

概要

自動運航船の開発で注目されている 1D simulation は、将来的な認証のスコープに入ることが想定される。そのため、現状の開発においてどのような利用をされているのかを理解することは重要である。そこで、本調査では 1D simulation に関する文献調査の内容を報告する。また、避航操船を模擬した 1D simulation をプログラミング言語 Modelica を利用して実装したので、その内容についても紹介する。

1. はじめに

自動運航船の開発において MBD (Model Based Development) が注目されている。国内では、日本財団の自動運航船プロジェクト MEGURI2040 に参画した DFFAS (Designing the Future of Full Autonomous Ship) コンソーシアムにおいて、MBD を用いた開発が報告されている[1]。このように、自動運航船に搭載されるシステムが MBD のアプローチで開発されてくることが予想される。

MBD による開発では、概念設計段階でのシミュレーションである 1D simulation が重要となる。ここで、1D simulation の「1D」とは、シミュレーションで用いる方程式の次元を表しているのではなく、設計工学で考えられている設計情報の次元が「1D」であることを指している。設計情報の次元とは、図 1 に示すように開発プロセス（概念設計、機能設計、配置設計、構造設計、製造設計）ごとに定められたものである。設計上流、つまり設計情報の次元が低いところでは主に機能・性能を決定することが目的となっているのに対して、設計の下流では構造を決定することが目的となっている。よって、1D simulation とは設計上流における機能設計を支援する CAE (Computer Aided Engineering) のツールであり、主に機能や性能を決定するために必要なシミュレーションを実施するものといえる。また、多くの場合、物理ドメインをまたいだシステムレベルでのシミュレーションを行うことが想定されている。

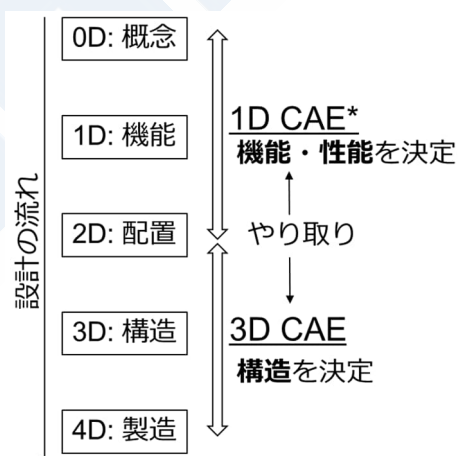


図 1 設計情報の次元と設計工程[2]

将来的には、自動運航船に限らず、機能や性能を 1D simulation によって評価し、その結果を基に概念設計の妥当性を評価するといった活用が想定できる。一方で、現状は 1D simulation を活用してこのような活動においてどのような手順で何を確認するべきなのかが明らかにされていない。このような検討を進めるには、1D simulation が将来的にどのように活用されていくのかをまず理解する必要がある。

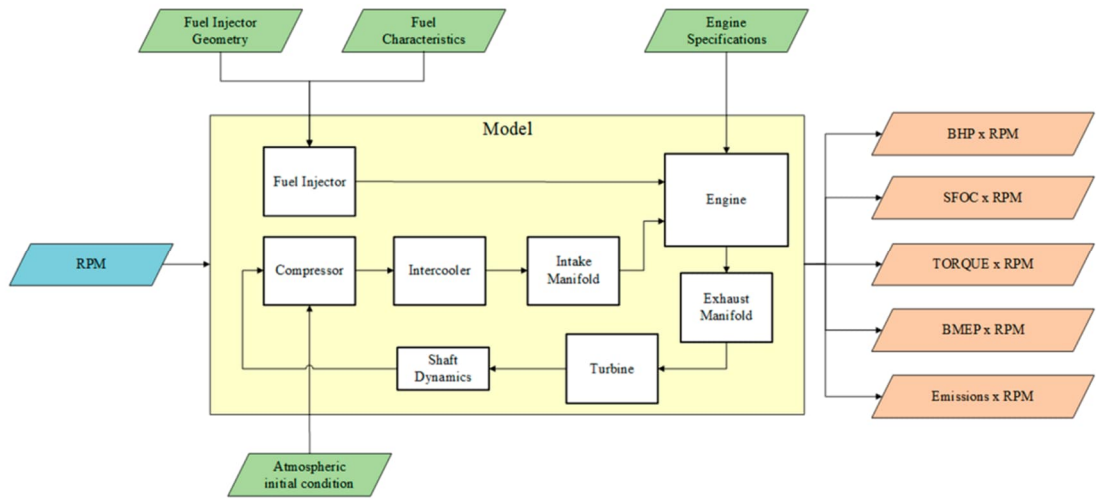
そこで、1D simulation の活用方法を明らかにすることを目的とした文献調査を実施し、本報告書においてその内容を報告する。以下、2 章では調査方法について説明し、3 章以降で文献調査から得られた情報を整理する。さらに、自動運航船の避航操船を模擬した 1D simulation をプログラミング言語 Modelica を利用して実装したので、その内容についても簡単に紹介する。

2. 調査方法

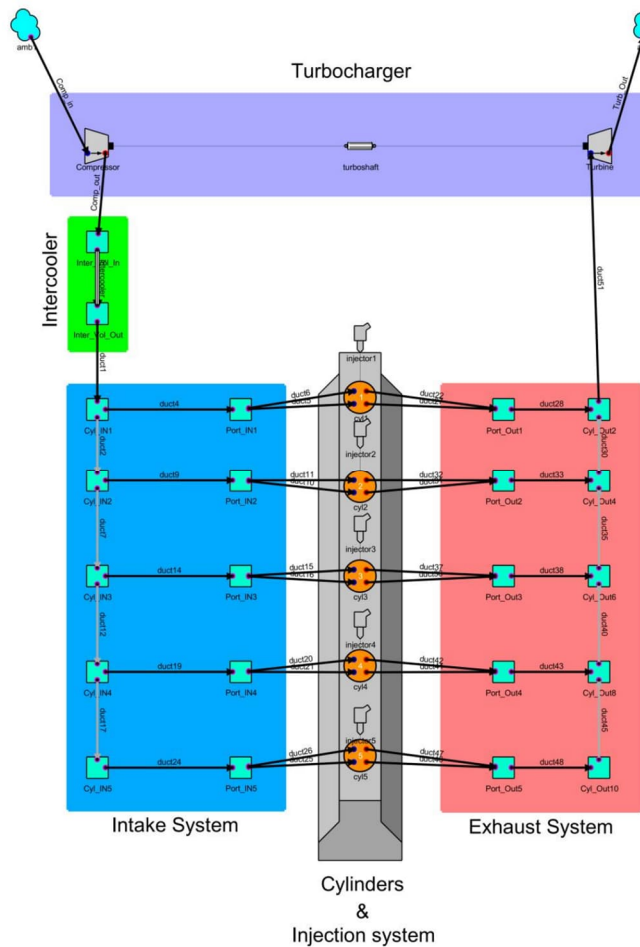
将来的な活用方法を探るためには、現在研究フェーズにおいてどのように利用されているのかを調査することが望ましいと考えた。そこで、過去 5 年間（2018 年～2022 年）に発行された約 30 本の学術雑誌と講演論文で 1D simulation がどのように利用されているのかを調査した。調査対象は主に船舶分野と航空分野に絞ったが、自動車を含む他分野についても一部調査を実施した。また、上記調査に加えて現状の開発現場における活用方法を調査するため、1D simulation ベンダーである Newton works が主催する WC CAE World 2022 に参加し、情報を収集した。

3. 1D simulation のモデル化の対象

船舶分野では主に機関系システムをモデル化した事例が多数みられた。例えば、文献[3]ではトロール船の推進システムの最適化を検討するためにディーゼルエンジンをモデル化し、ターボチャージャーと噴射パラメータの最適化により BSFC (Brake Specific Fuel Consumption: 正味燃料消費率) を最小化している。このように、概念設計段階でエンジンの性能を最大化するために 1D simulation が用いられている例が他にもみられた[4, 5]。また、ソフトウェアとしてすでにあるエンジンモデルに対して、実データを基にモデルパラメータをチューニングすることでシリンダー内圧力を実験値と合わせる研究もおこなわれている[6]。文献[6]で示されている、エンジンモデルの概略図とそれを Ricardo Wave と呼ばれるシミュレーションソフトで再現したものを図 2 に示す。



(a) エンジンモデルの概略図

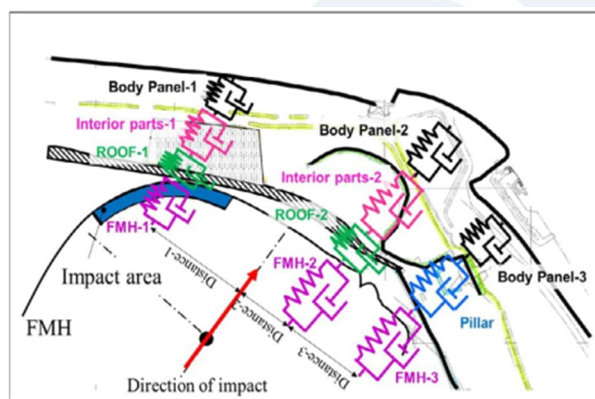


(b) Ricardo Wave によるシミュレーションモデル

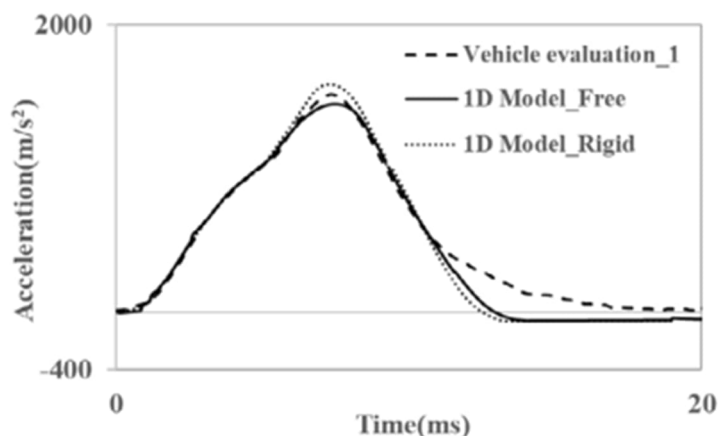
図 2 文献[6]に示されたモデル :

また、航空分野でも推進系をモデル化した事例が多く見られた。特に、航空分野では電気推進とのハイブリッド推進システムの検討において 1D simulation が利用されているようである。例えば、文献[7, 8]ではハイブリッド航空機を実現するための TMS(Thermal Management System) の評価を目的として TMS をモデル化している。また、文献[9]では電気推進で用いられる電気油圧式アクチュエータをモデル化している。

一方、自動車分野では推進系以外のモデル化をする取り組みが見られた。例えば、文献[10]では車室内衝撃に対する頭部衝撃保護の性能開発において頭部、天井、ボディパネルをモデル化したシミュレーションによる検討を行っている(図 3)。このシミュレーションによって、頭部障害値と呼ばれる評価値を初期設計段階から短時間で予測することが可能となった。また同様の取り組みとして、文献[11]では衝突時のシートと人体をモデル化して鞭打ちに関する性能を予測している。このように、自動車の分野では実験や 3D シミュレーションに工数がかかる性能検証において、1D simulation による性能予測を利用することによって、初期設計段階での妥当性評価に役立っている。



(a) 頭部への衝撃の様子をばねマスダンパ系へ変換したモデル



(b) シミュレーションと実験結果の比較

図 3 頭部、天井、ボディパネルのモデル化とシミュレーション結果[10]

以上から、1D simulation におけるモデル化の対象は機関・推進系であることが多く、エネルギーマネジメントの検討に有効であることが分かった。一方で、船舶や航空機といった全体系のモデル化はほとんど見られなかった。また、自動車の分野で見られたように、何かしらの性能検証時に予測値を 1D simulation で評価することが考えられる。この場合には、シミュレーションのシナリオだけでなく、モデル化が妥当であるかを見極められるように知見を蓄えておくことが重要と思われる。

4. 1D simulation の利点

1D simulation の利点として最も多い指摘は、概念設計時に短時間で評価が可能である点であった。概念設計段階ではまだ構造が定まっておらず、一般的によく利用されている 3D CAD 等のシミュレーションが利用できないが、1D simulation では性能評価やパラメータの最適化が可能である。これによって、詳細設計等での手戻りを抑制する効果が期待できる[5, 6, 12, 13]。加えて、概念設計段階における評価では、厳密な物理量を必要としない場合が多く、定性的な判断をするための材料としてラフな精度で多くの計算を回すといった利用もされている。このように、網羅的な検証で概念設計を補助するためのツールとしての利用価値を強調する文献・発表も見られた[10, 14-16]。さらに、1D simulation を用いたリスクアセスメントによって、概念設計を固めるプロセスにおいて効率的であるとの指摘をするものもあった[17]。

また、マルチフィジクスでの検討が可能なのも指摘されている[14, 18]。つまり、エネルギーマネジメントなどに代表される熱や電気などの複数の領域をまたがるシミュレーションを実施できることが利点といえる。構造設計におけるマルチフィジクスシミュレーションの利用も現在では行われているものの、計算時間の観点からあらゆるパラメータを振りながら検証する場合には課題がある。一方で、1D simulation では物理量のやり取りによって表現されるシミュレーションであるため、計算時間が比較的短時間であり、様々なパラメータを割って網羅的に検証する場合に有効である。

以上から、1D simulation の利点は以下のように整理できる。

- ✓ 概念設計時に短時間で性能評価やパラメータの最適化ができること
- ✓ 網羅的な検証を通じて概念設計を補助できること
- ✓ リスクアセスメントなど安全機能の確認ができること
- ✓ マルチフィジクスシミュレーションを短時間で実施できること

5. 1D simulation の実装

1D simulation を実装するために Modelica 言語を用いた物理モデリングに取り組んだ。Modelica 言語とはモデルを記述するために用いられるオブジェクト指向言語であり、下記の特徴を有している[19]。

- ✓ 方程式を記述できる
- ✓ 単位系の概念を有する
- ✓ GUI (Graphical User Interface) が規定されている

今回は、自動運航船の自動避航を模擬したシステムを図 4 のように定義し、このシステムを Modelica 言語を用いて記述し、シミュレーションを実施した。Modelica では、機能ごとにプログラミングを行い、それぞれを結線することによってシステムを表現する。ここでいうシステムとは、船舶そのものだけでなく外部環境との相

互作用も考慮したシステムを指しているため、図 4 に示す外部環境ブロック ENV もモデルとして組み込んだ。

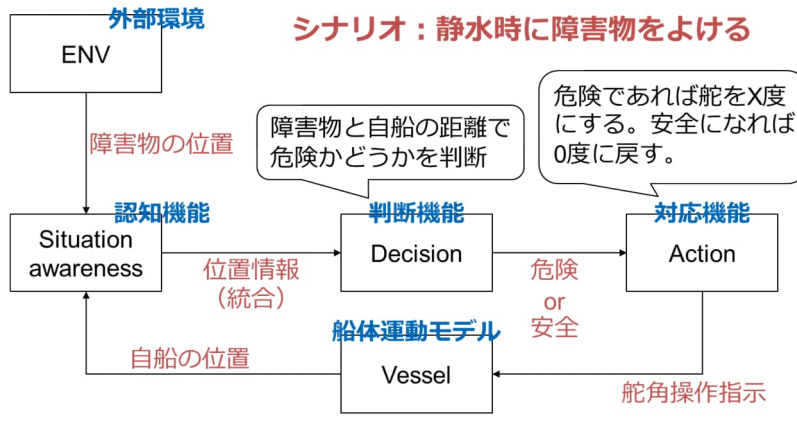


図 4 自動避航システムの模擬

シミュレーション条件は、図 5 に示す座標系において船舶が原点 O から船首方位 $\Psi = 45$ [deg.] の方向に直進中、障害物 $(X, Y) = (3000$ [m], 3000 [m]) との距離が 1500 m 以下になると舵角 $\delta = 10$ [deg.] に固定して旋回し、障害物を回避するというシナリオで行った。そのシミュレーション結果と使用した Modelica モデルを図 6 に示す。

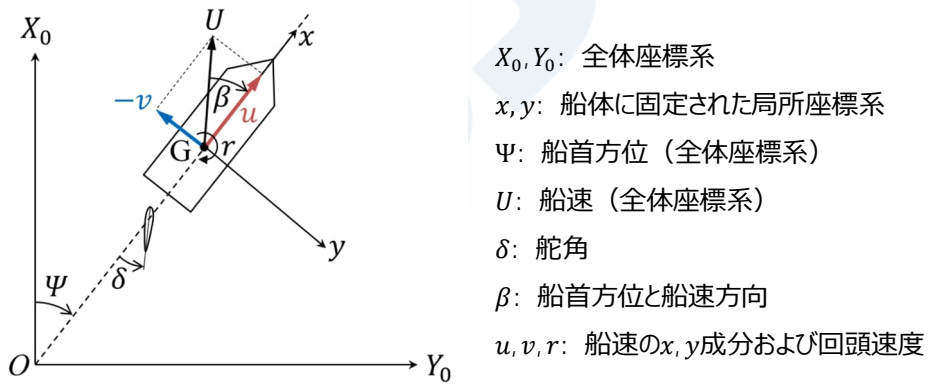
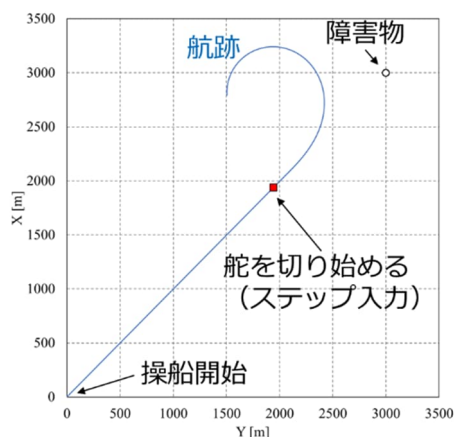
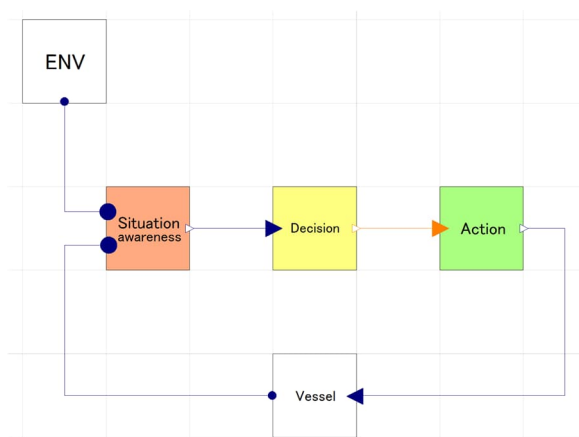


図 5 船体座標系



(a) シミュレーション結果



(b) Modelica で記述したモデル

図 6 自動避航を模擬したシステムのシミュレーション

実装等を通して得られた知見を以下に述べる。

- ✓ 1D simulation の結果の妥当性を検討するためには、システム全体でのシミュレーション結果（例えば、図 6(a)）を確認するだけでなく、各機能のモデル化が適切に行われているのかを確認することが必要である。
- ✓ 認証の範囲によって、メーカー等がモデル化する範囲が変化することに気をつけなければならない。例えば、自動運航船に搭載する自動化システムを開発する場合には、Situation awareness ～ Action までの一連の機能をモデル化する必要がある。一方で、避航アルゴリズムを開発する場合には Decision のみをモデル化すればよい。
- ✓ ENV や Vessel といったメーカーの開発対象ではないものをどのように補完すればよいのかが課題となる。自動車の分野では、すでに「モデル流通」という考え方があり、協調領域のモデルを公開するなどの取り組みが見られる。船舶分野においても同様の考え方が必要と思われる。また、共通のシミュレーション基盤が必要であり、文献[1]においても同様の指摘がされている。

6. あとがき

本報告書では、自動運航船の開発で注目されている 1D simulation に関する文献調査の結果を報告した。本報告が海事業界における 1D simulation 導入の一助となれば幸いである。

参考文献

- [1] 村山英晶他, 海事デジタルエンジニアリング, KANRIN, Vol. 19(2023), No. 1, pp. 20-26.
- [2] 大富浩一, 1DCAE の効果と課題, 日本機械学会第 13 回「運動と振動の制御」シンポジウム, 2013, C01.
- [3] M.Tadros, et al., A nonlinear optimization tool to simulate a marine propulsion system for ship conceptual design, Ocean Engineering, Vol. 210(2020), 107417.
- [4] R. A. Pustode et al., 1D Analysis for Marine Application (Modelling of Ship in GT Suite for Evaluation of Performance Parameters), International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 9(2020), No. 3, pp. 432-436.
- [5] M.Tadros et al., Optimization procedure to minimize fuel consumption of a four-stroke marine turbocharged diesel engine, Energy, Vol. 168(2019), pp. 897-908.
- [6] M.Tadros et al., Data Driven In-Cylinder Pressure Diagram Based Optimization Procedure, Procedure of Journal of Marine Science and Engineering Vol. 8(2020), No. 4, 294.
- [7] V. G. Gkoutzamanis et al., Thermal Management System Considerations for a Hybrid-Electric Commuter Aircraft, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 36(2022), No. 3, pp. 650-666.
- [8] R. Buettner et al., An Automated Design Tool for Generation and Selection of Optimal Aircraft Thermal Management System Architectures, Procedure of AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum.
- [9] C. Zheng et al., Application of Multiphysical Domain Modeling in Electrical System Simulation, Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2020, 6245943.
- [10] 野間寛揮他, 頭部衝撃保護性能のモデルベース開発の適用, 自動車技術会論文集, Vol. 53(2022), No. 2, pp. 252-257.
- [11] 我谷徹, 自動車用シート鞭打ち傷害軽減に向けた 1D-CAE 活用事例, NWC CAE World 2022.
- [12] 渡辺賢, 液封マウント特性モデルを適用した始動時エンジン振動入力予測技術構築, NWC CAE World 2022.
- [13] D. Dimitrov et al., 1D simulation-based development of a safety concept for the investigation of a high-pressure gas-diesel injector on a single-cylinder research engine, TRANS MOTAUTO WORLD, Vol. 4(2019), No. 3, pp. 128-131.
- [14] 山岸義弘他, トナー粘弾性に着目した 1D-CAE による定着ニップ機能のモデルベース設計, 日本画像学会誌, Vol. 60(2021), No. 2, pp. 162-168.
- [15] S. Nagata and T. Nagao, Efficiency improvement of compressor for refrigerator using 1D CAE and 3D CAE, Vol. 6(2019), No. 5, pp. 19-00120.
- [16] 井上裕章, SimulationX を活用したブレーキ性能予測の取り組み事例, NWC CAE World 2022.
- [17] 鈴木智也, 大型蓄電池を用いたエネルギー貯蔵システムの定量的リスク分析に向けた 1D モデルの活用, NWC CAE World 2022.
- [18] M. Podlaski et al., Multi-Domain Modeling for High Temperature Superconducting Components for the CHEETA Hybrid Propulsion Power System, Procedure of AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium, 2021.
- [19] 西剛伺, はじめての「OpenModelica」, 工学社, 2021.