ら: マルチエージェントシミュレータによる自動運航船の航行ルール検討, 第 35 回自律分散システムシンポジウム, 2023
- (20) ISO 34503:2023 Road Vehicles — Test scenarios for

- automated driving systems — Specification for operational design domain
- (21) N. Kalra, S.M. Paddock: Driving to safety: How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability? Transportation research. Part A, Policy and practice. 94, 2016.
 - (22) S. Khastgir et al.: Systems Approach to Creating Test Scenarios for Automated Driving Systems, Reliability engineering & system safety. 215, 2021.
 - (23) Lloyd's Register: Cyber-enabled ships ShipRight procedure – autonomous ships, 2016
 - (24) One Sea: White Paper – Autonomous Ships: Terms of Reference for Rule Development, 2022
 - (25) 日本海事協会 : ホワイトペーパー「自動運航船の社会実装へ向けて」, 2023
 - (26) Ashby, M.F.: Materials Selection in Mechanical Design. Chapter Two, Third Edition, Butterworth-Heinemann, Elsevier's Science and Technology Rights Department, Oxford, 624, 2005
 - (27) ISO 34502: Road vehicles — Test scenarios for automated driving systems — Scenario based safety evaluation framework, 2022
 - (28) SAE (2016) Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles (Surface Vehicle Recommended Practice: Superseding J3016 Jan 2014), SAE International, September 2016