

ClassNK 技報

No.4 2021年 (II)

特集：自動運航



—目 次—

特集記事 自動運航

(招待巻頭論文)

自動運航の現状と今後の展望 ……東京大学名誉教授 (一財)日本自動車研究所 鎌田 実…… 1

自動車の分野において自動運航に関する種々の検討が進められており、これらの動きは船舶の自動運航にも通ずる部分が多々あると考えられる。そこで、本稿では、船舶における自動運航の検討を進めていく際の参考となることを期待し、自動車の自動運航の現状と今後の展望について記載する。

自動運航システムのリスク評価

……………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
伊藤 博子, 柚井 智洋, 塩苺 恵, 石村 恵以子, 三宅 里奈, 工藤 潤一…… 9

自動運航船に関連する技術開発が活発化する中、自動運航のためのシステムは導入前のリスク評価を必要とすることが多い。従来のハードウェア設備などを対象とするリスク評価技術を適用しにくいソフトウェア中心の技術が使われていることや、多様な使用方法が想定されていることが、リスク評価を難しくしているが、最近の解析手法の導入や従来手法の拡張により、少しずつ可能となりつつある。本稿では、そのような自動運航システムのリスク評価に関連する技術を、当所の取り組みを含め紹介する。

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

……………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
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…… 19

近年、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。自動運航船では、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、その就航には、社会に受容されることも必要であり、自動運航船が安全であ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。

自動運航船の自動化レベルについて ……一般財団法人 日本船舶技術研究協会 福戸 淳司…… 27

自動運航船という言葉からくる船舶あるいはそれを用いた操船のイメージは、必ずしも固まっておらず人により異なる。実際、自動化システムを使用した操船形態は、手動操船から完全自動操船まで多様であり、開発や評価の対象となる自動化システムのイメージを関係者間で共通の認識として持つことは重要である。そこで、本報告では、各種自動化システムの機能と人間との関わりについて、共通の理解を得ることを目的とした自動化レベルについて、過去の検討内容を調査するとともに、自動化が進んでいる自動車とドローンの自動化レベル、および現在までに各種海事関係機関およびいくつかの船級協会から示された自動化レベルについて、その概要および自動化レベルを分類するファクターを取りまとめた。

一般技術

船舶の火災安全対策への取り組み 機関開発部, 材料艙装部 39

コンテナ運搬船及び自動車運搬船に関し、IMOで議論されている火災安全対策の動向について解説するとともに、今後の条約改正に先んじて、コンテナ運搬船を運航する船主や船舶管理会社が自発的に進める追加の火災安全対策の動きに対応した本会の取り組み及び自動車運搬船に対する国内検討会での火災安全対策について紹介する。

実船計測データ及び機械学習を用いた船体構造の応力推定 技術研究所 45

航行中の船体構造に生じる応力の履歴を把握することは安全性の観点から重要度が高い。一方で、応力計測にはコストがかかるため、少ない計測個所で船全体の応力を把握できる手法や、応力を推定する手法の開発が望まれる。このような応力の把握に関して、近年発展している機械学習を用いたアプローチが効果的だと考えられることから、実船計測データと機械学習を活用した応力推定手法の研究を実施しているため、本稿で内容を紹介します。

自律飛行ドローンの船舶の検査・点検への活用検討 技術研究所 51

近年、様々な分野において、ドローンなどのロボティクス技術の活用が活発化しており、これらの最新技術を用いた船舶の検査・点検への有効活用に対する期待感が高まっている。本会でも、船舶内（非GNSS環境下や暗所）において安定して自律飛行するドローンに対する技術要件の抽出と、自律飛行ドローンを用いた際の船舶の検査・点検に適したスキームの研究を進めている。本稿では、ビジョンセンサを搭載した自律飛行ドローンを使用した実証実験の結果について記述する。

IMOの動向 国際部 59

本稿では、IMO（国際海事機関）における国際条約等の審議動向を紹介する。今号では、第76回海洋環境保護委員会（MEPC 76）の審議概要を紹介する。

自動運転の現状と今後の展望

鎌田 実*

1. はじめに

自動車の分野において自動運転に関する種々の検討が進められており、これらの動きは船舶の自動運航にも通ずる部分が多々あると考えられる。そこで、本稿では、船舶における自動運航の検討を進めていく際の参考となることを期待し、自動車の自動運転の現状と今後の展望について記載する。

2. 自動運転の概要

2.1 背景

未来投資戦略2017では「健康寿命の延伸」などと共に「移動革命の実現」として自動運転に取り組むことが大きく描かれている¹⁾。

移動革命のイメージとしては①トラック運送等での隊列走行、②人の移動サービスを提供する無人自動走行、③ドローンを使った荷物配送、④自動運航船の4つあり、それぞれ2020年までの実証を目標としていた。自動車の分野に関しては、①については高速道路における後続車の無人走行、②については鉄道の廃線跡を利用した無人自動走行の実証を行っており、目標を達成している。他にも未来投資戦略2017の中での取り組みとして、「世界に先駆けた実証」、「データの戦略的収集・活用、協調領域の拡大」、「国際的な制度間競争も見据えた制度整備」が掲げられているが、その多くは実現できている。

翌年に発表された未来投資戦略2018では、「移動・物流革命による人手不足・移動弱者の解消」として自動運転がさらに大きく取り上げられている²⁾。

2.2 自動運転にまつわる疑問

(1) 完全自動運転は、いつ実現するのか？

どこでも走れる完全自動運転は技術的難易度が高いため、当分の間は実現できないと考えている。一方で、限定地域、限定空間で車を自動で走らせることは、お金をかければ今すぐに実現できる。この場合、どれだけお金をかけるのが妥当かという別の検討が必要となってくる。

(2) 自動運転が普及すると、世の中はどのように変わるか？

今とは人と車の付き合い方が変わっていくと考えられる。例えば、無人の自動運転のタクシーがスマホアプリで簡単に呼べるようになれば、車を所有して自分で運転するよりも安く移動できるようになるかもしれない。そうなれば、今のように車を自己所有するという概念が将来的には無くなるかもしれない。

(3) 日本と諸外国における自動運転の差異は？

日本ではドライバ不足が顕著であるため、事業用自動車（バス、トラック）に対する無人化への強い期待が存在する。そのため、事業用自動車での無人化の実現が諸外国と比べて早く進むと考えている。

2.3 自動運転の実現方法

自動運転の実現方法として基本的にはインフラ協調と自律の2つある。インフラ協調とは、インフラに様々な設備を設置し、その設備とのやり取りにより、車を自動で動かすという方法である。自律というのは車に様々なセンサーを搭載することで、インフラに依存することなく自律で走る方法である。

歴史的にみると、1990年代はインフラ協調（磁気ネイル等）が主流だった。1996年に開業前の上信越道において磁気ネイルを用いた隊列走行の実証が世界に先駆けて実現している。しかし、同じように全国各地に磁気ネイルのインフラを配備するにはコストが非常に高かったため、この種のプロジェクトはその先続かなかった。一方で、2010年以降は自律が主流となっている。これは、アメリカのDARPAが軍事目的で無人自動運転のコンテストを開催したことや、2012年にGoogleが自動運転で走るGoogleカーを作り走ったことをきっかけとして自動運転の開発が盛んになったためである。ただし、当時はGoogleカーに搭載されているセンサー（LiDAR）が非常に高額であり、社会実装のための製品開発というよりむしろデモンストレーションの意味合いが強かった。

自動運転を実現するにあたり、インフラ協調と自律のどちらが良いかという議論は続いているが、最近ではインフラ協調と自律をうまく使うことで、コストも抑えつつ自動化を実現することが考えられている。例えば、路線バスやトラックの定期便のよう

* 東京大学名誉教授 一般財団法人日本自動車研究所 代表理事・研究所長

な走るルートが決まっている所であれば、その区間だけをインフラ整備するというインフラ協調を用いればよい。

2.4 社会的課題

日本は現在、高齢化率が28.7%で世界一位(2020.9)であり、2030年までに30%超、2055年には40%に達すると言われている。今後、生産年齢人口が減少していく中で、GDPを維持するためには生産性を相当上げる必要がある。また、高齢化が進むにつれて当然、社会保障や医療、介護にかかる費用が膨大となる。

国土交通省が作成した「国土のグランドデザイン2050」では、日本の将来に関する展望がまとめられている³⁾。その中の例を挙げると、日本は徐々に人口が減少していき、2050年には1億人を切ると言われている。また、人口分布も東京や名古屋などの都市圏に人口が集中し、現在、人が住んでいる地域の20%は無居住化するとされる。

また近年、高齢ドライバが増加したことに伴い、高齢ドライバによる事故が社会問題となっている。その対策として警察庁では高齢者講習や、今後、実技試験の導入も検討されている。一方、免許返納者に対する自治体主導のコミュニティバスやデマンド交通などもあるが、十分に整備しきれていないのが実状である。これらの課題を解決する手段として自動運転への期待が高まっている。

3. 自動運転の現状

3.1 自動運転の歴史

自動運転の取り組みは1970年代から進められており、通商産業省工業技術院機械技術研究所などで自動運転の実験を行っていた。1977年には、搭載したカメラで白線を認識する車が智能自動車と称して作られていた。

1990年代には、磁気ネイルに沿って車を走らせることができ、前述のように1996年に開業前の上信越道で、自動隊列走行のデモンストレーションがなされた。

2000年頃には、トヨタがIMTSというバスの隊列システムの開発を行っており、2005年の愛知万博では営業運転がなされた。

2004年には、米DARPAがインフラ協調ではなく自律で自動車を走らせるグランドチャレンジという競技を実施した。最初は砂漠の中を走る競技であり、

写真1に示すように車両もかなり大きく、一般車には見えない車が使われていた。それから、アーバンチャレンジという名前となり、市街地を模擬した場所で一般車に様々なセンサーを取り付けた車を走らせるような競技となった。アーバンチャレンジで使用された車両を写真2に示す。

2012年には、Googleが、ドライバレス車の公道試験を開始した。



写真1 グランドチャレンジで使用された車両⁴⁾



写真2 アーバンチャレンジで使用された車両⁵⁾

日本では、2013年に当時の安倍首相が3社の自動運転車の試乗を行い、国として自動運転に力を入れていく旨の発言がなされた。それ以降、自動運転の開発に力が入るようになり、2017～2019年には、日本でも実証実験が全国各地で広く行われた⁶⁾⁷⁾。日本で2019年以降に実施された主な実証実験を図1に示す。

表1 自動運転のレベル⁸⁾

レベル	概要	運転操作※1の主体
運転者が全てあるいは一部の運転操作を実施		
SAEレベル0 なし	運転者が全ての運転操作を実施	運転者
SAEレベル1 運転支援車	アクセル・ブレーキ操作またはハンドル操作のどちらかが、部分的に自動化された状態	運転者
SAEレベル2 運転支援車	アクセル・ブレーキ操作およびハンドル操作の両方が、部分的に自動化された状態	運転者
自動運転システムが（作動時は）全ての動的運転操作を実施		
SAEレベル3 条件付自動運転車 (限定領域)	特定の走行環境条件を満たす限定された領域において、自動運行装置が運転操作の全部を代替する状態。ただし、自動運行装置の作動中、自動運行装置が正常に作動しないおそれがある場合には、運転操作を促す警報が発せられるので、適切に応答しなければならない。	自動運行装置 (自動運行装置の作動が困難な場合は運転者)
SAEレベル4 自動運転車 (限定領域)	特定の走行環境条件を満たす限定された領域において、自動運行装置が運転操作の全部を代替する状態	自動運行装置
SAEレベル5 完全運転自動車	自動運行装置が運転操作の全部を代替する状態	自動運行装置

2020年3月時点 (計画を含む)

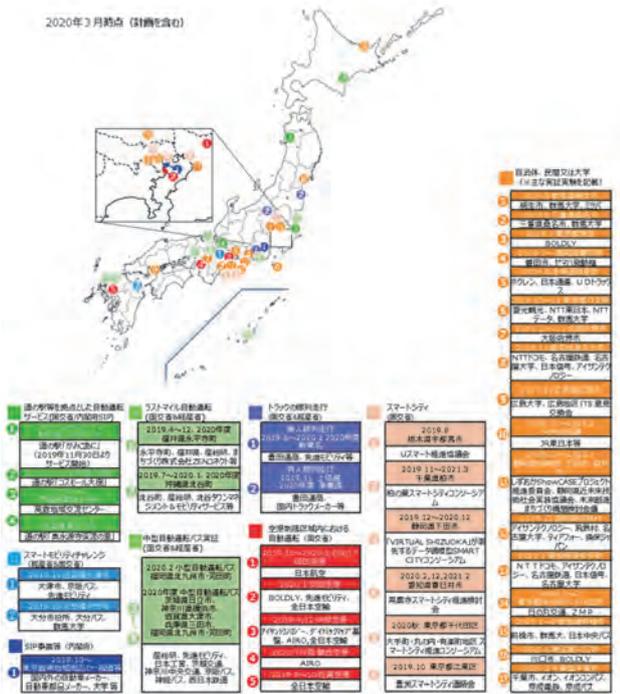


図1 2019年度以降に行われた主な自動運転実証実験⁷⁾

3.2 自動運転レベルの分類

自動運転のレベルは表1のようにSAE (Society of Automotive Engineers) が定めた運転自動化の6段階の定義を使うのが一般的である。多くの人がイメージするような自動運転のレベルはレベル4~5に相当する。

レベル1は前後か左右のどちらかが自動化されるものであり、レベル2は前後左右共に自動化されるものである。ただし、レベル2までは運転の主体は運転者にあり、その責任は運転者にあるため、レベル1~2は高度運転支援システムととらえるべきである。

レベル3は特定の条件を満たす範囲では自動運行装置が働くが、その範囲を超えると、運転操作は運転者に引き継がれる。ただし、自動運行装置から運転者への操作権限の委譲が適切に行えるか（何秒以内に権限を委譲すればいいのか）疑問を呈する専門家も多い。警察庁では、権限移譲が必要な場面になったら直ちに引き継ぐこととしているが、それができない場合には車両を安全に停止させることを国土交通省のガイドラインでは求めている。

さらに、レベル4~5では運転の主体は運転者ではなく、自動運行装置となる。レベル4, 5は技術的難易度が高く、一般公道での混合交通下の早期実現は困難であるが、専用空間・限定空間等かつ低速であれば比較的实现しやすいと考えられる。

3.3 自動運転の目的

(1) 安全

交通事故の原因の9割はヒューマンエラーとされており、その解決策として運転を自動化することでヒューマンエラーによる事故を防ぐ。日本では高速道路から自動運転の実装が始まっており、高速道路における渋滞時という条件付きであるがレベル3の自動運転も2021年に実現している。ただ、前述した高齢者の事故を減らすことに主眼を置くのであれば、自動運転ではなく、運転支援に力を入れることで高齢者の運転ミスを減らすほうが、安全に繋がるという考え方もできる。

(2) ドライバ不足

日本の人口は減少過程にあり、特にバス、タクシー、トラックではドライバ不足が顕著である。そのため、ドライバが不要となる自動運転による無人運転への期待が高まっている。特に過疎地域ではレベ

ル4～5の自動運転、高速道路でのトラック隊列（先頭車有人，後続車無人）を目指しつつ開発が進められている。また，無人運転だけではなく，遠隔監視・遠隔操縦の開発も進められている。レベル2では，運転の責任は遠隔者（人間）が持つことになる。1台の車を1人の遠隔者が見るという運用方法ではドライバーの数は実質減らないため，1人で何台も見られるようなシステムの開発を目指している。

(3) 付加価値

海外では自動運転の意義として，運転せず別の作業ができるという点に重きが置かれている。当然，運転中に別の作業ができれば，仕事等の生産性も上がる。また，長距離ドライバー等は自分で運転しない移動時間を休養に当てられれば労働条件の改善にも繋がる。他にも自動運行装置に加えてコネクティッドカーとして付加価値を高めることができれば，有効性はさらに増す。また，まちづくりにおいても自動運転は期待されており，全ての車が自動で走るようになれば，交通量と道路容量の関係などを見直すことで，従来の道路空間を再分配でき，余った土地の有効活用に繋がると考えられている。例えば，車を所有するという概念が無くなれば，駐車場も必要なくなり，そのスペースを有効活用できる。高速道路も車線を減らして管理できるようになるため，そのスペースをソーラーパネル，自転車道として活用できる。（図2，3参照。自動運転化で赤い部分が不要となる。）



図2 駐車場の活用イメージ⁹⁾



図3 高速道路における余剰車線の活用イメージ⁹⁾

3.4 自動運転の実現に向けた日本の取り組み

内閣官房の日本経済再生事務局では，自動運転に係わる官民協議会を開き，関係省庁，民間，有識者を加えて議論をしていた。自動運転の社会実装には法律の制度整備が必要になるが，本協議会の中でも同じ議論が起こり，民間，有識者の要求に沿って，関係省庁が素早く対応することで，制度整備が早期に実現できている。法律が整備された部分としては，道路運送車両法，道路交通法，責任関係では自動車損害賠償保障法など色々ある。2019年には道路交通法・道路運送車両法の改正で自動運行装置についても定義された。

また，日本だけが法律を変えて世界と基準が違ってしまうとガラパゴス化してしまうため，国連でも日本主導となって議論を進め，日本の主張をうまく取り入れた形で国際基準が作られているという流れが存在する。

一方，技術開発が進み，自動運転が使えるような法律の整備が進んだとしても，それが本当に社会に受け入れられるかという部分が非常に重要になってくる。つまり，社会受容性を確保し，自動運転車に乗る人だけではなく，その周囲の人にも受け入れられることが重要になる。

官民ITS構想・ロードマップ2018⁶⁾では，2020年度までの目標を掲げているが，そのほとんどが実現している。そこで2020年の官民ITS構想・ロードマップ2020⁷⁾では，今後に向けた2020年代の取り組みとして，短期，中期，長期と分けて，それぞれどこどのように実現していくかが取りまとめられている。そのロードマップ実現に向けて，経済産業省，国土交通省などでも多くの予算をかけて様々なプロジェクトに取り組んでいるところである。

3.5 自動運転の安全基準

自動運転を考える際には，どのように基準を作り，

その基準をどのように守らせるかという事が重要となる。まずは、その安全目標を定めることを目的として、国土交通省が自動運転車の安全技術ガイドラインを作成した¹⁰⁾。基本的な考え方としては、理論上システムが引き起こす人身事故が0となるような社会を目指すために、予見可能で回避可能な対象物に対しては事故を回避できることを目標としている。ただ、“予見可能”の程度については国によって許容範囲が異なるため、国際的な場でも議論が分かれている部分である。

実際にレベル3以上の自動運転を実用化するためには道路運送車両法の改正が必要となるため、交通政策審議会の小委員会において、自動運転車の設計・製造過程から使用過程にわたる総合的な安全確保に必要な精度のあり方について検討がなされた¹¹⁾。

4. 今後の展望

4.1 現状認識

運転者がいる場合、運転者がいつでも運転の主体を取り戻せるという条件であれば、レベル2とみなせるため、容易に公道で実証実験が行える。運転席に運転者がいない場合でも、遠隔監視・遠隔操縦ができれば、公道で実証実験を実施することができる。ハンドルやペダルが無い車両でも、遠隔監視・遠隔操縦ができ、かつ条件が整っていれば、保安基準適合とみなせるため、ナンバー交付ができ、実証実験も行える。このように日本では、レベル2の位置づけであれば実証実験がやりやすい環境にある。

また、技術としては、お金をかけ、簡単な環境であれば、完全自動運転が達成できるレベルにあるとも言える。

現在は、低コスト化や複雑環境適合へ様々な検討がなされている。また、責任問題についても様々なところで検討がなされている。法規制の対応についても、制度整備大綱に応じて進められている¹²⁾。

4.2 法規制

現状の法規制でも、レベル2での実証実験の範囲

においては、運転席のない車であっても実験が行える形が整えられている。遠隔監視においても、監視が1:1から1:Nになった時にむけて、既に1:3の実証実験が実施済みである。最終形の責任体制の議論はこれから進められていく。レベル4以上になれば、通常状態では遠隔監視も不要になり、それが達成できるレベルへのAIの進歩が期待されるが、技術的側面で十分そのレベルに達する状況が見えてこないと責任論の議論がしにくい。

法規制の中で、どこまで安全を要求するかという部分は議論が分かれるところではある。もらい事故をなくすレベルまで要求されるとハードルが高い。機器の信頼性に関する要求も一定の方向性が出されなければモノの設計ができない。国際的な競争において、目指すべきレベルと到達スピードをどこに設定するかに関しても考える必要がある。

一方、道路交通法・道路運送車両法の改正でレベル3が可能になったことで、高度運転支援・自動運転の車両の安全基準や認証・車検対応も進んでいる。運輸事業を行うにあたっての要件等もまとめられている。

4.3 未来像

2020年までに、高速道路渋滞時におけるレベル3の市販化、限定空間でのレベル3の実現、トラック隊列の技術構築が実現した。一方で、一般道路での自動運転は、レベル2といえども実現は難しい。そのためには、地図の整備のほか、色々な取り決めが必要となる。

レベル3がどのように展開していくかは未知数であるが、当面は高速道路での作動範囲の拡張になるだろう。レベル4~5の遠隔監視・遠隔操縦の事業化の姿も未知数である。

人件費が削減できる事業用車両と、個人所有の自家用車では、センサー等へのお金のかけかたも変わってくる。その他、条約や基準の作業の見通し、社会的受容性などについても検討しつつ、自動走行ビジネス検討会では、2030年頃までの工程表についても作成されている⁸⁾ (図4参照)。



図4 無人自動運転サービスの実現及び普及に向けたロードマップ⁸⁾

4.4 自動車業界の今後

モビリティサービス、交通という公共性のある事業、さらにはまちづくりまで、この領域は広がっていく。一方で、コネクティッドの興隆により、ICT業界との領域争いも始まっていく。1t以上の鉄の塊を、安全に100km/h超までの速度で動かす技術、高い信頼性と耐久性を維持する技術は、新興勢力にはまだまだ備わっていないものの、安閑としてはいられない。技術はどんどん進化していくものであるが、その技術を使う人間は同じペースで進化するわけではない。むしろ、老化等で退化していくものである。自動車業界は、自動車を単に作って売るといった現状の単純な運用形態のままで良いのかを考える時期に来ている。

4.5 自動運転の活用方法

自動運転はレベル2までの機能であっても運転支援として、安全の確保には重要な役割を果たすことができる。

一方、省力化として、無人運転には様々なハードルがある。限定的に可能な場所での展開からはじまる。無人化により人件費がいらなくなるという期待が強いが、自動運転にかかる経費が安くはなく、ピ

ジネスモデルが成立するかどうか十分に考える必要がある。

自動運転と言えど、単なる移動手段の自動化に過ぎない。重要なのは移動の手段の高度化ではなく、人も物も移動の活性化をはかることであり、魅力的なまちづくりが最も重要であるとも言える。

4.6 まちづくりの方向性

自動運転の技術が進歩し、法整備がそれに対応できるようになったとしても、そこからコスト面も含めてどのように社会実装していくかという事が重要になる。これから日本の人口が減少していく中で、自動運転をただ使うだけで社会が良くなることは考えづらいため、自動運転が活用しやすいように、あるいは人口が減少したとしても、自動運転により人々が暮らしやすいように持続性があるようなまちづくりをする必要がある。自動運転をまちづくりの中で移動手段の1つとしてどのように活用するかということを経ランドデザインとして描かなければ、実現は難しいと考えている。

4.7 まとめ

モビリティの分野において50年後、100年後に、歴史を振り返ると、今の時代は大きな転換期にあた

るのではないだろうか。これから、電動化も進み、自動運転・コネクティッドカーも大いに進むことは間違いない。一方で、技術開発だけではなく、成熟社会・人口減社会に向けた対処も必要などである。2050年に日本の人口が1億人を割るのは必至であるため、人口8000万人程度が、国土のある割合の範囲内で、豊かな暮らしができるようなランドデザインを描く必要がある。その中で、モビリティの未来像をきっちり示し、生活を支えるモビリティサービス産業としての役割を自動車業界に担ってもらい、国もそれに対して支援していく流れをつくることが重要になる。

5. おわりに

本稿ではこれまで、自動車の分野における自動運転について、概要や目的、今までの歴史、そしてこれからの展望を中心に述べさせていただいた。一方で、自動車の自動運転で抱えている課題は、船舶の自動運航の分野でも同じことがおそらく言える。例えば、自動車の自動運転の目的として、安全、人手不足、付加価値の3つを述べたが、これは船舶の分野にも当てはまる。海難事故の約8割は人為的要因（操船不適切、見張り不十分など）と言われている。

また、人手不足については特に内航船の乗組員に関しては高齢化が進んでおり、近い将来、乗組員不足が顕在すると見られている。そして、乗組員の船上業務は多岐にわたって存在しており（操船、見張り、推進、電力管理、貨物管理など）、乗組員の負担は大きく、労働環境改善に資する技術へのニーズは大きい。このように、事故防止、人手不足解消、労働環境改善の手段として、船舶の分野でも自動運航技術が期待されている。

近年は、船舶の分野においても国土交通省による実証事業や日本財団の無人運航船プロジェクト（MEGURI2040）に代表されるように、自動運航に関する開発プロジェクトも複数立ち上がっており、実装化に向けた規則整備、技術開発が今後ますます進んでいくと考えられる。実現までの道筋は容易なものではないだろうが、本稿で紹介した自動車の事例が、船舶における自動運航の検討を進めていく際の一助となれば幸いである。

参考文献

1) 内閣官房：未来投資戦略2017—Society 5.0の

実現に向けた改革—、内閣官房ホームページ、
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/pdf/miraitousi2017.pdf>

- 2) 内閣官房：未来投資戦略2018—「Society 5.0」「データ駆動型社会」への変革—、内閣官房ホームページ、
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/pdf/miraitousi2018_zentai.pdf
- 3) 国土交通省：国土計画、国土交通省ホームページ、https://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tk3_000043.html
- 4) DARPA：Defense Advanced Research Projects Agency、DARPAホームページ、
<https://www.darpa.mil/about-us/timeline/-grand-challenge-for-autonomous-vehicles>
- 5) DARPA：URBAN CHALLENGE、DARPAホームページ、<https://www.grandchallenge.org/>
- 6) 首相官邸：官民 ITS 構想・ロードマップ2018、首相官邸ホームページ、
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20180615/siryou9.pdf>
- 7) 首相官邸：官民 ITS 構想・ロードマップ2020、首相官邸ホームページ、
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20200715/2020_roadmap.pdf
- 8) 経済産業省：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」Version5.0～レベル4自動運転サービスの社会実装を目指して～、経済産業省ホームページ、
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/jido_soko/pdf/20210430_02.pdf
- 9) WSP：Insights/Autonomous Vehicles、
<https://www.wsp.com/en-SG/insights/autonomous-vehicles>
- 10) 国土交通省：自動運転車の安全技術ガイドラインの策定、国土交通省ホームページ、
https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha07_hh_000281.html
- 11) 国土交通省：交通政策審議会陸上交通分科会自動車部会 自動運転等先進技術に係る制度整備小委員会報告書、国土交通省ホームページ、
<https://www.mlit.go.jp/common/001268639.pdf>
- 12) 首相官邸：自動運転に係る制度整備大綱、首相官邸ホームページ、
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20180413/auto_drive.pdf

自動運航システムのリスク評価

伊藤 博子*, 柚井 智洋*, 塩苺 恵*, 石村 恵以子*, 三宅 里奈*, 工藤 潤一*

1. はじめに

自動運航船に関連する様々な技術が開発されている。商用の自動運航船を目指す動きとしては、2010年代前半からEU資金によるMUNINプロジェクト¹⁾や、DNV GLのReVoltプロジェクト²⁾、フィンランド資金によるロールスロイスなどのAAWAプロジェクト³⁾などが先発組として知られている。その後、世界中の事業者が、異なる技術力、将来展望、ニーズに呼応して、思い思いの開発や試行を行ってきた。日本でも昨年度に日本財団が開始した将来的な無人船を指向するMEGURI 2040プロジェクトの中で、5つのコンソーシアムが各々得意な自動運航の技術を搭載した船舶を投入して実証実験を予定している⁴⁾。

それぞれのプロジェクトが実証を目指している自動化タスクをみると、船舶が全て無人化されるような広範な作業範囲から、特定の条件下での避航操船のような限定的な作業範囲まで、大きく異なる。そのアプローチも、既存技術を磨いて信頼性や使い勝手を向上させるものから、創造的な新しい概念を試そうとするものまで多様である。当然ながら、出来る上がる自動運航システムの使用方法も、障害が発生した際の対応方法も異なっている。

自動運航船に関連する技術開発の活発化に伴い、リスク評価手法を研究する著者らに対しても、それらの自動運航システムを投入する前の実証段階において、例えば実船実験での安全性確保のため、或いは将来的な自動運航システムの商用化にあたってのシステムや船舶の認証などを念頭に、リスク評価技術を適用可能にすることが求められている。果たしてどのような概念、機能、構成の船舶を自動運航船としてリスク評価できるようになれば良いのであろうか。

法的な枠組みにおいては、まだ自動運航船の定義や、自動運航船とみなされるための構成要素といった、自動運航船そのものに対する具体的な規定はほとんど見られない。船舶分野では自動化システムが人の機能を代行して構わないということを示す具体的な定めも見つけることができない。一方で、多く

の人が根底に持っている将来的なイメージとして、導入される技術によって人が運航する場合よりも安全になるか少なくとも同等であれば、人が行っている作業をその技術にさせても構わないのではないか、という考えがある。自動車分野では、運転者に代わって運転操作を行う装置を搭載した自動運転車が承認されたこと⁵⁾を踏まえ、船舶でも安全性を証明することで、自動化システムによるタスク代行を可能にできないかとの議論もみられる⁶⁾。

新しい技術が既存技術と同等の安全性を確保しているかを考えるためには、その新しい技術に関連するリスクを推定する必要がある。未知の部分が多いとはいえ、著者らは、従来のリスク評価手法をベースに、自動運航船に特有なところを拡張する形でリスク評価を行えるのではないかと考えている。本稿では、そのような背景に当所の研究を織り交ぜつつ、自動運航のためのシステムのリスク評価の現状について紹介する。

2. 一般的なリスク評価のプロセスと安全目標

2.1 リスク評価のプロセス

ここで、リスク評価の一般的な工程について確認しておく。リスク評価は、大きく分けてハザードを特定する工程と、得られたハザードの重要性を評価する工程から構成される。英国の安全衛生庁(HSE: Health and Safety Executive)では、ハザードを特定する工程をリスク解析(Risk analysis)と呼び、これとハザードを評価する工程を合わせてリスク評価(Risk assessment)と呼んでいる⁷⁾。また、これらに加え、コスト便益を考慮して最終的にリスク低減措置を選択するという意思決定の工程までを含めてリスク管理(Risk management)と呼ぶ。これらの関係は図1のように表わされる。

この捉え方の中で、HSEは、全ての工程で用いられる重要な要素として、ハザードの特定(HAZID: Hazard identification)、すなわちリスク解析の工程を位置付けている。さらに、リスク解析を実施するためのツールとして、専門家判断(Judgement)、故障モードおよび影響解析

* 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

(FMEA : Failure mode and effects analysis), SWIFT (Structured what-if checklist technique), HAZOP (Hazard and operability study) を挙げている。また、これに続くリスク評価の技術としては、定性評価 (リスクマトリクス), 構造化ツール (fault trees, event trees) を用いた半定量評価, 定量評価 (様々な粒度がありえる), 関係者の協議を列挙している。

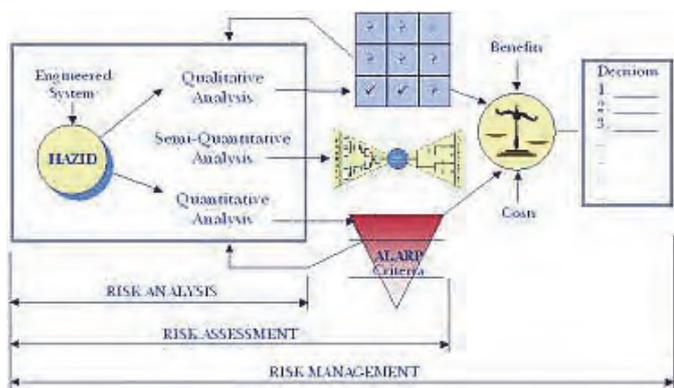


図1 リスク評価の色々なアプローチ⁷⁾

リスク評価を行った場合には、得られた結果の受容性について判断することになる。しかし、発生頻度などのデータが十分に得られないために、半定量評価の手法を選択せざるを得ない場合などには、結果の位置づけについて悩まされることが多い。この点に関して、HSEでは、フォルトツリー分析 (fault tree analysis) のような半定量評価では、必ずしも発生しやすさを評価できないが、そのような場合でも、それを用いることで、解析チームから見て主要なハザードが発生する仕組みに対して防御策の適切性を数と品質の両方の面で判断することができる⁷⁾としている。これは、意思決定において定量化が困難な際の専門家判断の正当性を支持するものであり、解析チームの判断に対する負担は大きくなるが、後述のように定量化が困難な局面が想定される自動運航システムに対しては重要な手段となりえる。

2.2 安全目標の考え方

安全目標については、統一的なクライテリアが存在しない状況ではあるが、合意されたものを用いることが望ましい⁸⁾とされる。安全目標に対する解釈の方法としては、HSE⁹⁾に示されている図2のような概念が比較的良く用いられる。これによると、リスクの受容性は、両端に受容できない領域と広く受容できる領域があるフレームワークで捉えられる。その間には容認できる領域を設けてあり、各領域間の境界線がクライテリアになる。HSEでは、この

クライテリアは、公衆が持つものとしつつ、現に生じている事故や病気による年間の死者数と、そのような結果を踏まえた行動選択を考慮して、公衆のリスク受容性に関する推定を行っている。その結果として、広く受容できる領域の上限は、労働者か一般の市民かを問わず年間百万人にひとりが目安だろうという。また、受容できない領域の下限としては、労働者で年間千人にひとり、一般の市民では年間一万人にひとりの値を提示しつつ、実際のリスクはこれらよりかなり低いことを指摘している。受容性は対象となる人々の集合に依存し、また時代とともに変化することも考えられるため、クライテリアはそれらに即して設定されることが望ましい。

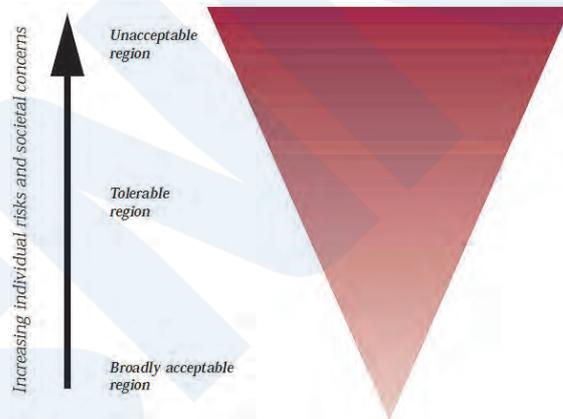


図2 HSEのリスク受容性フレームワーク⁹⁾

3. 自動運航船に対するリスク評価

3.1 船舶設計や船用機器の設計の観点

自動運航船には、船舶や機器といった設備と、それらを用いた運航の二側面があり、自動運航システムの中には両者を一体とした運用概念のもとに開発されるものもある。これらの側面のうち、設備の設計に関しては、従来、リスク評価との関わりが深い。遡れば、1997年に国際海事機関 (IMO: International Maritime Organization) で承認されたFSA (Formal Safety Assessment) 暫定ガイドライン¹⁰⁾により船舶に関連する規則の開発にリスクベースの考え方が導入され、現在までFSAガイドライン⁸⁾として引き継がれている。このガイドラインは「規則策定のための」と銘打つものの、用いられるリスク評価手法が基本的なものであり、記載も比較的充実していることから、規則検討以外にも、船舶や設備の安全性を評価する際の一般的なリスク解析手法のガイドラインとしても良く参照されている。

一方、2000年代に入ったところから、設計に対するリスクベースの承認についても議論が進み、

SOLAS条約附属書第II-2章の火災安全に関する規則に対する代替設計・配置ガイドライン¹¹⁾や、SOLAS条約附属書第II-1章と第III章の機関、電気設備、救命設備に関する規則に対する代替設計・配置ガイドライン¹²⁾が承認されるなど、スコープを変化させつつ導入が進められてきた。また、2005年に開始された欧州の研究プロジェクトSAFEDORは、船舶の設計手法にリスクベースの考え方を導入し、結果としてリスクベース船舶設計手法を提案した¹³⁾ ¹⁴⁾。これらの考え方は、やがて、より広くリスクベース設計に適用できる代替物および同等物の承認に関するガイドラインへと受け継がれていく¹⁵⁾ ¹⁶⁾。

自動運航に関しても、国内外の船級協会ガイドラインにより、船舶設計や機器については、従前の規範的な設計の場合と同等の安全性を確保していることを確認するというリスクベース的な立場が優勢であることが分かる¹⁷⁻²⁰⁾。船級協会によっては、承認までの全体プロセスをIMOのガイドライン¹⁵⁾に従って設定しているなど、リスク評価を承認プロセスの主要部分として扱っている他、安全性と信頼性がその船級規則に従う場合と同等以上であれば受け入れる旨を明記しており、リスクベース的な承認であることが分かる¹⁸⁾。

このように、設計の側面では規則の適用に関して一定の理論的な基盤が築かれており、自動運航船を対象としたい船舶設計や機器のニーズに合わせて承認の方法を検討する素地となり得る。

3.2 運航方法、運用方法の観点

これに対し、運航の側面では、リスクベースの歴史的背景や理論的基盤が少なく、議論がやや難しいようである。それでも、設計の場合と同様に、人が運航する場合と自動運航システムが行う場合で、同等の安全性を確保していることを確認することで、人の役割の一部を機械に分担させても良いといえるのではないかと、という期待はある⁶⁾。

自動運航船の場合は、人が行ってきたタスクを自動運航システムによって代替するという運用概念の性質上、運航と設備を切り離して考えられない部分がある。そのため、船級協会ガイドラインにおいても、運航や使用方法の概念を検証することの重要性を指摘する記載が見受けられる¹⁸⁾が、その具体的な評価法までは言及していない。

一方、自動運航船の実船実験を海域で行う事を考慮して、IMOではMASS (Maritime Autonomous Surface Ships) 試験のための暫定ガイドライン²¹⁾が承認された。これによれば、実船実験にあたっては安全性、セキュリティ、環境保護に関するリスクに対処すべきであり、実験に伴うリスクの特定と対

策が求められる。また、予測可能な危険事象については、あらかじめ緊急計画と対策を用意することも必要である。従って、このガイドラインにもとづく試験的な実船運航であれば、リスク管理としては、実証したい自動運航システムを用いた運航についてリスク評価によって主要なハザードを特定して対応し、かつ予測可能な危険事象についてあらかじめ準備を行えば良いということが分かる。

3.3 新しい設計に対するリスク評価の利用

上述の二側面とも、最終的な承認を得るために求められるリスク評価の具体的な道筋は未だ明確化されていない。この点について、第3.1節で触れたIMOの代替物および同等物の承認に関するガイドライン¹⁵⁾をさらに紐解けば、規範的な規則では想定していなかった挑戦的な技術に関しても、従来の規範的な規則に準拠する設計と同等レベルの安全性を備えていることを実証することによって、承認が可能であるとし、そのための方法を述べている。

それによると、同等レベルの安全性を実証するためには、基本的な船舶機能の機能要件と性能基準を確立し、それを当該の設計が満たすか、もしくは、リスク分析を行って全体のリスク評価基準と比較する必要がある。現段階のように、機能要件と性能要件を確立することが難しい状態では、後者の方法に頼ることが考えられる。ただし、この方法では、対象とする自動運航船の全体に関するリスク評価結果を得る必要があり、簡単ではない。また、対比させるべき全体のリスク評価基準についても広く合意された安全目標が存在しないことから、関係者の総意によってこれを定めることが前提となる。

3.4 自動運転車における安全性確保

では、既に認証が開始されている自動車分野の自動運転では、どのような安全目標を用いて安全性の確保を行っているのだろうか。国交省では、米国の自動車技術会 (SAE International) の定義に従って、自動運転化の程度を0~5のレベルによって定義しており、最近認可されたレベル3の自動運転は、システムが全ての動的運転タスクを運行設計領域において実行し、作動継続が困難な場合は、システムの介入要求等に適切に応答することとしている。これにより、一定の条件を満たす間は運転者が負う運転に関する義務の一部が免除されている^{5) 22) 23)}。

国交省の自動運転車向けのガイドライン²³⁾によれば、自動運転車の安全目標は、「自動運転システムが引き起こす人身事故であって、合理的に予見される防止可能な事故が生じないことを確保する」というレベルに定められている。これは、整備不良のような車両の問題や故意の飛び出しのような人為的な

問題ではなく、自動運転システムの機能の検証不足に起因し、かつ人が死傷するような被害が発生する事故について、生じないことを求めている。交通事故は多くがヒューマンエラーによるため、このような安全技術を導入することで安全性の向上につながるの期待はあるが、技術にどこまでの安全性を求めれば良いかは、まだ議論の半ばにあるようである。

新しい安全性評価手法の開発を行うSAKURAプロジェクト²⁴⁾では、“How safe is safe enough?”、つまり「ヒトと比べてどれだけ安全であるべきか」を基本命題とし、これを解決するために高速道路を体系的に整理した32のシナリオにもとづき、本格的なデータ収集と分析などを行っている^{25) 26)}。さらに、受容性のクライテリアについては、図3に示すように、運転機能に従って構成したシナリオと実際の交通データから予測可能な条件を定義し、その中で防止可能な条件を特定する方法で定めようとしている²⁴⁾。定められた条件は、シミュレーション試験や物理的試験のテストシナリオとして用いられる。

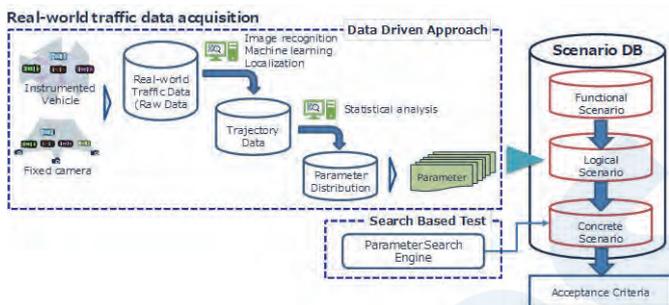


図3 SAKURAプロジェクトにおける自動運転車の安全性確保のためのシナリオ生成プロセス²⁴⁾

4. 自動運航船のためのリスク解析手法の開発

4.1 リスク解析対象としての特徴

第2章で説明したように、一般的なリスク評価のプロセスのうちの重要な工程のひとつはリスク解析、すなわちハザードを特定する工程である。この工程を実施するためには、まず対象が何なのかを明確にする必要がある。これは、解析対象となる技術の目的、構成要素、使用方法などにより明確化できるため、そのような情報を整理する必要がある。対象が明確になることで、ハザード（対象に潜む危険）を特定しやすくなるが、網羅性を求めるのであれば、対象の異なる部分や異なる使用局面におけるハザードを具体的に想起できるよう、これらを適切に定義することが肝要である。

自動運航船を構成するシステムの場合にも、十分に整理された定義が重要となることは同じである。

ただし、これまでにリスク評価を求められてきた船舶システムの多くが機関システムや給電システムといったハードウェアを中心とするシステムであったのに対し、自動運航船の場合にはソフトウェアが果たす役割が多くなっている。さらに、完全自動化による無人化を目指すとしても、それが実現するまでの当面の間は、船内か船外かはともかく、何らかの形で航海士や機関士といった人と作業を分担したり、協業したりする点に大きな特徴がある。

4.2 自動運航システムに対するリスク解析

ソフトウェアで構成される部分が多いシステムについては、部品などの物理的な構成要素に着目する従来のハードウェア向けのリスク解析技術をそのまま適用することが難しい。これは、部品単位で考えた場合、ソフトウェア部分がブラックボックス的な扱いとなってしまいうためである。ソフトウェアを扱おうと思えば、それが行うタスク、すなわち、どのような入力にもとづいて何を計算し、何を出力するのかを考えられるよう定義しておく必要がある。さらに、自動運航船が人を含めたシステムとなることも考慮すると、人やソフトウェアによって行われるタスクを情報収集、情報の整理、解釈、判断、機器の制御といった単位で捉え、それらを担当する構成要素を定義し、構成要素が相互作用を行う集合体として全体システムを定義して理解することが重要となる。また、このような全体システムが運用される局面を定義し、想定する個別の局面に対して挙動を検証していくことも重要である。

このような考え方は、システム理論的なアプローチなどと呼ばれ、代表的な解析手法としては、主に構成要素間の関係に着目するハザード解析手法のSTAMP/STPA (Systems-Theoretic Accident Model and Processes / System-Theoretic Process Analysis)^{27) 28)}などが知られる。この手法はソフトウェアの安全性の問題を主な対象として開発され、航空機分野や他の工学分野、医療分野などに広く用いられている²⁹⁾。自動運航船のリスク解析に対する適用も既に試みられている³⁰⁾。

著者らは、自動運航船を念頭に、人やソフトウェアを含むシステムの定義を明確化し、これを用いてSWIFT手法によるハザード解析を行う技術の確立を目指して研究を進めてきた³¹⁻³⁶⁾。その中で、STAMP/STPAによるシステムモデルでは明示的に扱っていない構成要素の機能や機能の実行に必要な情報を対象システムの定義に含めることの重要性を指摘し、ソフトウェアのモデル化に使用されるUML (Unified Modelling Language) のクラス図を応用して対象を定義してハザードを特定する手法

を提案してきた³¹⁻³³⁾。このうち、図4は、仮想的な自動運航船を、最も概略のレベルでモデル化した構造である³²⁾。この手法では、概略レベルの図に記載された各構成要素が行うタスクと扱う情報をシステム定義図としてモデル化してリスク解析を行う。

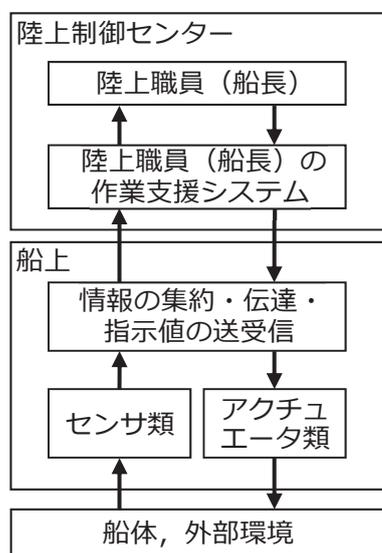


図4 仮想的な自動運航船の概念構造の例³²⁾

また、自動運航船の特徴として、自動運航システムが人のタスクを代替するという、オペレーション上の変更が大きく存在する。そのため、人やソフトウェアなどの構成要素によってタスクが実施される方法や引き継ぎが行われる方法の中にハザードが存在することが考えられる。これらを特定するためには、上述のモデル化手法に加えて、オペレーションを構成する具体的なタスクやその実施主体を定義することで、タスクに着目したリスク解析を行うことが有用と考えられる³⁴⁻³⁶⁾。

自動運航船に投入される技術は、多くの場合、従来の船舶向けに開発されてきた従来の技術の上に構築される。例えば、自動運航システムであれば、運航支援システムのハードウェアやソフトウェアを拡充することで実現されようとしている。仮にその船舶が新造船や新設計であったとしても、具体的に新しい使い方のために「自動化したい」と考える機能が、新たな要素を追加することで実現される。その際に、新しい部分や新しい使い方を的確に把握していくことが、リスク解析において重要である。そのため、当所では、上述のハザード解析手法の開発のほか、このような解析をSTAMP/STPAで行う方法についても、ClassNKと共同研究を進めている。

5. 自動運航船に対するリスク評価へのアプローチ

開発段階の対象物について、リスクを定量的に考えることは、データの不在により不可能な部分が存在する。一方で、自動運航船に関しては、従来の船舶や人の作業について長年蓄積されてきたデータが参照できる部分もある。例えば、海域での事故の発生頻度に関しては従来の船舶によるデータが、船上での作業の成功／不成功に関しては人間信頼性工学分野におけるデータが存在する。リスク評価で参考にできるものをいくつか紹介したい。

5.1 航行に関するリスクの評価

航行によるリスクは、他のリスクと同様に、航行に関連して失われる人命や財産、環境と、その発生頻度を用いて推定する。以下、本稿では主に人命を対象に説明するが、他の被害についても考え方は同様である。

海上保安庁³⁷⁾によれば、国内の船舶事故による死傷者は、漁船やプレジャーボートといった小型船で恒常的に多く発生しており、死傷者を伴う海難に遭った隻数で見てもこれらの二船種は8割以上を占めている。この他に、貨物船等の商船では、発生頻度は少ないながら、一度に多数の人命喪失を伴う事故が見られる。そのような死傷者を伴う海難の種類としては、衝突と単独衝突が半数以上を占めており、航行に関するリスクの中で主要な要因のひとつは、衝突と考えることができるだろう。

衝突によるリスクは、衝突による被害がどの程度であるかを確率的に表すものである。例えば、ある船舶群に関して、衝突がどの程度発生しており、それによりどの程度の被害を受けているかという情報があれば、その船舶群の衝突リスクを算出することができる。これらのうち、発生した各衝突に伴う被害の情報については、人命喪失であれば、運輸安全委員会の船舶事故調査報告書等により情報を得られることが多い。海外では、世界の海難と船舶の情報を集めたIHSデータベース^{*1}を用いて、19年間の事故数や死者数等を取りまとめた報告³⁸⁾も見られ、これを用いて単純計算をすると、一回の衝突事故により平均して0.16人の人命喪失があることが分かる。

次に、衝突頻度、つまり一定の期間内に衝突がどの程度発生するかについては、対象とする船舶群の延べ航行時間と、これに対応する衝突回数を知る必要がある。衝突回数については、国内であれば、上述の報告書等から主要な衝突事故の発生数を把握す

*1 IHS Markit社の海難データベースと船舶データベース

ることができる。一方、延べ航行時間については、現在の技術では正確な算出が困難である。近似的なアプローチとしては、前述のIHSデータベースなどにより船舶として登録されている隻数の毎年のデータから推定^{38) 39)}、AIS（船舶自動識別装置：Automatic Identification System）を用いた航跡データから推定、港湾等への入港実績データから推定、レーダーや衛星写真による実態観測の結果から推定するなどの方法が考えられる。どの方法にも技術的な制約があり、高い精度は期待できないが、概算と理解すれば十分に有用である。

衝突頻度については、このように観測によって精度良く求めることが難しいことを背景に、解析的に求める方法も研究されている。解析的な方法は、航路ごとの交通流の情報から、その中の二隻の船舶が衝突に至る回数を推定するものであり、交通流の情報があれば適用できるため、交通ルールを導入した後の将来の衝突頻度のように、現時点ではデータが取得できない事象などに対応できる利点がある。解析的な方法には幾つかのアプローチがあるが、幾何学的衝突頻度と衝突原因確率の積による推定方法⁴⁰⁾が比較的良く用いられてきたため、簡単に紹介する。

幾何学的衝突頻度は、航行する船舶群の中で二隻が衝突に至るような見合い関係に入る頻度である。この見合い関係は、避航措置を成功させない限り必ず衝突に至る位置と進路の組み合わせにある。見合い関係の発生回数を算出するには、まず観測された航跡から類似のものを集約して「航路」を設定し、次に各航路を使用する船舶の隻数や、航行するタイミング、航路内での位置取りなどの情報を用いて、確率計算やシミュレーション計算を行う。これにより、対象とする見合い関係の発生回数を推定できる。さらに、単位時間あたりに換算することで、幾何学的衝突頻度が得られる。

図5は、AIS航跡データを用いて、東京湾における幾何学的衝突頻度の分布を見合い関係の種類別に推定した例である。ここでは、対象海域を小海域に分割し、各小海域に対して、交通データから幾何学的衝突頻度を計算することで分布を得ている。これにより、航行海域や想定航路によって衝突に至る見

合い関係の発生回数が大きく異なることが分かる。

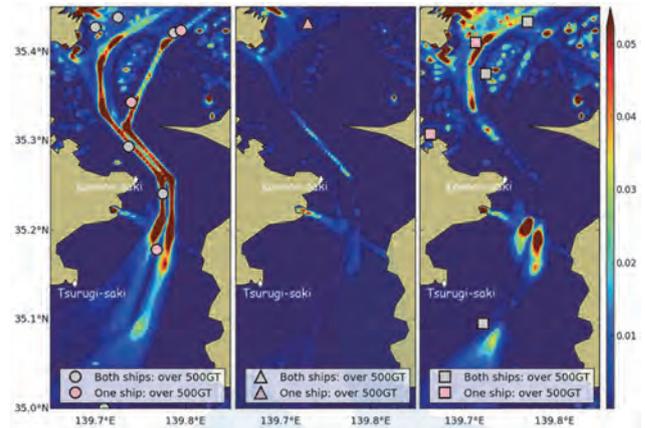


図5 見合い関係の種類別にみた幾何学的衝突頻度分布の推定例(左:追い越し, 中央:正面, 右:横切り)⁴²⁾

衝突原因確率は、衝突に至る見合い関係にある二隻が避航を成功させることなく、最終的に衝突に至る確率である。既往研究の中には、表1に示すように、異なる見合い関係や海域に対して得られた衝突原因確率の推定結果の報告例が見られる^{41) 42)}。この値は、見合い関係の種類や海域の複雑さなどに影響されるほか、時代によって航行支援機器を含めた操船環境が変化してきた影響も受けると考えられる。表から、分離航行などの交通整理が導入されている海域では、概ね 10^{-5} から 10^{-4} の間、つまり成功しないのは、数千回に1回の割合であると分かる。それ以外の海域では 10^{-4} から 10^{-3} 、つまり数百回に1回の割合程度となっている。

ここまでは、海域を考慮して、衝突による被害と発生頻度から衝突リスクを推定する方法を紹介してきた。これ以外にも、海域によらず、船舶の船種や大きさごと、或いは海難の種類ごとに衝突リスクを考えたい場合、つまり、隻年あたりの人命喪失数などを必要とする場合には、前述のIHSデータベースから求める方法がある。例えば、表2は、船種ごとの隻年あたりの死者数をまとめたものであり³⁹⁾、各船種における潜在的な人命喪失数として参照できる。

表1 横切り船における衝突原因確率の推定値の報告例（一部仮訳）

衝突原因確率値	出典	備考
1.2×10^{-4}	Macduff (1974)*	
1.11×10^{-4}	Pedersen (1995)*	TSSなし
9.5×10^{-5}	Pedersen (1995)*	TSSあり
1.3×10^{-4}	Fowler (2000), Fujii (1998), Pedersen (1999)*	
8.48×10^{-5}	Otto (2002)*	好視界
6.83×10^{-5}	Otto (2002)*	VTS海域で好視界
5.8×10^{-4}	Otto (2002)*	狭視界
4.64×10^{-4}	Otto (2002)*	VTS海域で狭視界
$5.10 \times 10^{-4} \sim 6.00 \times 10^{-4}$	Rosqvist (2002)*	フィンランド湾
2.52×10^{-5}	河島 (2021) ⁴²⁾	東京湾（中ノ瀬航路と浦賀水道の周辺）
1.85×10^{-5}	河島 (2021) ⁴²⁾	備讃瀬戸（東、北、南航路及びその周辺）

*Kujaraらのまとめ⁴¹⁾による。

表2 隻年あたりの死者数（1990-2012）*

船種	隻年あたりの死者数
Passenger Ro-Ro Cargo	1.24×10^{-1}
Passenger	1.61×10^{-2}
General Cargo	8.22×10^{-3}
Cruise	7.55×10^{-3}
Bulk Carriers	4.29×10^{-3}
Reefer	4.16×10^{-3}
Ro-Ro Cargo	3.70×10^{-3}
LNG	2.26×10^{-3}
Fishing	2.21×10^{-3}
Car Carriers	2.01×10^{-3}
Large Crude oil	1.68×10^{-3}
LPG	1.34×10^{-3}
Cellular Containerships	1.16×10^{-3}
Total	1.09×10^{-2}

*Papanikolaouらのまとめ³⁹⁾による（一部仮訳）

5.2 自動化システムが対象とするタスクの成功と失敗

第4章で説明したように、船内で人が従来行ってきたタスクのある部分を何らかの新しい自動化システムに担わせることを考える場合、安全性を確認するには、そのシステムが代替タスクをどの程度上手く行うかが重要な指標となるであろう。「上手く行う」という概念は広いが、少なくとも、その自動化システムが行うタスクの成功／失敗確率は把握したいところである。これは、人が行った場合の成功／失敗確率とは、置かれた条件や前提などのコンテキストを完全に一致させることができないため、厳密には人の場合と比較できず、扱いに注意を要するが、システムの得手不得手を知ることが、対象システムの安全に関する検討の際に重要である。

では、比較する対象としての人の成功／失敗確率はどのように求めることができるだろうか。運航における操船作業を認知工学的に分解すると、多くは情報収集、意思決定、行動実行といった要素作業か

ら構成され、これらが反復的に行われながらひとつの作業として成立していることが分かる⁴³⁾。このように分解された作業の成功／失敗確率については、人間信頼性工学分野で古くからデータが蓄積されている。反復的な操船の作業に対して単純に適用することは難しいが、これらの研究成果を参考にすることで理解の助けになると考えられる。

表3に、認知判断プロセスの過程を、観測、解釈、計画、実行に分解した場合の各種エラーの発生確率を各種情報源からまとめた文献⁴⁴⁾から、抜粋を掲載する。これによれば、認知機能の幾つかは 10^{-2} 、すなわち100回に1回よりも大きな誤り確率を持っていることが分かる。特に、解釈において正しくない分析を行うことが、5回に1回程度も発生しているというデータは興味深いところである。

5.3 自動運航システムの失敗やODD逸脱に伴うリスク

リスク評価では、様々なハザードに伴う被害を想定する。これには、自動運航システムによる行動に誤りがあった場合や、自動運航システムが想定した設計上の前提条件（ODD：運航設計領域）から外れた場合を含む。つまり、一般には例外的と思われる状況についても、生じる可能性が十分にある事象であれば、他のハザードの場合と同様にリスクを検討する必要がある。

例外的な状況の場合でも、他の場合と同様に、リスクを把握するためには、発生頻度と被害を知る必要がある。被害については、ハザードから被害に至るまでの過程にもよるが、現時点では、自動運航船であっても、想定外の事象に対しては従来の船舶と同様の対応を予定するケースが多いと考えられる。その場合には、従来の船舶における被害のデータが十分に参考になる。

表3 認知機能の失敗に関する標準値の例
(Hol Inagel⁴⁴⁾によるまとめから抜粋) (仮訳)

観測	
観測対象を誤る	1.0×10^{-3}
特定を誤る	7.0×10^{-2}
観測をしない	7.0×10^{-2}
解釈	
正しくない分析	2.0×10^{-1}
意思決定エラー	1.0×10^{-2}
解釈の遅れ	1.0×10^{-2}
計画	
優先付けの誤り	1.0×10^{-2}
不適切な計画	1.0×10^{-2}
実行	
異なる種類の動作	3.0×10^{-3}
異なる時間の動作	3.0×10^{-3}
異なる対象への動作	5.0×10^{-4}
手順から外れた動作	3.0×10^{-3}
実行し損ない	3.0×10^{-2}

一方、発生頻度に関しては、自動運航システムに原因がある場合とない場合に分けて考える必要がある。自動運航システムに原因がない場合は、被害と同様に、従来の船舶におけるデータを参考にすることで一定の理解が可能である。これに対し、自動運航システムに原因がある場合の発生頻度は、使用するシステムの構成等に依存するため、これらを加味した推定が必要となる。

ここで、例外的な状況として、ある自動運航システムを導入する船舶における火災を想定する。その船舶では火災が発生した場合には、従来の船舶と同様の対応を行うこととする。従来の船舶における事故データの調査報告³⁹⁾によれば、かなり大雑把ではあるが、船舶での火災に伴う被害は、火災の発生あたりおよそ0.33人であること、また、火災の発生頻度は、およそ1000隻年に1回程度であるとされる。被害については、従来の船舶と同様の対応を行うため、その値を参照することとし、発生頻度については、システム構成などを考慮した修正値が必要となる。修正値を得るためには、自動運航船で使用するハードウェアやソフトウェアによる寄与、自動運航システムを使用することに関連する人的過誤による寄与、これらの構成要素間関係による寄与が影響する可能性が考えられる。仮に、発生頻度が従来の船舶の1.1倍になると考えられる場合、この船舶の隻年あたりの火災による人命喪失リスクは、 $(0.33 \times 1/1000 \times 1.1 =) 3.63 \times 10^{-4}$ (人 / (隻・年)) と推定される。なお、この例では、自動運航システムに火災の防御や火災後の対応を行う設計や機能を想定しなかったためにリスクが上昇する計算となった

が、逆に、発生頻度や被害を抑制できる設計や機能を想定する場合には、それを考慮した推定となる。

現実には、これらの寄与分は不確定要素が多く、データも十分に整備されていないため、推定が困難な場合も多いと考えられる。そのような場合には、第2章で述べたように、リスク評価にもとづく意思決定の手段のひとつとして、定量的な評価は実施せずに、半定量的な評価によって広く受容されると考えられるハザードから受容できないハザードまでを数段階に分けることでスクリーニングを行い、重要度が高いと考えられるハザードを選出して、解析チームが受け入れられる対策を施す方法が考えられる。

5.4 さらに高度な自動化システムへの進展

自動車での自動化レベルを参照すると、より高度な自動化レベルでは自動化の範囲が広くなるとともに、人の監視が想定されなくなる。その結果として、安全上問題となりうる懸念事項としては、人が行ってきた状態確認やメンテナンスに相当する作業を新しい自動化システムの運用方法の中で十分に引き継いでいけるのか、また、自動運航システムの運航設計領域から外れた場合のように、自動化システムによる対応が難しくなった場合に、制御を人に戻す方法の確実性を確保できるのか、といったことが挙げられる。

制御を人に戻す方法の確実性に関連する問題の例を、自動運転車の文献に見出すことができる。レベル3の自動運転、すなわち運転者による常時監視を求めないシステムの導入にあたっては、自動運転中に運転者が置かれる条件や状態も新しいハザードとなり得る。つまり、システムが正常に作動していることにより、運転者に覚醒度の低下や運転以外の作業への従事が見られたり、そのようなサブタスクによって運転者の手の位置が制限される、運転者が集中しすぎるなどにより、必要なときに十分対応できない恐れがあり、これを防ぐためには、眠気を催す作業や没入度が高い作業の継続抑制、運転者への運転引継ぎの必要性の確実な伝達、運転引継ぎに必要な時間の確保などが重要であることが指摘されている^{45) 46)}。

船舶の場合においても、制御を人に戻すことを必要とする自動化システムであれば、同様の状況から重大な被害につながり得ることは、十分に想定される。自動化レベルや自動化システムの新しい使用方法を構想するときは、このような新しい観点も考えていく必要があると考えられる。

6. おわりに

自動運航船の実現に向けた機運の高まりに伴い必要とされている自動運航システムのリスク評価に関する技術を概観した。様々な自動運航システムが提案され、これらに対するリスク評価の経験も徐々に蓄積されている。このような経験を共有化していくことで、自動運航船や、今後提案される新しい概念にもとづく船舶に対してもリスク評価を実現し、船舶の安全に寄与していきたい。

参考文献

- 1) Rødseth ØJ and Burmeister H-C: Developments toward the unmanned ship. Proc. of international symposium information on ships-ISIS 201 (2012)
- 2) DNV: ReVolt - next generation short sea shipping, <https://www.dnv.com/news/revolt-next-generation-short-sea-shipping-7279> (2021.9.3参照)
- 3) Rolles-Royce: AAWA project introduces the project's first commercial ship operators, <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2016/pr-12-04-2016-aawa-project-introduces-projects-first-commercial-operators.aspx> (2021.9.3参照)
- 4) 日本財団：世界初，無人運航船の実証実験を開始，<https://www.nippon-foundation.or.jp/who/news/pr/2020/20200612-45056.html> (2021.9.3参照)
- 5) 国土交通省：世界初！自動運転車（レベル3）の型式指定を行いました，https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha08_hh_003888.html (2021.9.3参照)
- 6) 日本船舶技術研究協会：MEGURI2040に係る安全性評価2020年度成果報告書（概要版）（2021）
- 7) HSE: Marine Risk Assessment. Offshore Technology Report 2001/063, Prepared by DNV for HSE, UK. (2001)
- 8) IMO MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2: Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO Rule-Making Process (2018)
- 9) HSE: Reducing risks, protecting people (2001)
- 10) IMO MSC/Circ.829-MEPC/Circ.335: Interim Guidelines for the Application of Formal Safety Assessment (FSA) to the IMO Rule-Making Process (1997)
- 11) IMO MSC.1/Circ.1002/Corr.1: Guidelines on alternative design and arrangements for fire safety (2005)
- 12) IMO MSC.1/Circ.1212: Guidelines on alternative design and arrangements for SOLAS chapters II-1 and III (2006)
- 13) SAFEDOR: Integrated Project SAFEDOR October 2006, http://www.safedor.org/press/SAFEDOR_New_sletter_October2006-Issue1.pdf (2021.9.3参照)
- 14) IMO MSC 86/5/3: Goal-based new ship construction standards Guidelines on approval of risk-based ship design (2009)
- 15) IMO MSC.1/Circ.1455: Guidelines for the approval of alternatives and equivalents as provided for in various IMO instruments (2013)
- 16) 金湖富士夫，篠田岳思：船舶のリスク評価の進展に関する一考察，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第21号，1-4（2015）
- 17) ClassNK：自動運航，自律運航に関するガイドライン（Ver. 1.0）（2020）
- 18) DNVGL: Autonomous and remotely operated ships, DNVGL-CG-0264 (2018)
- 19) Bureau Veritas: Guidelines for Autonomous Shipping, Guidance Note NI 641 DT R01 E (2019)
- 20) ABS: ABS advisory on autonomous functionality (2020)
- 21) IMO MSC.1/Circ.1604: Interim Guidelines for MASS Trials (2019)
- 22) 警察庁：改正道路交通法（自動車関係）の概要，<https://www.npa.go.jp/bureau/traffic/selfdriving/trafficact.pdf> (2021.9.3参照)
- 23) 国土交通省自動車局：自動運転車の安全技術ガイドライン（2018）
- 24) SAKURA Project: Project Info, https://www.sakura-prj.go.jp/project_info/ (2021.9.3参照)
- 25) 永井正夫：自動車の安全安心技術の取り組みについて，RRR Vol.77, No. 1 (2020)
- 26) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議：官民ITS構想・

- ロードマップ2020 (2020)
- 27) Leveson NG: Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety, MIT Press (2012)
- 28) Leveson NG and Thomas JP, STPA handbook, 2018.
- 29) Nancy Leveson's Home Page at MIT <http://sunnyday.mit.edu/> (2021.9.3参照)
- 30) Wróbel K, Montewka J, Kujala P: Towards the development of a system-theoretic model for safety assessment of autonomous merchant vessels, *Reliability Engineering and System Safety* 178, 209–224 (2018)
- 31) 塩莉恵, 伊藤博子, 柚井智祥: 自動運航船のリスク解析手法の構築に向けて, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第30号, 393–396 (2020)
- 32) 塩莉恵, 伊藤博子, 柚井智洋, 石村恵以子, 三宅里奈, 工藤潤一, 河島園子: システムモデリングによるリスク解析手法の自動運航船の概念設計への適用, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第32号, 355–366 (2021)
- 33) 塩莉恵, 伊藤博子, 石村恵以子, 柚井智洋, 三宅里奈, 工藤潤一, 平田宏一, 仁木洋一: 小型実験船「神峰」の遠隔操船システムのモデル化, 第91回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, 167–168 (2021)
- 34) 石村恵以子, 高野慧, 笛木隆太郎, 塩莉恵, 伊藤博子, 柚井智洋, 三宅里奈, 工藤潤一: 仮想の自動運航船を対象としたタスクベースのハザード抽出について, 第91回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, 169–170 (2021)
- 35) 三宅里奈, 稲葉祥梧, 塩莉恵, 石村恵以子, 伊藤博子, 柚井智洋, 工藤潤一, 平田宏一, 仁木洋一: 小型実験船「神峰」の遠隔操船実験に基づくタスク分析, 第91回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, 171–172 (2021)
- 36) 工藤潤一, 柚井智洋, 伊藤博子, 石村恵以子, 三宅里奈, 塩莉恵, 平田宏一, 仁木洋一: 小型実験船「神峰」による遠隔操船実験におけるハザード抽出, 第91回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, 173–174 (2021)
- 37) 海上保安庁: 令和2年海難の現況と対策 (2021)
- 38) de Vos J, Hekkenberg RG, Valdez Banda OA: The Impact of Autonomous Ships on Safety at Sea – A Statistical Analysis, *Reliability Engineering and System Safety* 210, 107558 (2021)
- 39) Papanikolaou A, Bitha K, Eliopoulou E, Ventikos NP: Statistical analysis of ship accidents occurred in the period 1990-2012 and assessment of safety level of ship types, *Maritime Technology and Engineering*, 227–233 (2014)
- 40) 河島園子, 川村恭己, 伊藤博子, 福戸淳司: 輻輳海域における船舶遭遇頻度の推定手法の開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第26号, 195–199 (2018)
- 41) Kujala P, Hänninen M, Arola T, Ylitalo J: Analysis of the marine traffic safety in the Gulf of Finland, *Reliability Engineering and System Safety* 94, 1349–1357 (2009)
- 42) 河島園子, 伊藤博子, 川村恭己: 衝突頻度モデルに基づく衝突原因確率の推定, 日本航海学会論文集, 第144巻, 32–41 (2021)
- 43) 西崎ちひろ, 伊藤博子, 竹本孝弘: 操船者の見張り作業におけるエラーモードの検討, 日本航海学会論文集, 第132巻, 105–113 (2015)
- 44) Hollnagel E: *Cognitive Reliability and Error Analysis Method CREAM*, Elsevier (1998)
- 45) 本間亮平, 若杉貴志, 小高賢二: 高度自動運転における権限移譲方法の基礎的検討 (第4報), 自動車技術会論文集, Vol. 49, No. 2, pp.396–402 (2018)
- 46) 阪田万悠子, 小松原明哲: 自動運転車におけるTORへの対応時間にサブタスクが与える影響についての研究, 人間工学, 第55巻, 2C3-7 (2019)

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。

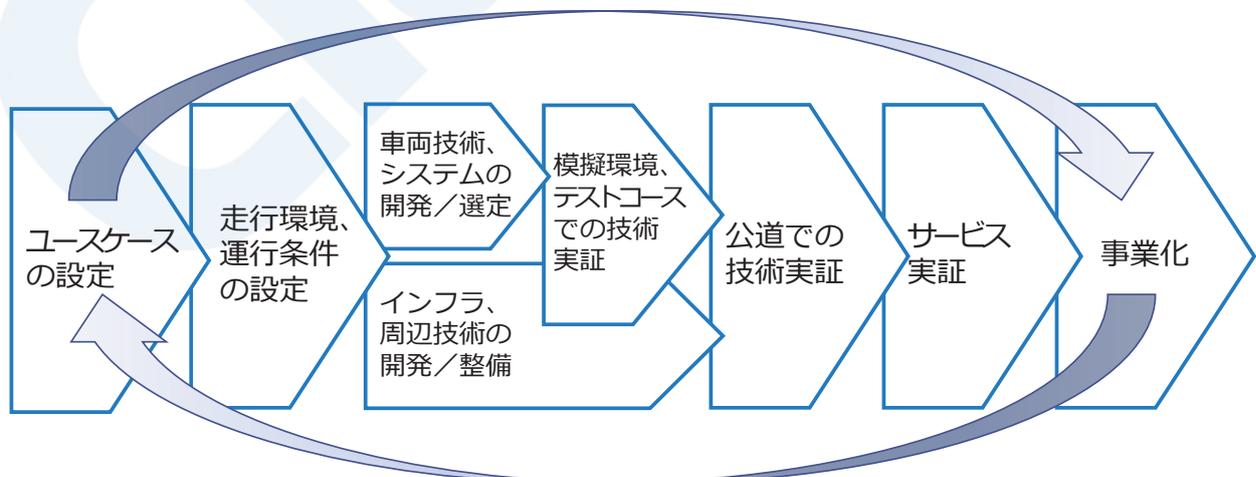


図1 自動運転サービス事業化のプロセス（出典：『自動走行の実現に向けた取組報告と方針』Version5.0）

*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。

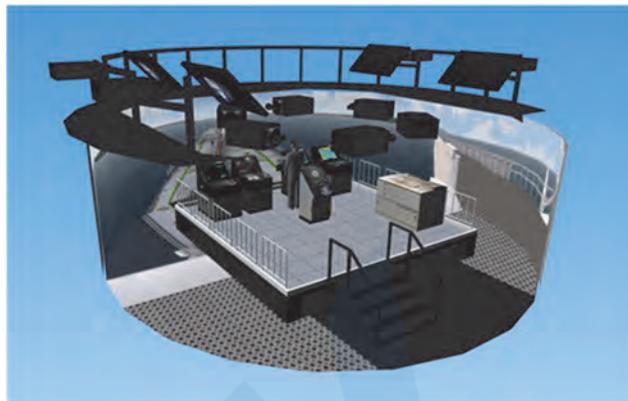


図2 操船シミュレータイメージ (2021年3月作成)

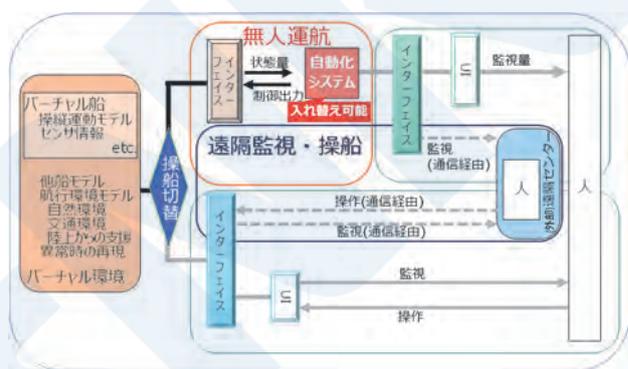


図3 操船シミュレータの概念図

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。

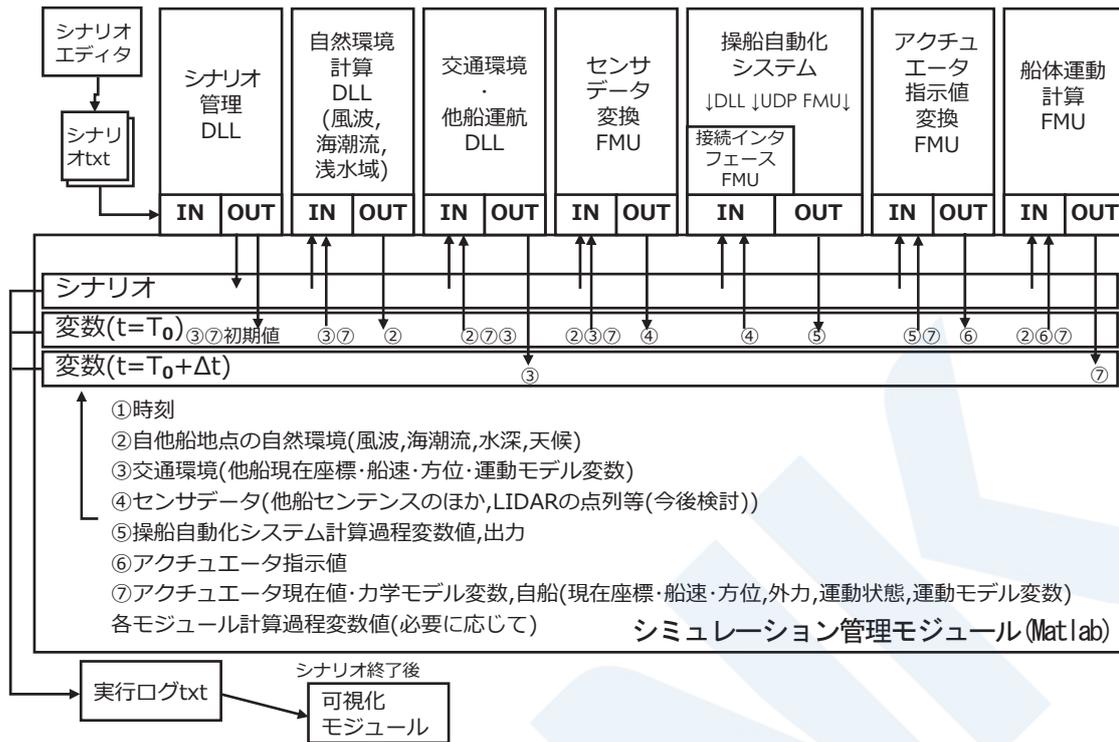


図4 ファストタイムシップシミュレータの動作概要

- 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。

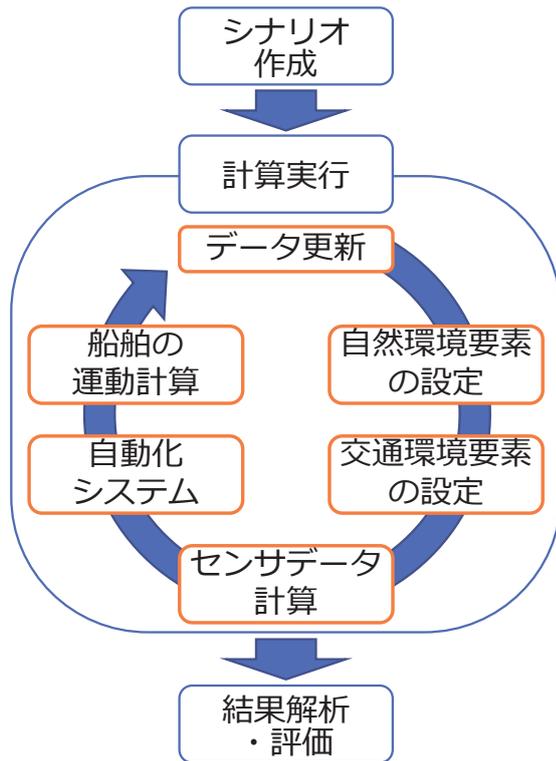


図6 シミュレーション実施手順

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²⁾。

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³⁾。

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 ¹²⁾	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 ¹³⁾	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 ¹⁴⁾	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 ¹⁵⁾	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 ¹⁶⁾	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 ¹¹⁾	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⁴⁾
- 4) 海難事故例からシナリオを抽出⁵⁾

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⁶⁾。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⁷⁾，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^{8) 9)}。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¹⁰⁾，OZTを利用した評価等¹¹⁾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)

自動運航船の自動化レベルについて

福戸 淳司*

1. はじめに

現在、急速に進展したICTやセンサ技術を背景に、航行の安全性の向上と海上での労働環境の改善を目的に自動運航船の研究開発が進んでおり、日本のみならず世界各国で実用化に向けた実証実験等が行われ、数年以内に実用化される勢いである。日本においても、2019年より日本財団の助成のもと、MEGURI2040プロジェクト（無人運航船の実証実験にかかる技術開発共同プログラム）が進められており、2021年度末までに、同プロジェクトに参加した5つのコンソシアムで6隻の無人運航船の実証が行われる。

一方、こうしたシステムの実用化においては、社会に受け入れられることが重要であり、受容性を高め普及させるためには、自動運航船を知ってもらい、自動運航船を安全なものとして理解してもらう必要がある。（一財）日本船舶技術研究協会は、無人運航船の実用化を支え、その社会における受容性を高め、普及を支援するため、2020年度より4年計画で、日本財団の助成のもと、MEGURI2040プロジェクトと連動して、「無人運航船に係わる安全性評価事業」を実施している。本事業では、MEGURI2040プロジェクトの実証実験の事前評価及び安全評価を行う安全評価環境の整備を行うとともに、無人運航船の実現時に必要となる安全上の要件を取りまとめ、自動・遠隔及び無人運航を統一して取り扱うガイドラインを策定する事となっている。

ここまで、無人運航船あるいは自動運航船といった言葉を使ってきたが、この言葉からイメージされる船舶あるいは操船のイメージは必ずしも固まっていない。例えば、無人運航船についても、無人とは何を意味しているのか？、運転時に船員の介入はあるのか？等、人により想定しているイメージが異なる。特に、人との関わりを考慮した操船の形態には、手動操船から、完全自動操船まで多様な形態があり、開発や評価の対象となる自動操船（運転）システムがどの形態であるのか等システムのイメージについて関係者間で共通の認識を持つ必要がある。

このため、本報告では、自動化システムとこれを

用いる運転員との関わりを定義する自動化レベルとその要件について報告する。

2. 制御モードと自動化レベルについて

一般に、船舶の操船等制御対象を望む状態に移行・保持するようなタスクを運転員が実施する際は、運転員は制御対象の情報を自身の五感を通じて収集し、収集した情報を基に状況を認識し、実行すべき行動を判断する。次に、制御システムを通じて実行内容を制御対象のアクチュエータに指示し制御対象の行動変化をもたらす。このループを繰り返すことによりタスクを実現する。さらに、制御対象が大きい場合あるいは遠隔にある場合は、制御対象の情報は自身の五感の他、センサで収集し表示器に統合表示して得る事となる。この制御ループは、制御対象、センサ、情報表示器（ディスプレイ）、運転員、制御器（コントローラ）及びアクチュエータから構成される。自動化はこのループの中に制御システムが入り、運転員に代わり、センサ情報の統合表示や行動判断及びその行動を実現する操作指示を行う。

この制御には、導入される制御システムと人間の関わりにより手動から完全自動までいくつかの段階がある。Sheridanは、遠隔ロボットの監視制御（Supervisory control）の研究等を通じて、図1に示す制御モード¹⁾を定義している。

図中(a)は、「手動制御モード」の状況を表す。図中(b)は、制御システムがループ中に入り情報の収

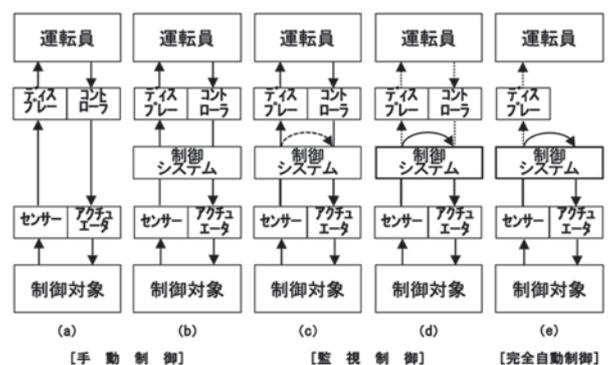


図1 制御モードの範囲¹⁾

* 一般財団法人 日本船舶技術研究協会

集・表示を行うと共に運転員が設定した制御コマンドをアクチュエータに伝えるが、制御自体は運転員が行う。(c)及び(d)は制御の一部を制御システムが担うもので、制御システムで小さいループを形成しており、(c)は、運転員のループが主、制御システムのループが補助となっており、(d)では、制御システムのループが主、運転員ループが補助となっている。この制御モードは、「監視制御モード」と呼ばれており、運転員は、制御対象と制御システムの動作を監視し、必要に応じて、制御コマンドを出すことにより、制御システムの制御に介入して制御目標を実現する。最後の(e)は、「完全自動制御モード」で、運転員は、情報表示器を介して制御対象と制御システムの動作の監視はできるが、制御システムへの介入はできない。この制御モードの考えは、運転員がどのように制御に関わっているかを表す指標となる。

さらに、Sheridanは、自動制御システムと運転員の関わりを示すレベルとして、10段階の自動化レベル¹⁾を示した。この自動化レベルは、運転員が与えられる情報と取り得る操作方法を中心にまとめられている。表1にこの自動化レベルを示す。

表1 Sheridanの自動化レベル^{1) 2)}

自動化レベル	定義
1	システムの支援なしに、全てを人が実行。
2	システムは全ての選択肢を提示し、人はその内の1つを選択して実行。
3	システムは有効な少数の選択肢を提示。それらのいずれかを実行するか否かは人が決定し、全てを人が実行。
4	システムは可能な選択肢の中から1つを選びこれを人に提案。それを実行するか否かは人が決定し、全てを人が実行。
5	システムは1つの案を人に提示。人が了承すれば、システムが実行。
6	システムは1つの案を人に提示。人が一定時間内に実行中止を指令しない限り、システムはその案を実行。
6.5	システムは1つの案を提示すると同時に、その案を実行。
7	システムが全てを行い、何を実行したかを人に報告。
8	システムが全てを決定・実行。人による問い合わせがあれば、何を実行したかを報告。
9	システムが全てを決定・実行。何を実行したかを人に報告するのは、報告の必要性をシステムが認めた時のみ。
10	システムが全てを決定・実行。

なお、表1には、自動化により引き起こされる驚きを緩和する目的で追加したレベル6.5を加えた11段階の自動化レベル²⁾を示す。

ここで、人との関わりで大きく変わる段階としては、以下がある。

- (1) レベル1と2の間で、制御の方針決定の参考となる支援情報の提供の有無。
- (2) レベル4と5の間で、人による制御の実行から、システムによる制御に移行。
- (3) レベル6と7の間で、人による介入手段がなくなると共に、システムは制御結果の報告のみを行う。
- (4) レベル9とレベル10の間では、人への報告さえも行わなくなる。

制御モードの観点から見ると、レベル1からレベル4までが手動制御モード、レベル5からレベル6までが監視制御モード、レベル6.5以降が完全自動制御モードとなる。

このSheridanの自動化のレベルは、航空機や原子力プラントの運転の自動化についてのヒューマンファクタの検討に利用されている他、米国NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) の自動化レベル2および3の自動運転概念のヒューマンファクタの検討³⁾においても、最も広く使用されている自動化システムの分類法として紹介されている。このように、Sheridanの自動化のレベルは、手動制御から完全自動制御までをカバーし、経験の少ない無人運航船の自動化レベルの設定に際し、その定義および定義の設定時に考慮すべき事項の検討に資すると考えられる。

3. 他の輸送機関の自動化レベル

ここでは、船舶以外の自動化レベルとして、自動車の運転自動化レベルおよびドローンの飛行レベルについて報告する。

3.1 自動車の運転自動化レベル

自動車の運転自動化レベルは、2010年代の初めから2015年頃まで、German Federal Highway Research Institute (BASt)⁴⁾、National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)⁵⁾、Society of Automotive Engineers (SAE)⁶⁾等の機関で独自に作成されていた。

2016年になると、NHTSAおよびEuropean Road Transport Research Advisory Council (ERTRAC) は、SAEの文書 SAE J3016で定義された運転自動化レベル (LoDA : Level of Driving Automation) を採用するとの判断があり、以降、自動運転システ

ムの運転自動化レベルは、世界的にSAEのレベルが採用されるようになった。

3.1.1 SAEの運転自動化レベル

SAEの最初の運転自動化レベルは、2014年にSAE J3016 (2014) ⁶⁾として、陸上の自動車を対象に発表された。

運転自動化レベルは、運転自動化システムの分類法で、運転員と運転自動化システムの相互の役割の違いで、レベルを分類しており、SAE J3016 (2014) ⁶⁾では、表2の6つの分類になっている。

表2 SAEの2014年度版運転自動化レベルの概要

運転自動化レベル	定義
運転員が環境監視	
LoDA 1 手動	運転員が、全ての動的運転タスクを行う。
LoDA 2 運転員支援	システムが操舵操作か加減速のどちらかを運転支援し、残りの動的運転タスクを運転員が実施する。
LoDA 3 部分自動	システムが操舵操作と加減速のどちらも運転支援し、残りの動的運転タスクを運転員が実施する。
自動運転システムが環境監視	
LoDA 4 条件付き自動	いくつかの運転モードでシステムが全ての動的運転タスクを行う。緊急時は運転員が介入。
LoDA 5 高度自動	運転員が介入要求に応答しない場合でも、いくつかの運転モードで全ての動的運転タスクを行う。
LoDA 6 完全自動	全ての運転モードで、全ての動的運転タスクをシステムが全て操作。

表中の「運転モード」とは、運転シナリオのタイプを表し、高速道路走行や渋滞運転等が挙げられる。また、「動的運転タスク」(DDT: Dynamic Driving Task)は、自動車を運転するために必要な機能を表し、例として加減速、レーン保持等が挙げられる。

なお、SAE J3016は、過去2回の改訂があり、第3版が2021年4月に公開された。これまでの主な追加事項としては、以下が挙げられる。

- LoDAへのフォールバック機能 (DDT Fallback) の関連付け
- 自動化システムである自動運転システム (ADS: Automated Driving System) の遠隔制御を含む機能の明確化
- 自動化システムの限界と限界を超えた時の対応を自動化レベルに組み込むための、運用設計ドメイン (ODD: Operational Design Domain) の概念の導入

- 障害物およびイベント検出・対応 (OEDR: Object and Event Detection and Response) サブタスクの概念の導入
- 運転における3つの主要な役割であるユーザー、運転自動化システム、およびその他の車両システムとコンポーネントについての詳細記述の追加

LoDAを分けるファクタは、追加した項目をもとに、下記のようにまとめることができ、表3に示す2021年に改定されたSAEの運転自動化レベルの定義⁷⁾には取り込まれている。

- 運転自動化システムが、DDTの縦方向または横方向の車両運動制御サブタスクを実行するかどうか。
- 運転自動化システムが、DDTの縦方向と横方向の両方の車両運動制御サブタスクを同時に実行するかどうか。
- 運転自動化システムがDDTのOEDRサブタスクも実行するかどうか。
- 運転自動化システムがDDTフォールバックも実行するかどうか。
- 運転自動化システムがODDによって制限されているかどうか。

表3 SAEの2021年版運転自動化レベルの概要

運転自動化レベル	定義
LoDA 0 運転の自動化なし	アクティブセーフティシステムによる支援も含めた、DDT全体の運転員による運転。
LoDA 1 運転支援	運転自動化システムが動的運転タスクの内の横方向または縦方向の車両運動制御サブタスクをODD範囲内で実施し、その他のタスクを運転員が実施することによる持続的な運転。
LoDA 2 部分的な運転自動化	運転自動化システムが動的運転タスクの横方向および縦方向の車両運動制御サブタスクをODD範囲内で実施し、運転員が障害物検出タスクを実施するとともに運転自動化システムを監視制御する持続的な運転。
LoDA 3 条件付き運転自動化	運転自動化システムが全ての動的運転タスクをODD内で実施し、フォールバック要員が運転自動化システムの介入要求の他、他のシステムの不具合にも対応することによる持続的な運転。
LoDA 4 高度な運転自動化	運転自動化システムが全ての動的運転タスクとフォールバックをODD内で実施することによる持続的な運転。
LoDA 5 完全な運転自動化	運転自動化システムが全ての動的運転タスクとフォールバックを実施することによる持続的な運転。

こうした分類の考え方は、a)やb)等自動車特有の項目もあるが、自動運航船の自動化レベルを検討する上で、重要であり、一部の船級のガイドラインには取り込まれている。

3.2 無人航空機の飛行レベル

現在、無人航空機（人を乗せない航空機・回転翼飛行機の内、遠隔操縦または自動操縦により飛行させることができる物）の低価格化と高性能化に伴い、回転翼飛行機である「ドローン」の普及が進んでおり、無人での貨物輸送の担い手として、大きな期待がかけられている。

このドローンの利用促進と安全確保の観点から、ドローンの自動化レベルにあたる飛行レベル⁸⁾が、平成28年4月に開催された「小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会」で設定された。

図2に、無人航空機の飛行レベルを示す。この飛行レベルを決めるファクタとしては、以下の3つが挙げられている。

- (1) 操縦方法：遠隔操縦か？、あるいは自動・自律操縦か？
- (2) 目視範囲：飛行領域が目視範囲内（範囲外であっても補助者がいる場合は範囲内となる。）か？、あるいは目視範囲外か？
- (3) 有人地帯：飛行区域が有人地帯か？、あるいは無人地帯（第三者が立ち入る可能性の低い山、海水域、河川、湖沼、森林等）か？

飛行レベルはこの3つのファクタの組み合わせにより、以下の4つの飛行レベルが設定されている。

レベル1：目視視界内の操縦飛行

レベル2：目視視界内の自動・自律飛行

レベル3：無人地帯での目視外飛行（補助者配置無し）

レベル4：有人地帯（第三者上空）での目視外飛行（補助者配置無し）

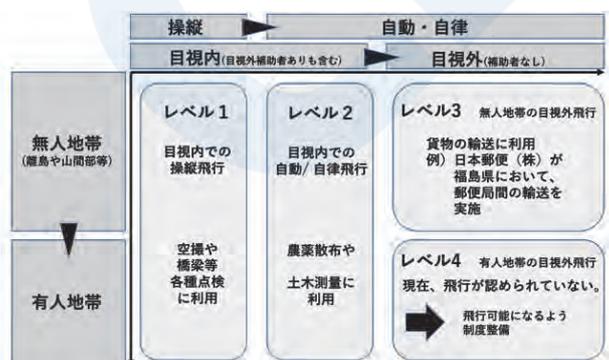


図2 無人航空機の飛行レベル⁹⁾

2021年現在、日本の航空法は、以下の空域でドローンを飛行させる場合、安全措置を講じて国土交通省の許可を得る必要がある。

空域A 空港等の周辺の上空の空域

空域B 地表又は水面から150m以上の高さの空域

空域C 国勢調査の結果を受け設定されている人口集中地区の上空

現在、飛行レベル4は、空域Cにあたり飛行を認めていないが、今後のドローンの有効活用が望まれている。このため、飛行レベル4をリスクの高い飛行カテゴリーとして設定し、現行の飛行の許可・承認制度を合理化・簡略化してドローンの利用促進を進めるとともに、必要な安全性を確保するため、機体認証及び操縦者の操縦ライセンス制度の創設、操縦者が遵守すべき共通的な運航ルールの確立が進められている⁹⁾。

この無人航空機の飛行レベルの特徴としては、操縦方法として、遠隔操縦と自動・自律操縦を区別するとともに、目視の範囲であるかどうかを区別していることが挙げられる。こうした考え方は、今後、自動運航船の自動化レベルを考える際に、遠隔操縦をどのように扱うかについての示唆を与える。

4. 船舶の自動化レベル

ここでは、いくつかの組織で検討されている船舶および各種舶用機器の自動化レベルについて、その概要を示す。

4.1 IMO

国際海事機構（IMO）は、安全性および経済性を向上すると期待される自動運航船（MASS：Maritime Autonomous Surface Ship）の開発プロジェクトの増加を考慮して、自動運航船の設計者や所有者等に、明確で一貫性のある規制の枠組みを提供する準備として、2018年より自動運航船に関するIMOの諸基準の論点整理（RSE：Regulatory Scoping Exercise）が行われ、その結果¹⁰⁾は、2021年開催の第103回海上安全委員会に報告され承認された。この活動の中でいくつかの自動化のレベルが示された。

4.1.1 IMOの諸基準の論点整理のための自動化の程度

自動運航船に関するIMOの諸基準の論点整理に先立ち、この論点整理を各機関で整合性を持って実施するため、暫定的に自動運航船の定義と自動化の程度（Degree of Automation）が設定された。以下に、自動運航船（MASS）の定義と自動化の程度の暫定案を示す。

自動運航船の暫定定義：

Maritime Autonomous Surface Ship (MASS) is defined as a ship which, to a varying degree, can operate independent of human interaction.

自動化の程度の暫定定義：

Degree One：自動化されたプロセス処理機能と意思決定支援機能を持った船舶
船員が、船上システムおよび機能を操作・制御するために乗船する。

Degree Two：船員が乗船する遠隔制御船
船舶は、船外から操作・制御される。船員を船内システムや機能の操作に使用できる。

Degree Three：船員が乗船しない遠隔制御船
船舶は、船外から操作・制御される。船員は船内にはいない。

Degree Four：完全自律船
船上システムが意思決定と行動判断ができる。

この自動化の程度を決めるファクタとしては、以下の2つが挙げられた。

- (1) 操船形態：手動操船、遠隔操船、自動操船の別
- (2) 船員搭乗の有無：船上に船員が搭乗しているか？

なお、この自動化の程度については、諸基準の論点整理をする際、安全な運用と規制を検討するためには、より詳細な自動化の程度に改善すべきとの意見もあったが、この議論の結論を得るには時間がかかるため、論点の整理の議論においてはこの自動化の程度をこのまま使用し、論点の整理が終了した後で、改めて、検討することとなった。

4.1.2 その他の提案された自動化レベル

前の項の自動化の程度その他、IMOの諸基準の論点整理の議論の中で、いくつか自動化レベルが提案された。

1つは、オーストラリア他4カ国からの共同提案で、諸基準の論点整理のための自動化の程度の補強を目的とした提案¹¹⁾であった。この提案では、自動運航が、社会的、倫理的に受け入れられるためには、自動運航船といえども人間に最終的な制御と責任があるべきとの考えをベースにしており、自律システムは適切な資格を持つ人間の監督と責任の下にとどまる監視制御 (Supervisory Control) であるべきと主張している。

自動化のレベルを決定するファクタとして、技術的な自動化のレベルと人間による運用管理が挙げられ、これをベースとして、自律化と制御のレベルを

設定した。具体的には、以下に示す技術的な自動化レベルを4段階に、運用管理を2段階に設定し、この組み合わせで自律化と制御のレベルを定義している。

技術的自動化レベル**A0**：手動

単純なタスクと機能のための個別システムレベルの自動化を含む、船舶のシステムと機能の手動操作と制御。

A1：委任

各種機能、判断、行動には、運転員の許可が必要。運転員は、どの段階でもシステムへの介入が可能。

A2：監視

各種機能、判断、行動に、運転員の許可は不要。運転員には、システムが行った全ての決定が常に通知されると共に、どの段階でもシステムへの介入が可能。

A3：自律

緊急時または船舶システムがODD外にある場合、システムが運転員に通知。各種機能、判断、行動に、運転員の許可は不要。どの段階でもシステムへの介入が可能。

運用管理**B0**：資格のある船員は船上に不在

人による意味ある監視および制御は、遠隔から実施。

B1：資格のある船員が乗船

人による意味ある監視および制御を行う船員が乗船。

自律化と制御のレベル (Levels of Autonomy and Control) は、表4に示すように技術的自動化レベルと運用管理レベルのマトリックスとして整理される。例えば、表中のA2-B0は、船舶は監視レベルA2で動いており、資格のある船員が遠隔地から操船し

表4 自律性と制御のレベル

		運用管理	
		B0：資格のある船員不在	B1：資格のある船員乗船
自 技 術 的 自 動 化 レ ベル	A0：手動		A0-B1
	A1：委任	A1-B0	A1-B1
	A2：監視	A2-B0	A2-B1
	A3：自律	A3-B0	A3-B1

ている状況B0であることを示す。

この自律化と制御のレベルは、2020年に欧州海上保安機関（EMSA）で実施された「自動運航船のリスクと規制の問題点に関する研究」¹²⁾でも検討対象の設定に使用されており、同研究では、A3-B1（船上の船員が自律レベルのシステムで運航）と、A2-B0（遠隔から監視レベルのシステムで運航）の自律化と制御のレベルの船舶を対象に、新しく生まれるリスクと規制の問題点の検討を行った。

もう1件はISOの活動で、現在、自動運航船の概念等をより適切で曖昧さの少ない伝え方を提供するため、基本的な用語と概念の国際標準の策定を計画しており、IMOの第100回海上安全委員会（MSC100）において、自律化の度合（Degree of Autonomy）のさまざまな定義を比較するために使用できる一般的なフレームワークを提案¹³⁾している。この提案では、自律化のレベルを特定する3つのファクタとして、操作の複雑さ、自動化レベル、人間の存在をあげており、これに加えて人間の責任、タイミングの遅れが加えられている。

ここでは、詳細は割愛するが、基本的な考え方は、最新の自動車の運転自動化レベルの考え方であるSAE J3016⁷⁾を踏襲していると思われる。

4.2 ロイド船級協会の自動化レベル

ロイド船級協会は、他の船級に先駆けて2016年に自動運航船のガイドライン¹⁴⁾を発表し、この中で自動化レベルが定義された。ロイド船級協会では、自動運航船のガイドラインに先立ち、ICTやサイバーシステムを装備したサイバー対応船のガイドラインを発表し、安全性・品質・信頼性を確保する包括的な認証手順を提供した。自動運航船は、このサイバー対応船の1つと位置付けられている。また、自動化レベルは、自動運航船に対して作成されており、航海のみならず、機関運用、各種情報サービスについても適用される。

以下に、7つの自律化レベル（AL：Autonomy Level）を示す。

自律化レベル

AL0：手動-自律機能はなし

- 全ての行動と意思決定を運転員が実行。

AL1：船内の意思決定支援

- 全ての行動を船内の運転員が実行。
- 意思決定支援ツールは、運転員にオプションの提示等を行い、行動の選択に影響を与えることができる。

AL2：船内および船外の意思決定支援

- 船内レベルの全ての行動は船内の運転員が実行。

- 意思決定支援ツールは、運転員にオプションの提示等を行い、行動の選択に影響を与えることができる。
- 情報は、船内または船外から提供される場合がある。

AL3：活動的な人間参加型自動化（‘Active’ human in the loop）

- 船内レベルの意思決定と行動は、人間の監視下でシステムが自律的に実施。
- 影響の大きい行動決定については、運転員による介入が可能。
- 情報は、船内または船外から提供される場合がある。

AL4：人間参加型自動化 監視制御による

- 意思決定と行動は、人間の監視下でシステムが自律的に実施。
- 影響の大きい行動決定については、運転員による介入が可能。

AL5：完全自律（アクセス可）

- ほとんど監視されずシステムにより意思決定と行動が行われる運転。

AL6：完全自律（アクセス不可）

- 全く監視されずシステムにより意思決定と行動が行われる運転。

この自律化レベルを分けるファクタとしては、

AL0とAL1を分ける意思決定支援システムの有無、

AL1とAL2を分ける船外からの情報の有無、

AL2とAL3を分ける行動の実施主体の人間からシステムへの移行、

AL4とAL5を分ける人間の介入の可否および

AL5とAL6を分ける人間によるシステムへのアクセスの可否

が挙げられる。

また、制御モードとしては、AL0からAL2までが手動制御モード、AL3とAL4が監視制御モード、AL5とAL6が完全自動制御モードとなる。

4.3 DNVの自動化レベル

DNVでは、2018年に、自動運航船および遠隔操縦船のガイドライン¹⁵⁾を発表し、この中で自動化レベルを定義している。DNVでは、自動化レベルはそれが使用されるコンテキストにより異なると考え、高度な観察、分析、判断が必要となる航海作業の自動化レベルと、自動支援と自動操作の機能に分かれる機関運用作業の自動化レベルをこのガイドラインでは示している。ここでは、航海作業の自動化レベルを紹介する。

DNVでは、CONOPS / HAZIDの一部として設定

された航海の運用要件と危険性に基づいて、人間がやるべきタスクとタスク等を実施する場所の特定を行い、以下の航海機能の自動化のレベルを定義した。

航海機能の自動化のレベル

M：手動操作機能

DS：意思決定支援機能

DSE：条件付きシステム実行機能を備えた意思決定機能

- ・システムによる行動の実行前に人間の許可が必要。
- ・Human in the Loopと呼ばれる。

SC：自己制御機能 (Self-controlled function)

- ・システムが操作を実行。
- ・運転員による行動のオーバーライドが可能。
- ・Human on the Loopと呼ばれる。

A：自律機能

- ・人間の介入なしに、システムが行動を実行。

この自律化レベルを分けるファクタとしては、

Mと**DS**を分ける意思決定支援システムの有無

DSと**DSE**を分ける行動実行の主体の人からシステムへの移行と行動実行前の人間の許可の要否

DSEと**SC**を分ける行動実行前の人間の許可からオーバーライドへの移行

SCと**A**を分ける人間の介入の可否

が挙げられる。この内容は、ロイド船級協会のファクタと重なるものが多かった。

また、上述の航海を対象にした自動化レベルの例は、自動運転車のガイドライン⁷⁾の内容に沿って作成されたとのことで、船舶と自動車の特性の違いによる影響は検討する必要があるものの自動運転車のガイドライン⁷⁾の内容を、自動運航船のガイドラインに取り込む検討をすることは、重要である。

4.4 Bureau Veritasの自動化レベル

Bureau Veritasは、2019年に自律型輸送のガイドライン¹⁶⁾を発表した。このガイドラインは、輸送の自動化を強化するシステムやさまざまな程度の意思決定と行動を実行できる自動化システムを備えた船舶、関連する遠隔制御センタおよび海上推進システムを対象としている。こうした機器やシステムが動作する環境を人間の関与を含めて表現するため、「自動化の程度」、自動化システムに対する「直接制御の程度」および「遠隔制御の程度」の3つを定義し、この3つの程度の組み合わせで、自動化システムの状況を表現した。

以下に、3つの内容を示す。

自動化の程度

A0：人間が操作

- ・人間が全ての意思決定をし、機能を制御。
- ・乗組員は乗船している。
- ・システムあるいは船舶は情報の収集はできるが、人間に代わって情報の分析、意思決定および操作の実行はできない。

A1：人間主導

- ・人間が意思決定と行動を実施。
- ・システムまたは船舶は、情報の取得、情報の分析、および行動の提案を実行できるが、人間に代わって意思決定し、操作を実行することは不可。
- ・人間を、船内（乗組員）または船外の遠隔操作センタ（運転員）に配置できる。

A2：人間に委任

- ・人間はシステムが下した決定を拒否できる。
- ・システムまたは船舶は、情報の取得、情報の分析、および行動の開始はできるが、人間による確認が必要。
- ・人間を、船内（乗組員）または船外の遠隔操作センタ（運転員）に配置できる。

A3：人間の監視制御

- ・人間は常に意思決定と行動について知らされており、いつでもコントロールすることができる。
- ・システムまたは船舶は、人間の監督下で情報の取得、情報の分析、および行動の開始はできる。人間による確認が不要。
- ・人間を、船内（乗組員）または船外の遠隔操作センタ（運転員）に配置できる。

A4：完全自動

- ・人はいつでもコントロールすることができる。
- ・システムまたは船舶は、人間の介入や監督無しに、情報の取得と分析を実行し、意思決定を行い、操作を実行できる。システムは、緊急の場合を除いて、人間に通知せずに機能呼び出す。
- ・人間を、船内（乗組員）または船外の遠隔操作センタ（運転員）に配置できる。

直接制御の程度

DC0：直接制御なし

- ・システムまたは船舶を監視および制御したり、システムエラー時に対処するための乗組員不在。

DC1 : 利用可能な直接制御

- 乗組員が乗船しており、システムの警報等に対処できるが船内の制御ステーションには人がいない場合がある。

DC2 : 不連続な直接制御

- システムまたは船舶は、船内の制御ステーションの乗組員によって監視および制御される。ただし、監視と制御は短期間中断される場合がある。
- 乗組員は、システムからの警告に対応して制御を行う準備ができており、船内の制御ステーションを常に利用可能。

DC3 : 完全な直接制御

- システムまたは船舶は、船内の制御ステーションの乗組員によって、常に監視および制御される。

遠隔制御の程度**RC0** : 遠隔制御なし

- 船外の遠隔操作センタに運転員不在。

RC1 : 利用可能遠隔制御

- 船外の遠隔操作センタに運転員がおり、システムの警報等に対処できる。
- 制御ステーションに人がいない場合がある。

RC2 : 不連続な遠隔制御

- システムまたは船舶は、船外の遠隔操作センタの運転員によって監視および制御される。ただし、監視と制御は短期間中断される場合がある。
- 運転員は、システムからの警告に対応して制御を行う準備ができており、船内の制御ステーションを常に利用可能。

RC3 : 完全な遠隔制御

- システムまたは船舶は、船外の遠隔操作センタの運転員によっていつでもアクティブに監視および制御されます。

このガイドラインでは、情報収集、情報分析、意思決定、行動の実行といった内容で構成されるタスクをこなす際の人間とシステムの関わりを表現する自動化の程度と、船上および遠隔地での運転員の在・不在や2章で述べた制御モード、および常時監視の有無等を表す制御の程度で、自動化システムの形態を表現している。

この自動化の程度を分けるファクタとしては、

意思決定支援システムの有無

行動実行前の人間の許可の要否

人間の介入機能の有無

人間への報告の有無

が挙げられる。

このファクタは、ロイド船級協会のファクタと重なるものが多かった。

また、制御の程度を分けるファクタは、直接制御および遠隔制御ともに、

運転員の有無

人のいない時間帯の有無および多寡

であった。

制御の程度での常時監視については、ここで初めて明確に記述されていたが、自動車の自動運転のレベル3でも一時的な常時監視の中断が許されており、船舶の自動化レベルの検討には加えるべきと考える。

4.5 日本海事協会の自動化レベル

日本海事協会は、2020年に自動運航、自律運航に関するガイドライン Ver.1.0¹⁷⁾を発表した。このガイドラインは、船上作業における認知、判断、対応、といった人間の意思決定プロセスの一部もしくは全てが自動化あるいは遠隔制御されたシステム、並びに、これらを搭載した船舶を対象としている。

このガイドラインでは、自動化システムおよび遠隔制御システムを分類するため、以下の4つの指標を用いている。

- (1) 自動化の範囲
- (2) 遠隔制御の範囲
- (3) フォールバックの実行主体
- (4) 限定領域の内容

この内、3つの指標 (1) 自動化の範囲、(2) 遠隔制御の範囲、(3) フォールバックの実行主体 については、分類例を示されているので、以下に示す。

自動化の範囲**レベル0** :

- 人間が全てのサブタスクを実行
- サブタスクの実行主体は人間

レベルI :

- 一部の意思決定サブタスクをコンピュータシステムが実行
- サブタスクの実行主体はコンピュータおよび人間

レベルII :

- 全ての意思決定サブタスクをコンピュータシステムが実行
- サブタスクの実行主体はコンピュータシステム

遠隔制御の範囲**レベル0** :

- 船上の乗組員が全てのサブタスクを実行
- サブタスクの実行主体は船上の乗組員

レベルI :

- ・一部の意思決定サブタスクを遠隔で実行
- ・サブタスクの実行主体は船上の乗組員および遠隔制御施設の遠隔運転員

レベルII :

- ・全ての意思決定サブタスクを遠隔で実行
- ・サブタスクの実行主体は遠隔制御施設の遠隔運転員

フォールバックの実行主体

レベル0 :

- ・フォールバックを人間が実行
- ・フォールバックの実行主体は人間

レベルI :

- ・フォールバックを人間とコンピュータシステムシステムが分担して実行
- ・フォールバックの実行主体は人間およびコンピュータシステムシステム

レベルII :

- ・フォールバックをコンピュータシステムシステムが実行
- ・フォールバックの実行主体は人間およびコンピュータシステムシステム

この分類では、各指標のシステムの性質と実行主体が定義されており、自動化システムの分類をする際に用いられている。

ただし、この分類は、各要素をわかりやすく説明するために個別に設定したもので、実際のシステムは、この3つの要素の指標の組み合わせで分類できるとしており、例えば、「一部の意思決定サブタスクをコンピュータシステムが実行し、フォールバックを人間が実施する」システムの場合、表5のような組み合わせがあることを示している。

表5 自動化システムと遠隔制御システムおよびフォールバックの組み合わせの例

分類			タスクの実行主体				フォールバックの主体	
			船内		RCC			
AC	RC	FB	Human	CS	Human	CS	Human	CS
I	0	0	○	○			◎	
I	I	0	○				◎	
I	I	0		○	○		◎	

AC : 自動化の範囲

RC : 遠隔制御の範囲

FB : フォールバックの実行主体

RCC : 遠隔制御施設

CS : コンピュータシステム

◎ : 全て実施

○ : 分担して実施

日本海事協会のガイドラインには、DNVと同じく自動化のレベルは、一意に決められるものではなくタスクや状況等により変わるものとの立場から、自動化の範囲、遠隔操作の範囲、フォールバックの実行主体に対して、抽象的な対象への基本的な分類法として示されていた。このため、レベルを分けるファクタは明確には規定されていなかった。

また、フォールバックの実行主体を加えたのは、海事分野の自動化レベルの表現では、新しい考えであった。

4.6 American Bureau of Shipping (ABS) の自動化レベル

ABSは、2021年に自律と遠隔制御の機能のガイドライン¹⁸⁾を発表した。このガイドラインは、全ての船舶およびオフショアユニットを対象としている。また、このガイドラインでカバーされている自律機能は、船舶およびオフショアユニットの操作を可能にする機能に焦点を当てており、無人操作を意味するものではなかった。

このガイドラインが適用される対象としては、航海 (NAV)、操船 (MNV)、係留 (MOR)、着棧 (DOC)、推進器 (PRP)、補機 (AUX)、環境保護 (ENV)、貨物操作 (CGH)、バラスト操作 (BAL)、工業プロセス (IND) の多岐にわたる機能が設定されており、自律レベルはこの全ての機能について適用される。また、各機能はコード化されており、以下で示す自律機能のノーテーションの表示時に使用される。

このガイドラインでは、自律性を「スマート」、「半自律」、「完全自律」の3つレベルで定義しており、これに基づきノーテーションも設定している。以下に自律のレベルの定義を示す。

自律性のレベル

自律レベル1 : スマート : システムによる人間の機能の拡張

- ・システムは、システムの異常の検出、診断、予測、決定/アクションの代替等の受動的な意思決定支援を提供。
- ・ノーテーション : SMART

自律レベル2 : 半自律 : 人間によるシステムの機能の拡張

- ・スマートな基盤上の構成されたシステムと人間の意思決定および行動の組み合わせによって管理。
- ・ノーテーション : AUTONOMOUS

自律レベル3 : 完全自律 : システム機能への人間の関与なし

- ・システムは意思決定を行い、自律的に行動実施。
- ・人間は監視機能のみを実行。システムに介入するオーバーライド機能あり。
- ・ノーテーション：AUTONOMOUS

また、このガイドラインでは、人の関わりを明確にするため、操作監視レベルが定義されている。操作監視レベルは、運転員の作業場所を2箇所（船内あるいは遠隔地）、運転員に要求される注意の度合いを3段階で定義し、この組み合わせで定義される。

以下、要求注意レベルを示した後、表6に操作監視レベルを示す。

要求注意レベル

要求注意レベル1：継続的な監視

- ・機能の運用全体を通じて、(中断なしの)継続的な操作員による監視。

要求注意レベル2：間欠的な監視

- ・機能の運用全体を通じて、設定された間隔で運転員による監視が必要。間隔の長さや運転員による監視を確実にする手段は、船舶運航者によって決定され、運航概念文書に記載。

要求注意レベル3：必要ベースの監視（システム通知または操作モードに対応）

- ・機能の操作全体を通して、運転員による監視は必要に応じてのみ実施。詳細は船舶運航者が決定し、運航概念文書に記載。

この要求注意レベルは、対象機能とともに、ノーテーションAUTONOMOUSの属性値となっており、例えば、AUTONOMOUS (NAV,OP1,RO1) と記述する航海関係の船上および遠隔地の運転員による

表6 操作監視レベル

操作監視レベルとその符号	求められる注意レベル	運転員作業場所
OP1	要求注意レベル1：継続的な監視	船上
OP2	要求注意レベル2：間欠的な監視	船上
OP3	要求注意レベル3：必要ベースの監視	船上
RO1	要求注意レベル1：継続的な監視	遠隔地
RO2	要求注意レベル2：間欠的な監視	遠隔地
RO3	要求注意レベル3：必要ベースの監視	遠隔地

継続的な監視がいる操作であることを示している。

本ガイドラインでは、自律のレベルの他に、要求注意レベルと運転員の作業場所（船上か遠隔地か）を組み合わせる人間と機械の関わりを示していた。

自律のレベルは、比較的簡単に記述している他、要求注意レベルは、Bureau Veritasの直接・遠隔制御の程度の内容にあたり、自動運航船を考える上で、重要な検討項目である人による常時監視の有無の段階的な状況を示しており、重要な検討課題である。

5. 自動化レベルの分類のファクタ

今回示した自動化レベルを俯瞰してみると、自動化レベルの多くは、自動化システムを、情報収集、認識、判断、行動の各タスクをループして行う運操作業を支援・代行するシステムとしてとらえており、それぞれの自動化システムが支援・代行をどこまでやるかで、自動化のレベルを設定している。

また、自動化レベルには、手動制御から完全自動制御までのレベルがあり、具体的には、手動、委任、監視、完全自動の4つのレベルの制御モードをベースに多くの自動化レベルが設定されていた。このレベル分けは、Sheridanが示した制御モードの手動制御から監視制御、完全自動制御までの制御法の変遷に対応しており、比較的複雑なシステムでも、この制御モードを使用することにより、容易に説明できる。特に、人がどのような役割を担っているかあるいは制御の主体がどのレベルで変わるのかが分かりやすく表現されているので、Sheridanが示した制御モードは自動化システムの動きの概要を適切に理解するためには良い指標と考えられる。

この制御モードをベースとした自動化レベルを分類するファクタとしては、以下が挙げられる。

- ・支援情報の提供の有無
- ・行動前の人への許可
- ・制御実施主体の人からシステムへの移行
- ・介入手段の有無
- ・制御結果の人への報告の有無

次に、制御モードに関連する項目以外で自動化レベルを分けるファクタとしては、以下がある。

- ・常時監視の要否
- ・運転員の有無と所在地

常時監視の要否は、自動車の自動化レベル3では、携帯電話の利用等間欠的な監視を許容している他、ABSのガイドラインでは人による監視の度合いを常時監視、間欠監視、必要ベースの監視に分けている等、比較的後に発表された船級協会のガイドラインの中には、示されている。

もう1つのファクタとして、運転員の有無と所在地がある。運転員の所在は、運転員が船上にいる場合といない場合、遠隔制御センタにいる場合とない場合があり、この組み合わせで4ケースある。これも多くの船級の自動化レベルで、運転員の監視の度合いと組み合わせて分類に用いられている。また、船舶の遠隔操縦については、現在目視の範囲内にあるかについての言及はないが、今後特に無人の小型船の検討をする場合加える必要がある。

最後に、自動車の自動化レベルには、表3に示す通り自動化システムを作成する上で必要となるConOps等で示された動的運転タスク（DDT：Dynamic Driving Task）、運用設計ドメイン（ODD：Operational Design Domain）の概念、障害物およびイベント検出対応（OEDR：Object and Event Detection and Response）等のサブタスクとしての概念等が含まれており、いくつかの船級協会ではこの概念を踏襲している。こうした概念を、取り込むことによるコストについては考慮が必要であるが、こうした概念は、今後自動化レベルを検討する上で重要となると考える。

6. まとめ

本報告では、自動運航船およびこれを実現する各種自動化システムの機能と人間との関わりについて、共通の理解を得ることを目的とした自動化レベルについて、過去の検討内容を調査するとともに、自動化が進んでいる自動車の自動化レベルと無人航空機（ドローン）の飛行レベル、および現在までに各種海事関係機関およびいくつかの船級協会から示された自動化レベルについて、その概要と自動化レベルを分類するファクタについて取りまとめた。このファクタは、各システムへの人間の関わり方の違いを明確にし、常時監視や非常時の介入等人間に求められるタスクも明らかにしている。

これにより、これまでの自動化レベル作成の経緯や、自動化レベルで示される自動化システムの機能が明確になり、自動化システムを表現する時に有用な分類法が整理できた。

自動車の自動化レベルに見られるように、自動化システムが進化していくにつれて、自動化レベルにも多様なファクタが追加され進化していくと考えられ、今後船舶の自動化レベルの検討の際にこの調査内容が活用されればありがたい。

謝辞

本調査は、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」事業に資するため、2020年度事業の成果の一部に加筆する形で実施しました。このような機会をいただいたこと、公益財団法人日本財団殿に感謝いたします。

参考文献

- 1) Thomas B. Sheridan: Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control, The MIT Press, 1992, ISBN: 9780262515474
- 2) T. Inagaki, N. Moray, and M. Itoh: Trust, Self-Confidence and Authority in Human-Machine Systems, Proceedings of 7th IFAC Symposium on Analysis, Design and Evaluation of Man Machine Systems (MMS'98), Kyoto, Japan, 16-18 September 1998
- 3) Trimble, T. E., Bishop, R., Morgan, J. F., & Blanco, M. (2014, July): Human factors evaluation of level 2 and level 3 automated driving concepts: Past research, state of automation technology, and emerging system concepts. (Report No. DOT HS 812 043). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration
- 4) Gasser T, Arzt C, Ayoubi M, Bartels A, Bürkle L, Eier J, Flemisch F, Häcker D, Hesse T, Huber W, Lotz C, Maurer M, Ruth-Schumacher S, Schwarz J, Vogt W (2012): Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, Wirtschaftsverlag NW, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen F83, Bergisch Gladbach
- 5) National Highway Traffic Safety Administration – NHTSA: Preliminary statement of policy concerning automated vehicles, 2013, Washington, DC
- 6) Society of Automotive Engineers - SAE international: Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems, SAE J3016 (2014)

- 7) Society of Automotive Engineers - SAE international: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, SAE J3016, 2021
- 8) 小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会：利活用と技術開発のロードマップと制度設計に関する論点整理（案），2016，
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujin/ki/kanminkyougi_dai4/siryoushu.pdf（参照：2021年9月3日）
- 9) 国土交通省航空局：無人航空機のレベル4の実現のための新たな制度の方向性について，2020，
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujin/ki/kanminkyougi_dai15/siryoushu.pdf（参照：2021年9月3日）
- 10) IMO: MSC.1/Circ.1638 (2021), Outcome of the Regulatory Scoping Exercise for the use of Maritime Autonomous Surface Ships (Mass)
- 11) IMO: MSC 100/5/6 (2018), Comments on document MSC 100/5
- 12) European Maritime Safety Agency (EMSA): SAFEMASS Study of the risks and regulatory issues of specific cases of MASS, Summary Report, Report Part1 and Report Part2 (2020),
<http://www.emsa.europa.eu/publications/item/3892-safemass-study-of-the-risks-and-regulatory-issues-of-specific-cases-of-mass.html>（参照：2021年9月3日）
- 13) IMO: MSC 100/5/1 (2018), Proposal for a classification scheme for degrees for autonomy
- 14) Lloyd's Register: Cyber-enabled ships ShipRight procedure – autonomous ships, 2016
- 15) DNV: CLASS GUIDELINE Autonomous and remotely operated ships, DNVGL-CG-0264, 2018
- 16) BUREAU VERITAS MARINE & OFFSHORE: Guidelines for Autonomous Shipping, GUIDANCE NOTE NI 641, 2019
- 17) Class NK: Guidelines for Automated / Autonomous Operation on ships (Ver.1.0) - Design development, Installation and Operation of Automated Operation Systems / Remote Operation Systems -, 2020
- 18) American Bureau of Shipping: Guide for Autonomous and Remote Control Functions, 2021

船舶の火災安全対策への取り組み

機関開発部，材料艙装部

1. はじめに

船舶の火災安全対策はSOLAS条約において規定されており，これまで大規模な火災事故が発生するたびに改正が重ねられてきた。近年の大型化するコンテナ運搬船に対しても条約改正が行われてきたものの大きな損害を被る火災事故が複数発生しており，更なる安全性の向上のためにIMOにおいて見直しが行われようとしている。また，現在審議されているロールオン・ロールオフ旅客船の火災安全対策に加え，リチウムイオン電池を搭載する自動車や水素，天然ガス，メタノールやエタノール等の新燃料を利用する自動車の火災に対する安全要件についてもIMOで問題提起され，今後検討が予定されている。これとは別に，ガソリンを燃料とする自動車を主に運搬する大型の自動車運搬船においても火災事故が報告されており，国土交通省の主導によって，国内検討会において安全対策の検討が行われ，「固定式泡消火装置の効果的使用のための改善策」がとりまとめられた。

本稿では，コンテナ運搬船及び自動車運搬船に関し，IMOで議論されている火災安全対策の動向について解説するとともに，今後の条約改正に先んじて，コンテナ運搬船を運航する船主や船舶管理会社が自発的に進める追加の火災安全対策の動きに対応した本会の取り組み及び自動車運搬船に対する国内検討会での火災安全対策について紹介する。

2. コンテナ運搬船の火災安全対策

2.1 IMOの動向

コンテナ運搬船の大型化に伴いこれまでIMOでは火災安全性を向上・確保するためにSOLAS条約の改正を重ねてきているが，依然として火災事故が発生している現状を考慮して，更なる安全性を高めるための検討が提案されている。具体的には，第102回海上安全委員会（MSC102）に，コンテナ運搬船の火災安全対策に関する新たな要件の策定を提案する新規作業計画案について，マーシャル諸島，シンガポール，世界海運評議会WSC及び国際船級協会連合IACSの共同提案文書，並びにバハマ，ドイツ，国際海上保険連合IUMI及びボルチック国際海運協議会BIMCO等の共同提案文書がそれぞれ提出された。

これらの提案は，2021年5月開催の第103回海上安全委員会（MSC103）において，コンテナ運搬船の火災安全対策に関する新規作業計画として承認され，翌年開催の第8回船舶設備小委員会（SSE8）から，コンテナ運搬船の貨物倉及び甲板上の貨物区域に対する安全対策の具体的な審議が開始される。この計画では，SOLAS II-2章及び火災安全設備コード（FSSコード）の改正審議は2025年までに完了し，2028年1月の発効が目標となっている。



図1 コンテナ運搬船

2.2 コンテナ運搬船の貨物区域における火災安全対策

IMOにてコンテナ運搬船の火災安全対策で指摘されている問題点を以下に概説する。これらの検討項目を中心にIMOにおいて審議される予定である。

(1) 貨物倉の固定式消火装置

貨物倉には固定式炭酸ガス消火装置が設置されているが、貨物の性状等により、この固定式消火装置を作動させた場合でも鎮火に至らず、当該貨物倉の内部に漲水しなければならない場合がある。この場合には、例えば固定式消火装置の2次的措置や代替の消火装置が必要となる。

(2) 甲板上貨物区域の消火設備

暴露甲板上に積載されるコンテナの火災に対応するため、2016年1月1日以降に建造される船舶には、水噴霧ランス及び移動式水モニタを備えることが要求されている。しかしながら、コンテナの囲壁を貫通してコンテナ内部へ射水する水噴霧ランスに対する性能基準がなく、それぞれの装置で材料や貫通の方法等が異なる。このため、水噴霧ランスには一定の効力を担保させる基準が必要である。性能基準がある移動式水モニタにあっても、搭載が要求される数が十分でなく、または効果的な配置の要件が不足している可能性がある。これらに加えて、遠隔操作ができる水系の消火装置が必要である可能性がある。

(3) 消防員装具の通信設備

すべての船舶には、2018年7月1日以降の最初の定期的な検査までに、消防員のための通信手段を備えることが要求されている。しかしながら、当該通信手段では、通信範囲や効果的な消火活動のためのハンズ・フリー機能の要件等が欠けている。

(4) 火災探知

現行SOLASの要求により設置されている貨物倉内の試料抽出式煙探知装置（煙を感知するもの）では、コンテナ内部の火災が伝播している段階では熱の伝播によって火災を探知することができず、火災が伝播した後に、コンテナ囲壁の変形や破壊により貨物倉内に煙が発生した時点で火災を探知する。また、当該装置では火災が発生しているコンテナの位置を特定することは難しい。火災の早期発見のため、例えば、追加の熱探知装置の要件等を検討する必要もある。

(5) コンテナ貨物

特に危険物貨物にあっては、熱を切っ掛けに化学的な反応を引き起こし、火災や爆発の原因となる。

これらを防ぐためには、コンテナ内部の貨物の情報が正しく伝えられ、船舶でも貨物の種別等を把握することでコンテナ積載を適切に行う必要がある。一方で、貨物の情報が正確でない場合に、これが原因となり火災が発生又は拡大する可能性がある。貨物の識別、梱包、情報伝達等を含むコンテナ貨物の扱い方について、改めて議論する必要がある。

2.3 本会の取り組み

前述の通り、コンテナ運搬船の火災安全対策はIMOにおいて審議が開始される場所である。一方で、これに先んじてコンテナ運搬船を運航する船主や船舶管理会社の一部において、自発的な対応を進める意向があり、実際に独自に追加の火災安全対策を施す動きもある。

IMOにコンテナ運搬船の火災事故の分析結果を提示したIUMIは、独自に火災安全強化策のコンセプト（図2参照）を示している。詳しくは、2017年に発表されているIUMI Position Paper “Firefighting systems on board container vessels”を参照して頂きたい。また、このコンセプトに近い設計思想の大型コンテナ運搬船も既に建造されている。

このような動向に合わせて、任意に追加された火災安全対策の評価を要望する声がある。これらの要望に応えるため、本会は、例えば以下のような追加の火災安全対策を行った船舶を評価するため、船級符号へ付記できるような規則面の整備を検討している。

(1) 貨物倉の追加の火災探知装置

例えば、従来の試料抽出式煙探知装置に加えて、サーモグラフィカメラや光学撮像を用いた熱探知装置や、火災が発生したコンテナを探知するための温度監視装置を備えた船舶に対して、当該追加装置の設置を示す付記。

(2) 追加の水噴霧装置

コンテナ火災の伝播を防ぐために、貨物倉、デッキハウス端壁、エンジンケーシング端壁、コンテナラッシングブリッジ等にノズルを配置した水噴霧消火装置を備えた船舶に対して、当該追加装置の設置を示す付記。（図3参照）

(3) 貨物倉への漲水

貨物倉に漲水できる手段を備え、漲水した場合の強度や復原性に問題が無いことを確認した船舶に対して、当該追加措置が実施できることを示す付記。

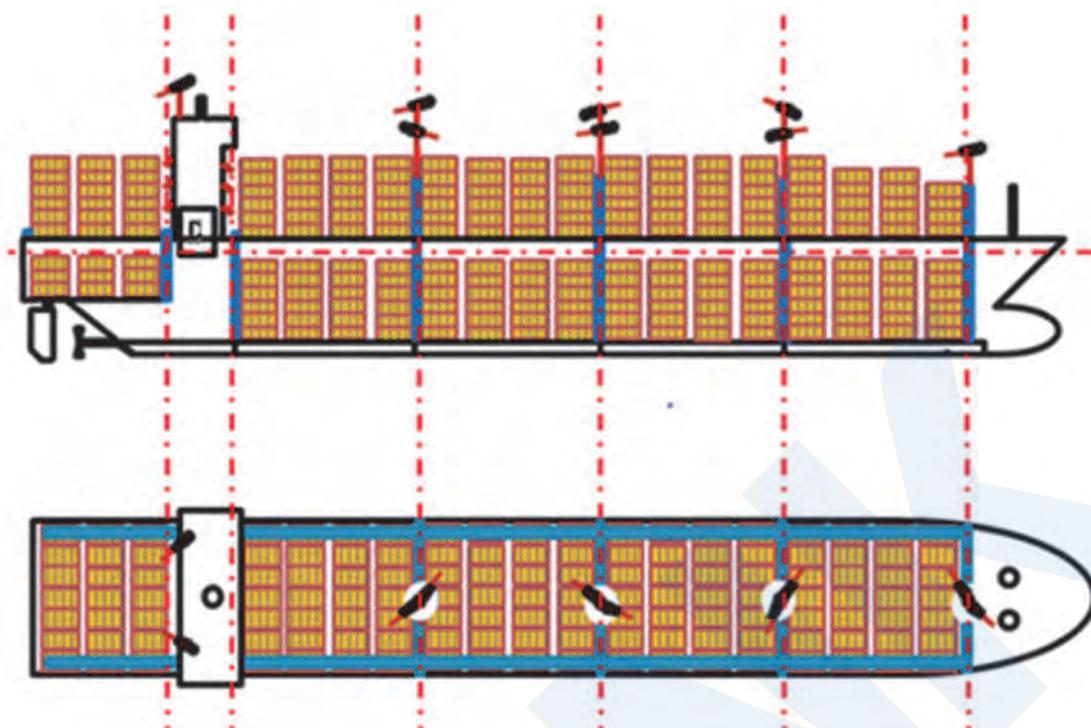


図2 甲板上的の水噴霧装置のイメージ (IUMIによる提唱)



図3 水噴霧装置のイメージ



図4 大型自動車運搬船

3. 大型自動車運搬船の火災安全対策

3.1 IMOの動向

IMOでは、2020年3月に開催されたIMO第7回船舶設備小委員会（SSE7）において、リチウムイオン電池を搭載する自動車の火災に対する安全要件の開発が提案された。

本件に関しては、リチウムイオン電池だけでなく他の新エネルギー自動車も含めた幅広い検討が必要との結論となり、2021年10月開催のIMO第104回海上安全委員会（MSC104）において今後の作業計画が協議される予定となっている（執筆時点）。これは現在審議されているロールオン・ロールオフ旅客船だけの問題ではなく、新エネルギー自動車を積載するSOLAS条約が適用となるすべての船舶が対象となる可能性があり、今後の動向に注目する必要がある。

3.2 日本国内における安全対策検討会

3.2.1 火災事故発生時の対応策の検討

IMOで審議が予定されている新エネルギー自動車を積載する車両区域・ロールオン・ロールオフ船の議論が開始される一方で、現在就航中の、ガソリンを燃料とする自動車を主に運搬する大型の自動車運搬船においても、車両積載区域での火災事故が近年複数発生している状況を踏まえ、国土交通省を中心として、同種事故発生時の被害軽減を目的に安全対策の検討が行われた。

前述の通り、IMOでは新エネルギー自動車（リ

チウムイオン電池を搭載する車両等）の火災安全に関する議論が開始されているが、貨物として積載されている車両のうち、新エネルギー自動車はまだ高い割合にあるとは言えないこと、報告されている火災事故に関してもガソリンを燃料とする自動車が貨物の大宗を占めていたこと、また、車両積載区域で一番発熱量の大きい物が自動車であること等を踏まえ、発火源は不明であったが、この検討は通常ガソリンを燃料とする自動車を発火源と仮定して実施された。

具体的には、2019年12月に一般財団法人 日本船舶技術研究協会（JSTRA）を事務局として、国内関係者（船社、造船所、火災探知機／泡消火装置メーカー、国立研究開発法人、大学、国等）を構成メンバーとする「自動車運搬船の火災事故再発防止検討会」を設置して上述の安全対策を検討した。なお、本会も委員として参画した。

この検討会では、まず、実際の火災事故に関する情報収集及び火災延焼／消火シナリオの検証を実施し、事故による被害を抑制するための課題を抽出した。続いて、この結果に対し、実験・調査を実施して、具体的な改善方法を策定した。実施した実験は自動車運搬船に特有の甲板裏の構造による煙探知への影響を調べるための火災探知性能の実験と、甲板間高さが低くかつ車両が密接して配置される自動車運搬船の車両区域内における車両の燃焼・延焼のメカニズムを探るための車両燃焼実験である。例として、図5及び図6に車両燃焼実験の様子を示す。



図5 車両燃焼実験の写真：水平配置の様子



図6 車両燃焼実験の写真：上下配置の様子

検討会では、その結果を「固定式泡消火装置の効果的な使用のための改善策」としてとりまとめ、同省は2021年6月10日付で一般社団法人 日本船主協会に対し、同改善策等を活用して、同種船舶の安全性向上への一層の自主的な取り組みを行うよう要請し、その事実が本会を含む登録船級協会に対し通知された。

本会は船級協会として安全な運航確保を追求するとの立場から当該検討会に積極的に貢献してきたことも踏まえ2021年6月11日にClassNKテクニカルインフォメーションTEC-1239を発行し、大型自動車運搬船の運航に携わる船主殿及び管理会社殿に対して同改善策の導入の検討を御願した。

3.2.2 被害低減に向けた改善措置

前述の「固定式泡消火装置の効果的な使用のための改善策」は、現在多くの大型自動車運搬船の車両積載区域に設置される固定式泡消火装置のより効果的な使用を通じて、火災事故の被害を低減することを目的としている。当該措置は、ガソリンを燃料とする自動車を用いた車両燃焼実験等で得られた新しい知見を踏まえ、具体的な安全対策をとりまとめたものであり、ここでその内容を紹介する。

車両積載区域内で発生した火災は、初期消火により消火ができなかった場合は、車両から車両へ延焼していくが、延焼により火災規模が一定以上に拡大してしまうと、装備されている固定式消火装置では延焼を食い止めることが困難になる。以下に挙げる各対策は、SOLAS条約及びFSSコードで要求されている固定式泡消火装置をより効果的に機能させることを目的としたものである。

(1) 対象船舶

車両積載区域の固定式泡消火装置を使用する大型

自動車運搬船。ここでは総トン数6万トン程度を想定し、積載状態は満載状態とする。

(2) 基本方針

前述の検討会で得られた知見を基に、固定式泡消火装置をより効果的に使用するために起動までの目標時間を設定し、これを達成するためにソフト及びハード面で対策を行う。

- 国際安全管理規則（ISMコード）に基づく安全管理システム（SMS）に関連した「消火対応手順書」等に規定されている「泡消火装置の起動に係る手順」に、警報発報から固定式泡消火装置の作動ボタンを押すまでの目標時間（標準時間を14分とする）を設定し、船員に周知すること。

なお、上記標準時間は目安であり、実際の目標時間は各船舶の仕様や構造及び貨物の種類や積載状況等に応じて船舶所有者や運航者等が自ら設定するものである。また、この改善策で想定している総トン数6万トン程度以外の場合においても、火災現場の確認等に要する時間を各船の大きさ等を勘案して適正に設定することにより、本改善策は同様に適用可能である。

また、ここでいう14分とは、表1の各対策の実施を前提とし、車両燃焼実験の結果から得られた自動車の延焼速度も考慮の上で、警報が発せられてから最もブリッジから遠い最下層の貨物層まで船員が移動し火災を現認するのに10分、防火部署発令に1分、人員の点呼に3分を要するとした、その合計時間である。

- 上述の目標時間を達成するために、表1に示すソフト及びハード面の対策を現存船及び新造

- 船において実施し、消火対応の方針を策定（又は見直し）する。
- 実施するソフト及びハード面の対策を前提にして、消火栓からの消火射水（以下、消火栓消

火）の省略に関する事項など、「消火対応手順書」に記載すべき船員による消火活動に関連する事項を明記する。

表1 固定式泡消火装置の効果的な使用のための対策一覧*1

項目	内容
実施すべき項目	発電機の自動（遠隔）起動（消火装置起動後の電源容量の迅速な確保）*2
	通風筒蓋の閉鎖省略／常時開放又は自動起動化（消火装置起動までの時間の短縮化）*2
	消火栓消火の省略（同上）*3
その他実施が推奨される項目（オプション）	カメラによる貨物倉の遠隔監視（火災探知遅延の防止、火災発生場所確認の迅速化）
	RFID (Radio Frequency Identification) タグ等による人員安全確保（人員点呼に要する時間の短縮化）
	車両甲板天井部の各升溜まりに1個の煙探知器の設置（火災探知の遅延の防止）
	貨物倉の仕切り追加（被害拡大抑制、消火装置作動時の心理的障害の除去）*4

*1. 表1で示す対策は、前述の通り現時点で輸送の大宗を占めるガソリンを燃料とする自動車を積載した状況におけるものであり、電気自動車や燃料電池自動車の混載までを想定したものではない。

*2. 通風筒蓋開閉と発電機自動（遠隔）起動の代替措置として、船員を複数チームに分けて対応する場合は、ソフト面の対応とすることは可能。ただし、固定式消火装置作動までの目標時間に影響を及ぼさないことを条件とする。

*3. 消火器や消火栓消火によって確実に消火できる場合はこの限りでない。具体的には、船橋近傍における火災の場合、乗組員が巡回中に偶然発見したボヤ火災の場合を想定する。十分な数の船員が乗船し複数チームに分けて対応する場合は、現場確認と並行して消火栓消火に取り組むことは可能とする。ただし、固定式消火装置作動までの目標時間に影響を及ぼさないことを条件とする。

*4. この項目は、新造船に対してのみ適用を想定する。

4. おわりに

本稿では、コンテナ運搬船及び自動車運搬船に対するIMOの動き、コンテナ運搬船に関する本会の活動や取り組み及び自動車運搬船に関する国内検討会での火災安全対策について、それらの現状を紹介した。

今後、コンテナ運搬船や自動車運搬船に対する火

災安全対策関連の新要件については、IMOにおいて審議が進められて行くこととなるが、これには数年の時間が必要となる。本会は継続的にその動きを注視し、必要に応じて独自もしくは海事業界と共同で安全対策を検討していく所存である。

新しく策定された火災安全対策は、本会のガイドライン等を通じて公表し、業界への貢献を考えている。

実船計測データ及び機械学習を用いた船体構造の応力推定

宮島 秀規*

1. はじめに

実船計測プロジェクトでは、航行中の船舶の状態を把握するために主機回転数や船速、針路などの航海データや、風や波などの気象データ、船体の運動に関するデータとして加速度や船体構造に生じる応力など、様々なデータの取得・蓄積が行われている。これらのデータは、船体強度の評価や疲労被害度評価による予寿命予測、設計へのフィードバックといったところを目的に様々な検討^{1)~3)}がなされており、船舶の安全性確保の観点から、実際に船体に生じた応力の履歴を把握することの意義は大きい。

実船計測における応力計測の課題としては、センサーの設置やメンテナンスなどにコストがかかる点が挙げられる。需要のあるすべての計測箇所に対して計測を行うことは難しいため、より少ない計測箇所ですべての船全体の応力を把握できる手法が望まれる。実船計測と異なる応力履歴把握のアプローチとしては、構造解析を取り入れて船体構造に生じる応力を推定する「荷重構造一貫解析」に関する研究が行われている。しかしながら、応力推定手法として確立した手法はないため、新たなアプローチの検討の余地がある。

船体構造に生じる応力の推定を回帰問題として捉えると、近年発展している機械学習を用いたアプローチが効果的だと考えられる。機械学習では課題に関連した様々な要素を考慮した推定を行うことができるため、実船計測で得られた応力に関連するデータを用いることで、船体構造に生じる応力を推定可能だと思われる。

実船計測で得られたデータには風、波、潮流といった自然環境の影響を受けるデータが含まれている。気象の状況を正確に把握することは難しく、実船計測データには不確実性のある計測値が多く含まれることとなる。このようなデータをもとに数値推定を行う場合に有効な手法として、機械学習分野では、確率分布を推定する手法である自然勾配ブースティング (Natural Gradient Boosting : NGBoost)⁴⁾が提案されている。NGBoostを用いることで、確率分布を考慮した合理的な数値推定を行うことがで

きると考えられる。そこで、本会では、従来とは異なるアプローチによる応力推定の実現可能性を確認するために、実船計測データ及びNGBoostを活用した船体構造に生じる応力推定の研究を実施している。本稿ではその取り組み内容について紹介する。

2. 実船計測概要

本研究では、計測項目やデータ数の観点から、8,600TEUのコンテナ船における実船計測プロジェクトで得られた約2年分のデータを使用している。表1に本船の主要目、表2に本船の計測項目を示す。

本船は加速度、応力を計測するためのセンサーを搭載している。それぞれの設置箇所を図1に示す。船体の応力計測には、光ファイバーを利用して構造部材の歪を測定するOSMOS (Optical Strand Monitoring System) が用いられており、船体の3断面に4か所ずつ、計12か所に設置された。加速度の計測には3軸 (x, y, z) の加速度計が用いられており、船首・船体中央部・船尾の計3か所に設置された。海象データに関しては、ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) が提供しているERA-5の波浪追算データを用いた。なお、本船では計測期間中に定期航路の変更が行われている。

表1 実船計測対象船舶の主要目

全長 (LoA)	Abt. 334.5 m
幅	45.6 m
深さ	24.4 m
計画満載喫水	14.0 m
総トン数	Abt. 97,000 GT

表2 データ項目

分類	詳細
航海データ	対水・対地船速、針路、主機回転数、主機馬力
気象データ	風向き、風速
加速度データ	3軸 (x, y, z) 加速度
応力データ	船体構造に生じる応力 (縦曲げ応力)
海象データ	波高、波向き、出会波向き、波周期、波の方向幅、波の尖度、波の周波数集中度、水深

* 技術研究所

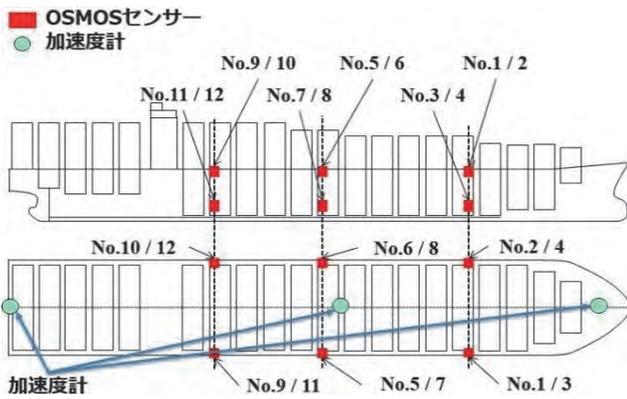


図1 センサー設置箇所

3. 応力推定手法

3.1 推定対象について

コンテナ船は大きな開口部を有しており、船体構造に高い応力が生じるため、船体上部の構造に生じる応力を精度良く推定することが重要である。また、計測箇所の中でも船体中央部は相対的に応力が高くなるため、重要な箇所である。そのため、本研究では船体中央、左舷デッキ側の計測箇所（図1中No.6）における応力を推定対象とした。

3.2 NGBoost

本研究では、実船計測データの不確実性を考慮し、確率分布を推定することが可能な手法であるNGBoostを用いて船体構造に生じる応力の推定を行う。NGBoostは確率分布の形で推定結果を出力することができる回帰モデルであり、勾配ブースティングを拡張した手法を用いている。勾配ブースティングは、単独では推定精度が低い弱学習器を複数組み合わせることで1つの学習器を作るアンサンブル学習の手法の一種であるが、NGBoostでは、複数の確率分布のパラメータを同時に推定するために、弱学習器の学習効率化に自然勾配⁵⁾を用いている点の特徴である。

本研究では、NGBoostの学習段階で最適化する損失関数として式(1)に示す対数尤度 $L(\theta, y)$ を用いる。また、このとき自然勾配 $\tilde{V}L(\theta, y)$ は式(2)で表される。ここで確率分布のパラメータ θ 、正解ラベル y 、確率分布 P であり、 $I_L(\theta)$ はフィッシャー情報行列である。推定分布には正規分布、弱学習器には決定木を用いる。

$$L(\theta, y) = -\log P_{\theta}(y) \quad (1)$$

$$\tilde{V}L(\theta, y) \propto -I_L(\theta)^{-1}L(\theta, y) \quad (2)$$

4. 実船計測データの統計処理

本研究では実船計測データを1時間ごとの統計値として処理し、応力推定用のデータセットを作成した。各データの処理、及び作成したデータセットについて記述する。

4.1 航海データ、気象データ、海象データ

航海データ、気象データについては、1時間ごとの平均値として処理を行った。また、海象データについては1時間毎の波浪追算値を用いた。なお、波向きや風向き等の角度に関しては、船首方向を0度として時計回りに360度のデータとなっているため、船首方向からの角度の変化量を変数として加えている。

4.2 応力データ

船体構造に生じる応力は、周波数分析を行うことで波浪応答成分と弾性応答成分の大きく2つに分離することができ、それぞれ0.1Hzと0.5Hz付近にピークが現れる²⁾。そのため本研究では、1時間ごとに区切った応力の時系列データについて、1/60~0.3Hzの波浪応答成分、0.3Hz~1.0Hzの弾性応答成分を分離し、ゼロアップクロス法により波の1周期毎の応力範囲を抽出した後、標準偏差を算出した値を用いた。

4.3 加速度データ

周波数分析を実施したところ、0.1Hz及び0.6~0.8Hz付近にピークが確認された。これらの成分は、それぞれ波浪応答成分と主に弾性応答成分である。本研究では、ピーク部分を含むように1/60~0.3Hzの波浪応答成分、0.3Hz~1.0Hzの弾性応答成分、1/60~1.0Hzの波浪応答成分+弾性応答成分を分離し、1時間ごとの最大値及び標準偏差を算出した値を特徴量として用いた。

4.4 応力推定用データセット

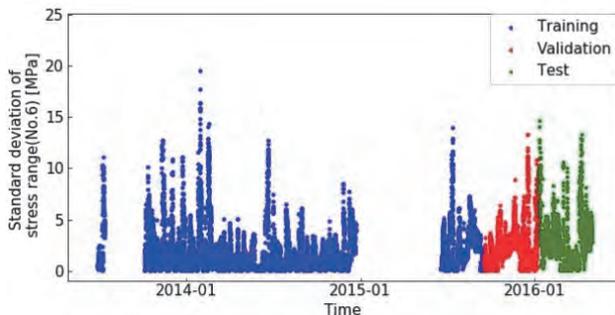
上記の処理を行い、目的変数1項目（No.6の応力実測値）、説明変数108項目からなるデータセットを作成した。表3にデータ点数、図2に目的変数である応力の時系列プロット及びヒストグラムを示す。

図2(b)の応力のヒストグラムから、No.6の応力計測値は高応力が計測されたデータが少ないことが確認できる。このように不均衡データを用いて機械学習を行う場合、データ数の少ない部分については、推定モデルの推定精度が低下することが懸念される。そのため、不均衡データの偏りの補正を目的とし、サンプル数の少ないデータを増やすオーバーサンプリングの手法であるSMOTE⁶⁾を用いてオーバーサンプリングを実施した。

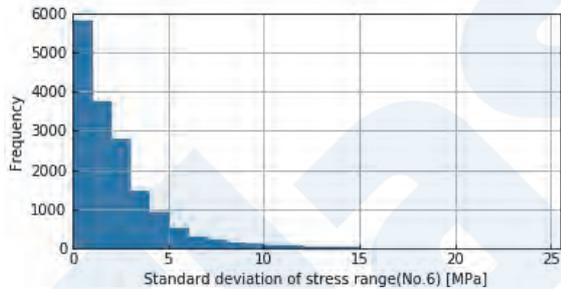
SMOTEはk近傍法を利用してデータを増やす手法であり、少数派に属する特定のデータと、その近傍にあるk個のデータからランダムに選択されたデータを用いて、新たなデータを内挿する。本研究では目的変数となる応力に閾値を設け、閾値以上・未満のデータにラベル分けしたうえで、多数派と少数派が同程度のデータ数になるようオーバーサンプリングを行った。

表3 応力推定用データセットのデータ点数

	データ点数
学習データ	11,435
検証データ	2,614
テストデータ	2,288
合計	16,337



(a) 時系列のプロット



(b) ヒストグラム

図2 No. 6の応力実測値の時系列プロット及びヒストグラム

4.5 応力推定モデル

本研究では、表4に示すように全説明変数を用いるケース①と、航海・気象・海象データのみを用いるケース②を設定し、NGBoostによる応力推定モデルを作成した。なお、ケース②では推定精度が悪化する傾向にあったため、オーバーサンプリングは実施していない。原因としては、ケース①よりも説明変数が少なくなったことで、学習データ内に含まれるデータのパターンが減少し、類似したデータが増えてしまうためではないかと考えられる。

表4 データ項目

	ケース①	ケース②
航海データ	○	○
気象データ	○	○
海象データ	○	○
加速度データ	○	—
応力データ	○	—

5. 応力推定結果

5.1 ケース①及び②の推定結果の比較

ケース①及び②における、テストデータに対する応力推定結果をそれぞれ図3、図4に示す。x軸に実測値、y軸に推定値として正規分布の平均値をプロットした散布図となっており、応力の実測値と推定値が等しい場合、対角線に引いた基準線上にプロットされる。また、推定した正規分布の 2σ 信頼区間を示している。表5には実測値と推定値の平均二乗誤差及び相関係数、推定した標準偏差の平均値を示す。

ケース①について、図3を見ると、推定結果のプロットが基準線に沿って分布しており、また相関係数の値が0.99程度であることから、実測値と推定値が精度よく一致していると考えられる。

ケース②について、図4を見ると、プロットが基準線付近に分布しており、船体構造に生じる応力を捉えることができている。一方で、表5から、ケース①と比較して相関係数の値が減少し、平均二乗誤差及び標準偏差の平均値が増加しており、推定精度が低下していることが確認できる。また、ケース②では高応力部分で推定値が実測値を下回る傾向が見られた。船体構造の強度の観点からは、推定値が応力を過小評価するのは好ましくないため、高応力部分における推定精度向上も課題である。

ケース②の高応力部分における推定精度低下の原因としては、高応力が計測されたデータの不足が考えられる。実海域における計測で高い応力を計測する頻度は低く、また、航路によって船舶が遭遇する気象・海象の傾向は異なる。航海・気象・海象データのみを用いた場合の高応力部分の推定精度向上には、より長期間の計測データ収集や、航路別の応力推定モデル作成が有効ではないかと考えられる。

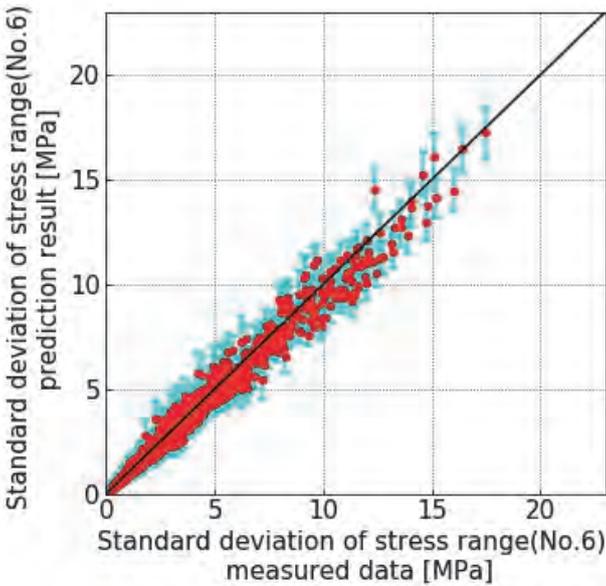


図3 ケース①の実測値及び推定結果のプロット

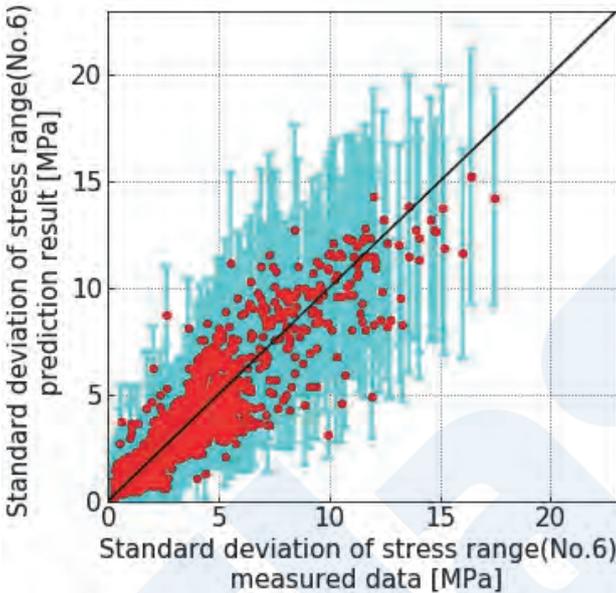


図4 ケース②の実測値及び推定結果のプロット

表5 推定結果

	ケース①	ケース②
平均二乗誤差	0.13	1.10
相関係数	0.99	0.91
標準偏差の平均値	0.19	0.74

5.2 説明変数の重要度の算出

決定木をベースとした機械学習手法では、作成した推定モデルの推定結果に対する各説明変数の重要度を算出することができる。NGBoostを用いた応力推定モデルでは、推定結果として正規分布のパラメータである平均値及び標準偏差を出力しているため、それぞれについて重要度が算出できる。表6、表7に、ケース①、ケース②における説明変数の重

要度の一部として、上位5個を示す。

ケース①では目的変数である計測箇所No.6の応力の近辺や、船体上部であるNo.1, No.5, No.9, No.10における応力の重要度が高くなっていった。一方で、船体下部や船首側のNo.3, No.4, No.7については他の計測箇所と比較して重要度が低くなっていった。本研究では計測箇所No.6を対象としたが、他の計測箇所や船舶を推定対象とした際の知見を蓄積することで、応力推定に必要な計測箇所を明らかにすることや、少ない計測箇所でも複数の箇所における応力を精度よく推定できるようになることが期待される。

ケース②では波浪荷重に関わる波高や波周期、出会い波向きの重要度が高くなっていった。特に波高については、図5に示す通り計測箇所No.6の応力と線形に近い関係にあるため、推定に大きく寄与したものと考えられる。

表6 ケース①の説明変数の重要度

	平均値について	標準偏差について
1	応力 (No.5) 波浪成分+弾性応答成分	応力 (No.5) 波浪成分
2	応力 (No.1) 波浪成分+弾性応答成分	応力 (No.5) 波浪成分+弾性応答成分
3	応力 (No.9) 波浪成分+弾性応答成分	応力 (No.10) 波浪成分+弾性応答成分
4	応力 (No.10) 波浪成分+弾性応答成分	応力 (No.12) 波浪成分+弾性応答成分
5	応力 (No.10) 波浪成分	応力 (No.9) 波浪成分+弾性応答成分

表7 ケース②の説明変数の重要度

	平均値について	標準偏差について
1	波高 (風浪+うねり)	波高 (風浪+うねり)
2	波周期	風速
3	風速	出会い波向き
4	対水船速	主機回転数
5	主機馬力	対水船速

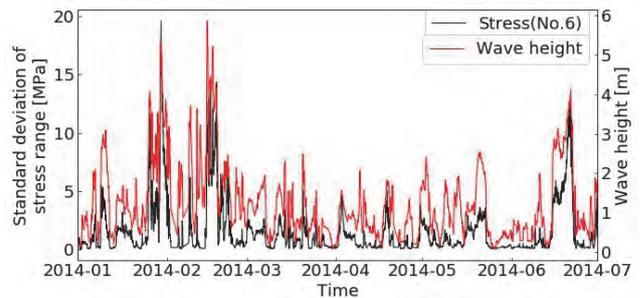


図5 応力 (No. 6) 及び波高

6. おわりに

本稿では、実船計測データ及び機械学習を用いた船体構造に生じる応力推定の研究の内容を紹介した。

本研究は特定の船舶1隻を対象にしたものであるため、他船に適用した場合の応力推定結果との比較・検証を通じて本手法の有効性・汎用性を確認する必要がある。また、そのような取り組みを行うことで、一定の推定精度を確保するために必要なデータ数や、推定精度向上に有効な説明変数について知見を得ることが期待される。

今後の展望として、非計測箇所への応力推定が挙げられる。本研究では実船計測で応力が計測された箇所を対象に、実測値を正解データとして応力推定の取り組みを行った。一方で、実際に船体構造に生じる応力推定の需要がある箇所は多数あり、そのような箇所すべてにセンサーを設置し実測値を得ることは困難である。そのため、直接的な計測に頼らずに、精度よく応力履歴を推定する手法の確立に取り組むことに意義がある。

謝辞

本研究実施にあたって多大なるご指導をいただいた湊標アナリティクス株式会社の井原渉氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 河合俊希, 王七音, 川村恭己, 岡田哲男, 満行泰河, 陳曦: 大型コンテナ船の船体応答実船計測に基づく海象推定に関する研究—機械学習を用いた方向波スペクトル推定の有効性の検討—, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第28号, 2019
- 2) 武田勝利, 福井努, 松本俊之: 大型コンテナ船実船計測及び荷重構造一貫解析による船体構造応答評価に係る研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第29号, 2019
- 3) 藤久保昌彦: 船体構造デジタルツインの研究開発—フェーズ1プロジェクトの成果と今後の課題—, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第30号, 2020
- 4) Duan, T., Avati, A., Ding, D. Y., Basu, S., Ng, A. Y., and Schuler, A.: NGBoost: Natural Gradient Boosting for Probabilistic Prediction, <https://arxiv.org/abs/1910.03225>, 2019
- 5) Amari, S.: Natural Gradient Works Efficiently in Learning, *Neural Computation* Vol. 10, 1998
- 6) Chawla, N., Bowyer, K., Hall, L. and Kegelmeyer, W.: SMOTE: Synthetic Minority Oversampling Technique, *Journal of Artificial Intelligence Research* 16, 2002

自律飛行ドローンの船舶の検査・点検への活用検討

— 非GNSS環境かつ暗所における実証実験 —

徳永 純路*

1. はじめに

1.1 背景

近年、様々な分野において、ドローンなどのロボティクス技術の活用が活発化している。この動きは海事業界でも生じており、これら最新技術を用いた船級検査員による検査や船員による点検への有効活用に対する期待感が高まってきている。このため、船級協会としては、2018年1月にいち早く、船体構造の検査に対して遠隔検査技術（RIT：Remote Inspection Techniques）が活用できるようにIACS UR Z17を改正した。このような状況を踏まえ、日本海事協会でも2018年4月に「船舶検査におけるドローン使用に係るガイドライン」（以下、ガイドライン）を策定している¹⁾。ドローンを船舶検査に使用する際の適用範囲や手順、安全に運用するための技術的な注意点、並びにドローンサービス事業所に対する要件などをまとめている。貨物艙などの高所、狭所、暗所での検査にドローンを活用することで、検査の安全性、効率性、品質向上が期待されている。

ドローンの操作方法として、オペレーターが手動で操作する“マニュアル操作”と、周囲の環境をセンシングし、自己位置、向きを推定することで自律的に飛行する“自律飛行”の2種類あるが、ガイドラインでは、ドローンの運用方法は前者を対象としている。これは、船舶内の自律飛行ドローンの使用には、SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）等の技術が必要になるが、ガイドラインを発行した当時は、まだ技術開発段階であり、船舶検査に使用することは困難だと考えられていたためである。しかし、近年、技術開発が進んだことで屋内でも自律飛行できるドローンが登場しており^{2) 3)}、他業界では、屋内のインフラ点検や巡回警備での活用が検討されている^{4) 5)}。

1.2 目的

現状は、船舶内のような鋼板で囲われた環境では、GNSS電波が入らず、地磁気も安定しないため、マニュアル操作による船舶の検査・点検には、高度な操縦技能を有するオペレーターが必要となってくる。一方で、自律飛行ドローンでは、オペレーターの技

量に依存することなく運用できる。ただし、前述した通り、ガイドラインでは自律飛行ドローンを想定していないため、船舶検査に自律飛行ドローンを使用する場合の技術要件を作成する必要がある。

船舶内は非GNSS環境下であるとともに、暗所区画も多い。そのため、自律飛行に関する技術要件だけでなく、照明が備え付けられていない暗所であっても、検査・点検が行えることが重要な要件となる。したがって、暗所においても十分な品質の映像を撮影できるよう、照明の搭載、カメラの選定並びにチューニングも重要である。

また、近年では、撮影した映像を有効に活用するための技術開発も進んでいる。例えば、カメラ画像を3D点群データやオルソ画像に加工する技術は既に確立されており、こういった技術を有効活用することで、検査・点検の効率や品質の向上が期待される。

自律飛行ドローンの利用による利点を最大化するためには、既存の検査・点検スキームに固執することなく、柔軟な考えで活用することが重要となる。そこで、本会では、船舶内のような非GNSS環境下や暗所において安定して自律飛行するドローンに対する技術要件の抽出と、自律飛行ドローンを用いた際の船舶の検査・点検に適したスキームの研究を進めている。

本稿では、GNSSの代わりにカメラで撮影された映像から環境の3次元情報と機体の位置姿勢を同時に推定するVisual SLAM技術を用いた自律飛行ドローンを使用し、船舶内を模擬した環境下で飛行実験を行い（写真1参照）、非GNSS環境下及び暗所でのドローンの自動飛行性能並びに撮影品質を検証した結果について記述する。



写真1 資材置き場概観

* 技術研究所

2. 実験概要

2.1 使用したドローンと実験環境

GNSS電波に依存することなく、自己位置を認識する方法として、一般的に下記3つが挙げられる⁶⁾。

- ① 画像によるビジョンセンサを用いる方法
- ② LiDARなどのレーザー測距系を用いる方法
- ③ 外部からのセンシングにより位置情報を機体に送る方法

それぞれの方法における長所と短所を表1に示す。

表1 自律飛行のためのセンサの種類と長所・短所⁶⁾

	長所	短所
①ビジョンセンサ	<ul style="list-style-type: none"> ・安価 ・小型/軽量(小型化が可能) ・特徴があれば平面でも位置を特定可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・遠距離で精度が落ちやすい ・特徴点のない平面や水面の検出が難しい ・暗所に弱い
②LiDAR	<ul style="list-style-type: none"> ・特徴のない平面でも測距可能(大型の場合) ・長距離でも高精度 ・全周囲で3次元情報を取得可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・非常に高価 ・大型/重量(小型化が困難) ・連続平面で位置情報を取得しづらい
③外部からの測距	<ul style="list-style-type: none"> ・環境に合わせて精度よく情報を取得可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・設置のコストが高い ・ドローンとの通信切断で危険状態に

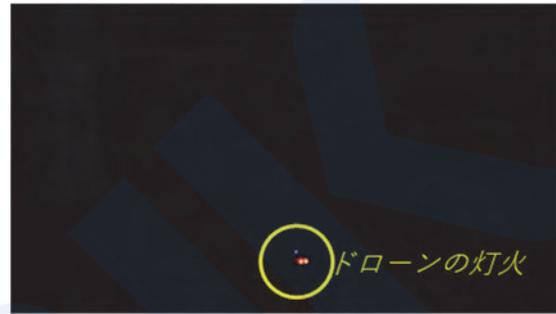
LiDARを使用したドローンであれば、船舶内のような環境でも自律飛行が実現できる。しかし、LiDARは非常に高価であるため、費用対効果が見えづらい状況においてはなかなか採用しづらい側面がある。そこで、本実験では、LiDARよりも安価に開発が可能なビジョンセンサとしてステレオカメラによるVisual SLAMを採用した自律飛行ドローンを使用した(写真2参照)。



写真2 ビジョンセンサを搭載した自律飛行ドローン

多方向のステレオカメラで取得した映像から特徴点を捉え、環境の3D情報と機体の位置姿勢を同時に推定することにより、機体の自己位置、向きを認識している。

なお、暗所ではビジョンセンサが機能しないことから、プロペラ下部には100Wの照明システムを取り付け、ビジョンセンサに必要な光量を確保した。照明の点灯前後の様子を写真3に示す。



(a) 照明装置点灯前



(b) 照明装置点灯後

写真3 照明装置点灯前後の様子

2.2 ドローンの自動飛行性能に関する検証

前述の通り、ビジョンセンサは暗所では機能しないため、ドローンに適切な照明装置を搭載し、周囲の特徴点を捉えられるようにする必要がある。そこで、実際に屋内の暗所にて100Wの照明システムを搭載した自律飛行ドローンを自動飛行させ、ビジョンセンサが有効に機能しているかを検証した。

本機体では、ウェイポイントを設定することで、その経路通りに自動飛行させることができる。今回は、図1に示すように2つの飛行経路を計画し、自動飛行を行った。なお、被写体との距離は実線の飛行経路は3m、破線の飛行経路は8mに設定した。

写真4にドローンが自動飛行している様子を示す。本実験を行った状況においては、非GNSS環境かつ暗所であっても、100Wの照明システムを機体に搭載することで、計画した飛行経路に沿って安定して自動飛行することを確認した⁷⁾。



図1 飛行計画



写真4 自動飛行の様子

遠くなるほど被写体に当たる光量が下がるため、距離が離れるたびにISO感度が上がり、ノイズが増幅される傾向がみられた。

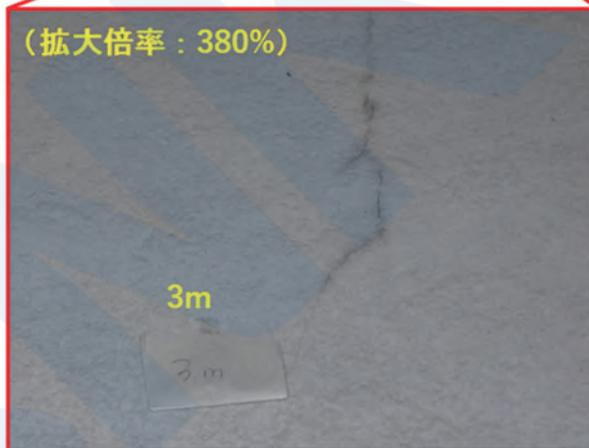


写真6 3mの距離から撮影した場合

2.3 ドローンによる撮影映像の品質に関する検証

本実験において、検査用カメラとして、2000万画素のSony UMC-R10[®]を使用した。ドローンの飛行中に撮影した画像を写真5に示す。矢印で示した箇所のき裂も十分に判別できている。

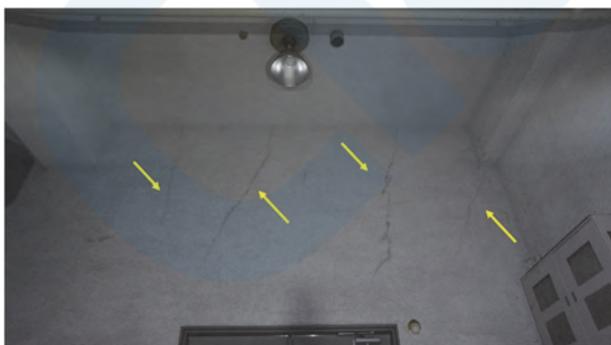


写真5 壁面撮影画像

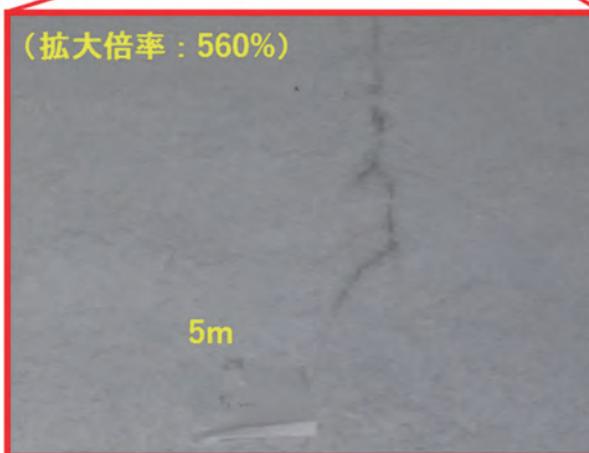


写真7 5mの距離から撮影した場合

本実験では、写真6～9に示すように、被写体との距離を最大10mまで離れたうえで撮影を行ったが、いずれの場合でもき裂の有無は確認ができています。なお、本実験のような暗所環境では、ドローンに取り付けられた照明が唯一の光源であり、当然ながら、



(拡大倍率 : 760%)

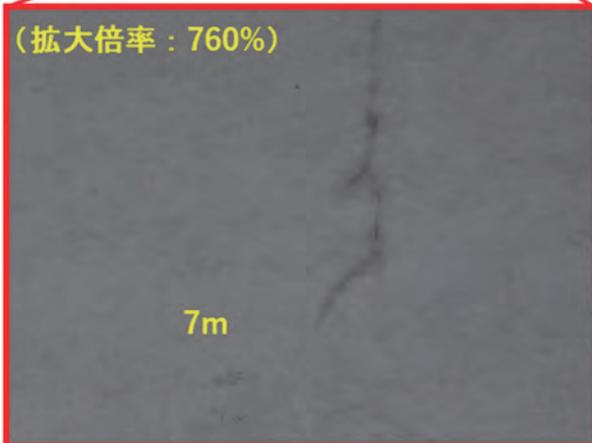


写真8 7mの距離から撮影した場合



(拡大倍率 : 1040%)

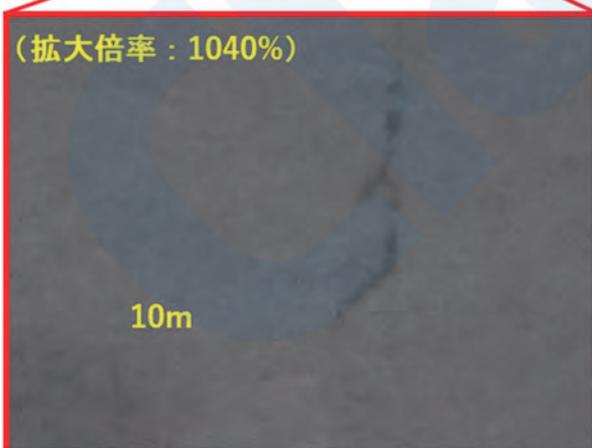


写真9 10mの距離から撮影した場合

2.4 ドローン撮影画像の有効活用に関する検証

2.4.1 3D点群データ及びオルソ画像の生成

自律飛行ドローンが簡単な操作で運用可能となれ

ば、検査・点検に必要な撮影情報を容易に取得することができる。例えば、船舶が沖待ちをしている時間を使って船員が自律飛行ドローンで貨物艙内部を撮影することも可能となり、その記録映像は有効な事前情報として活用することができる。また、現在では、記録映像から3Dデータを作成することを可能とする技術が既に開発されている。このような技術を活用すれば、効率的に貨物艙内部の状況を把握することが可能となる。

本実験で撮影した写真をSfM処理にかけ、撮影対象の3Dモデルを作成した。SfM処理とは、カメラで撮影した複数の画像から、それらの撮影位置を推定し、同一地点に対するそれぞれの画像の視差から対象物全体の3Dモデルを生成する技術である⁹⁾。3Dモデルの精度は画像のラップ率（ドローンの自動飛行で連続撮影した時の、重なる部分の比率）に依存するため、十分なラップ率を確保する必要がある。今回は自動飛行中に一定間隔で連続撮影し、オーバーラップ率が70%以上となるように設定し、SfM処理に必要な画像を取得した。

3Dモデルは、多くの点群で構成される3D点群データで出力される。また、3D点群データを加工し正射投影することで、2Dモデルであるオルソ画像も取得できる。本実験では、図1に示した2つの飛行経路から撮影した画像から3D点群データ並びにオルソ画像の生成を行った。

2.4.2 3D点群データの検証

作成した3D点群データを図2に示す。2つの飛行経路から撮影したデータが1つの点群データとしてうまく結合できており、様々な角度から、対象物の確認が可能となった。

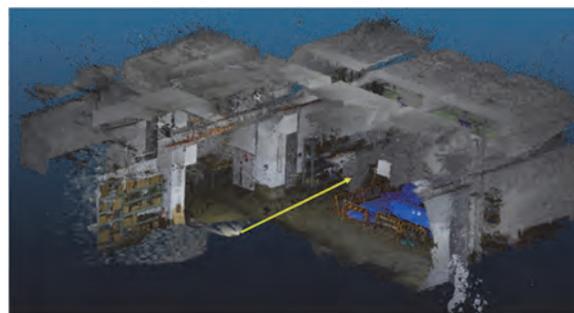


図2 3D点群データ 合成図

図3は図2の矢印の方向から見た時の3D点群データの一部分を拡大したものである。点群で構成されているため、細かい部分を確認しようとすると、図3下段のように、点群が疎となるため、画質が荒くなる。

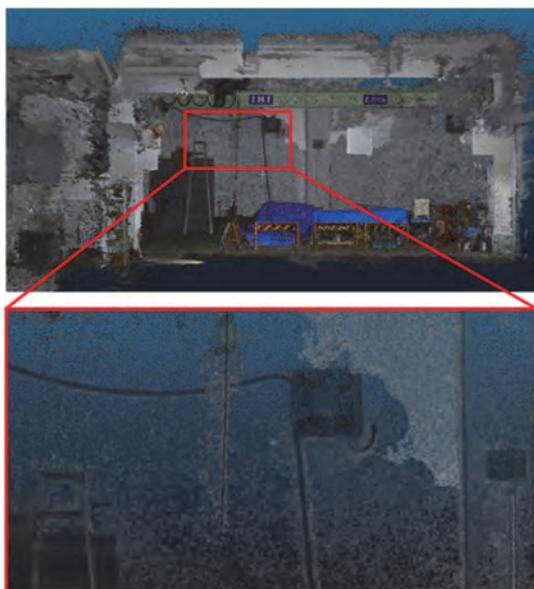


図3 3D点群データ 拡大図

このように、3Dモデル化することにより直感的に状況を把握しやすくなる一方で、点群データ化されることにより、画質そのものは低下してしまう。

実際の船舶検査で活用する場合は、検査対象区画全体の状態を3D点群データで確認し、より詳細な確認が必要な部分については、個別に撮影映像から確認するといった工夫が必要となる。

3Dモデルには位置情報が含まれているため、測長にも活用することができる。測長箇所は図4の線で示す3か所において3D点群データによる測長と実測値の比較を行った。計測結果の比較を表2に示す。



図4 測定箇所

表2 計測結果の比較

	3D点群データでの測長結果[cm]	実測結果[cm]	精度[%]
①棚	209	206	1.46
②消火栓	110	105	4.76
③バリケード	119	121	1.65

cm単位の誤差は出てしまうが、クランク長さ測長や、損傷範囲の大まかな算出には活用できるかもしれない。

2.4.3 オルソ画像の検証

作成したオルソ画像を図5, 6に示す。なお、図1において左側の実線の飛行経路での撮影から得られたオルソ画像が図5, もう一方の破線の飛行経路から得られたオルソ画像が図6である。



図5 実線の飛行経路におけるオルソ画像



図6 破線の飛行経路におけるオルソ画像

オルソ画像にすることにより、3Dから2Dに戻るものの画質は撮影画像に近い品質となっている。

3D点群データのように立体的に状況を捉えることはできないが、平面における視覚情報は向上しているため、例えば、塗装状態の把握などはオルソ画像の方が向いているかもしれない。

一方で、オルソ画像は正面から撮影した写真を結合して生成されるため、部材の陰を斜めから写した画像は、ドローンで撮影した映像には映り込んでいても、オルソ化した際に抜け落ちてしまうことになる。そういった意味では、一長一短といえる。

なお、今回、オルソ画像にうまく変換できない部分（黒い部分）が存在した。これは、オルソ化は一つの平面に投影することを前提に処理しているため、本実験環境のような、カメラ方向から見る形状が複雑な場合、ひずみが大きくでてしまい、その結果、オルソ化した際にその部分が抜け落ちてしまったことが原因だと考えている。対策としては、奥行きに差がある梁の部分と壁の部分を別々にデータ化することでひずみを減らすことが考えられる。また、梁や資材等との距離が近かったために、オルソ化に必

要な画像の視差や情報量が十分でなかったことも原因の1つである可能性がある。

2.4.4 考察

船舶の検査・点検への活用という点において、現段階で3D点群データとオルソ画像のどちらが適しているか判断することは難しい。それぞれの特徴を把握した上で、検証事例を増やしつつ、3D点群データとオルソ画像を組合せた活用も含め、引き続き検討していきたい。例えば、3D点群データやオルソ画像を時系列で比較することで、区画全体の経年変化を確認することができれば、船舶の検査・点検への有効活用が期待できる。

また、1つのカメラから、検査・点検のための撮影映像や、その映像を後で確認するための記録、そして、撮影画像の事後処理により3Dモデルが得られるというのは大きな利点に感じる。得られたデータを有効活用していくことは、船級協会においても今後はますます重要となってくる。ドローンで取得したデータの活用方法についても継続して検討していきたい。

2.5 まとめ

本実験では、以下のことが確認できた。

- ・ 体積 (D×W×H) がおおよそ14×15×5 (m) である屋内暗所環境において、100Wの照明システムを機体に搭載することで、非GNSS環境かつ暗所であっても、計画した飛行経路に沿って安定して自動飛行することが確認できた。
- ・ き裂の有無が十分に判別できる画像が暗所でも撮影できることを確認した。ただし、暗所の場合、照度の関係から、機体と被写体との距離により撮影品質が変化する。そのため、カメラの性能、照明の照度にあった適切な距離から撮影することが必要である。
- ・ ドローンで撮影した画像をSfM処理することで、3D点群データとオルソ画像が取得できた。
- ・ 3D点群データでは、対象物を3Dモデル化することにより、直観的に状況を把握しやすくなる。
- ・ 3D点群データ化されることにより、画質そのものは低下してしまう。そのため、船舶検査での活用方法としては、検査対象区画全体の状態を3D点群データで確認し、損傷等が疑われる箇所については、個別に撮影映像から確認するといったことが考えられる。
- ・ 3D点群データからの測長はcm単位の誤差が生じる。大まかなクラック長さの把握や、損

傷範囲の算出等への活用が考えられる。

- ・ オルソ画像では、撮影画像に近い品質で広い面積の平面における視覚情報を確認することができた。船舶でも、塗装状態の把握等は可能と考えられる。一方で、部材の陰を斜めから写した画像は、ドローンで撮影した映像には映り込んでいても、オルソ化した際に抜け落ちてしまう側面もある。

3. おわりに

本実験では、ビジョンセンサを搭載したドローンを使用し、屋内における外部照明のない(暗所)閉囲空間(非GNSS環境下)での安定的な自動飛行が可能なが確認できた。ただし、ビジョンセンサはカメラで捉えた映像の特徴点から自己位置を認識しているため、今回の実験環境よりもより広い空間においても有効に機能するかについては、引き続き検証する必要がある。船舶内でも実証実験を実施し、より実運用に近い条件で検証を進めていきたい。

本会は、船舶の検査・点検が効率的かつ合理的に行われるよう、今後とも関連する研究検証を進めていく。

参考文献

- 1) 日本海事協会：船舶検査におけるドローン使用に係るガイドライン，2018
- 2) Skydio, Inc. : Skydio 2, <https://www.skydio.com/skydio-2>
- 3) ACSL : インフラ点検用ドローン プラント, <https://www.acsl.co.jp/solutions/inspection-industrial-plant/>
- 4) ALSOK : ニュースリリース (2020年7月15日), https://www.alsok.co.jp/company/news/news_details.htm?cat=2&id2=1039
- 5) 北海道電力株式会社 : プレスリリース (2021年3月4日), https://www.hepco.co.jp/info/2020/1251171_1844.html
- 6) Aerosense Inc. : [プレスリリース] 自律飛行ドローンを用いた船舶貨物艙内検査の実証実験を実施～GPS等の電波の入らない暗闇の環境での自律飛行による検査手法を確認～, <https://aerosense.co.jp/pressitems2021/0318>
- 7) Aerosense Inc. : Aero Inspection on Dark site with vSLAM and Light (Aerosense

Inc.), Youtube,

https://www.youtube.com/watch?v=Ov9YtEqZpbI&ab_channel=AerosenseInc.

- 8) SONY : UMC-R10C, Image Sensing Solutions Europe, a division of Sony Europe B.V,
<https://www.image-sensing-solutions.eu/UMC-R10C.html>
- 9) 白谷栄作, 桐博英, 高橋順二, 大石哲, 村木広和 : 無人航空機 (UAV) を活用したストックマネジメントの展望, 農業農村工学会誌, 第83巻, 第10号, 2015年, p839-842,
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsidre/83/10/83_839/_pdf/-char/ja



IMOの動向

— IMOでの主な審議内容・結果の紹介 —

国際部

1. はじめに

本稿においては、IMO（国際海事機関）における国際条約等の審議動向を紹介している。

前号では、2021年5月に開催された第103回海上安全委員会（MSC 103）の審議内容を紹介した。

今号では、2021年6月10日から17日に開催された第76回海洋環境保護委員会（MEPC 76）の主な審議結果を紹介する。昨今の新型コロナウイルスの影響により、MEPC 76はIMO本部ではなく、リモートで開催された。リモート会議による時間的な制約により検討を行うことができなかった項目は、11月に開催されるMEPC 77で審議を行う予定である。

2. MEPC 76の審議結果—海洋環境保護関連—

2.1 温室効果ガス（GHG）関連

国際海運からの温室効果ガス（GHG）排出の抑制対策はIMOにて検討が進められており、現在までにエネルギー効率設計指標（EEDI）による規制、船舶エネルギー効率管理計画書（SEEMP）の所持、及び燃料消費実績報告制度（DCS）が導入されている。また、2018年4月に開催されたMEPC 72において、GHG削減目標とGHG排出削減策の候補を盛り込んだIMO GHG削減戦略が採択され、脱炭素化に向けたGHG削減手法について検討が行われている。

2.1.1 GHG排出削減のための短期対策

MEPC 72で採択されたIMO GHG削減戦略では、2030年までの短期削減目標と2050年までの中長期削減目標が規定されている。

今回の会合では、短期削減目標である、2030年までに国際海運全体の輸送効率を2008年比で最低40%改善することを達成するための対策として、(1)技術アプローチであるEEXI規制と、(2)運航アプローチである燃費実績（CII, Carbon Intensity

Indicator）格付け制度を導入するためのMARPOL条約 附属書VIの改正が採択された。

(1) 技術アプローチ（EEXI規制）

EEXI規制は、就航船に対して新造船と同等の燃費性能を要求する規制で、EEDI規制と同様に400 GT以上の国際航海に従事する船舶*1に適用される。2023年1月1日以降に行う最初のIAPP定期的検査（年次、中間又は更新検査）時までの適合が要求される。

個船のエネルギー効率指標であるEnergy Efficiency Existing Ship Index（EEXI）値を算出し、船種とサイズによって決定されるEEXI規制値を満足する必要がある。EEXI値がEEXI規制値を満足できない場合、エンジンの出力制限や省エネ設備の導入などにより燃費性能（EEXI）の改善が要求される。

EEXI値はEEDIと同様の計算式から算出する。本船がEEDI規制の適用対象船かつEEDI値でEEXI規制値を満足する場合には、IEE証書及びEEDIテクニカルファイルに記載されているEEDI値を本船のEEXI値として採用することができる。

(2) 運航アプローチ（燃費実績格付け制度）

燃費実績格付け制度は、燃料消費実績報告制度（DCS）に基づき収集した燃料消費量及び航海距離のデータより、毎年の実績値となるattained CIIを計算し格付け評価を行う制度である。5,000GT以上の国際航海に従事する船舶*2について、2023年度からのattained CIIの計算方法及び報告手順を2022年末までにSEEMPに記載し、船種ごとに規定される基準線と削減率から算出するCII基準値とattained CIIとの比較によりA-Eの5段階で格付け評価を行う。格付けの結果、E又は3年連続Dの低評価となった場合、CIIの改善計画を作成し主管庁の確認を受けることが要求される。

*1 ばら積貨物船、ガス運搬船（LPG運搬船）、タンカー、コンテナ船、一般貨物船、冷凍運搬船、兼用船、Ro-ro貨物船（自動車運搬船）、Ro-Ro貨物船、Ro-Ro旅客船、LNG運搬船、クルーズ客船（ただし、LNG運搬船以外はディーゼル電気推進、タービン推進等の非従来型推進装置による船舶は除く。また、クルーズ客船は非従来型推進装置を有する船舶のみ適用。）

*2 ばら積貨物船、ガス運搬船（LPG運搬船）、タンカー、コンテナ船、一般貨物船、冷凍運搬船、兼用船、Ro-ro貨物船（自動車運搬船）、Ro-Ro貨物船、Ro-Ro旅客船、LNG運搬船、クルーズ客船

また、この削減率については、2019年における船種ごとのCII平均値（リファレンスライン）を基準とし、以下の通り毎年強化される予定となっている。

表1 CIIの削減率

年	削減率
2023	5%
2024	7%
2025	9%
2026	11%
2027 - 2030	未定（継続審議）

2.1.2 その他のGHG排出削減対策

(1) 中長期削減対策のためのワークプラン

今回の会合では、より複雑な検討を要するGHG排出削減のための中長期対策について統一的なスケジュールで円滑に検討作業を進めるため、3つのフェーズにわけて作業を行うことを記載したワークプランに合意した。今後は中長期対策について、本ワークプランに従って審議が進められることになる。

表2 ワークプラン

フェーズ	作業内容	期間
I	具体的な対策案を各国が検討し、IMOに提案	2021-2022
II	検討すべき提案を選別し、優先順位付け	2022-2023
III	優先順位の高い提案から制度の具体化を検討	2023-

(2) IMO研究開発ファンド

MEPC 75にて提案されていた低・脱炭素技術の研究開発を促進するためのIMO研究開発ファンド（IMRF, International Maritime Research Fund）については、次回MEPC 77にて継続審議を行うことが合意された。

2.1.3 EEDI規制における最低推進出力要件

エネルギー効率設計指標（EEDI）では主機関の出力を小さく抑えることで容易に改善できるものの、荒天下における操船性を維持する必要があることから、MEPC 65において暫定の最低推進出力ガイドライン（MEPC.232（65））が策定された。さらにMEPC 71において、暫定ガイドラインの適用期間をEEDI規制のフェーズ2まで延長することが合意されていた。

EEDI規制のフェーズ3の開始が迫る中、最低推進出力ガイドラインの最終化が急務となっていたが、

今回の会合において、SHOPERA（欧州）とJASNAOE（日本）により策定されたガイドライン案（MEPC 71において提案）の内容を全面的に取り入れた最低推進出力ガイドラインの改正案が承認された。

また、EEDI規制と最低推進出力要件の両方を満足するための手段として、通常航海時に機関出力を制限し、非常時（荒天時など）は出力制限を解除することを認める手法（出力制限・非常用出力）が提案されているが、MEPC 77までに当該手法に関するガイドラインを整備することが合意されている。

2.2 その他の審議（水中騒音対策）

クジラやイルカなどの海棲哺乳類が座礁する事案が多数報告されたことから、船舶から発生する水中騒音の海洋生物への影響について関心が高まり、2014年に開催されたMEPC 66では、商船からの水中騒音低減のための非強制ガイドライン（MEPC.1/Circ.833）が採択された。

今回の会合では、当該ガイドラインについて必要な対策と実行性などの観点から見直しを行うべきとの提案があり、船舶設計・建造小委員会（SDC）にて現行ガイドラインの見直し作業を行うことが合意された。

2.3 採択された強制要件

MEPC 76で採択された主要な強制要件は以下の通り。

(1) 短期的GHG削減対策

先述の通り、IMO GHG削減戦略で掲げている短期削減目標（2030年までに国際海運全体の輸送効率を2008年比で最低40%改善）を達成するための対策として、就航船に対する燃費規制（EEXI）及び燃費実績（CII）格付け制度の導入を含むMARPOL条約 附属書VIの全面改正が採択された。

(2) 北極海域における重質燃料油の使用規制

北極海において重質燃料油を船上で使用すること、及び重質燃料油を使用する目的で船上に保持することを禁止するMARPOL条約 附属書Iの改正が採択された。当該規制は2024年7月1日より適用開始となるが、燃料油タンク保護に関する同附属書の第12A規則（又はPolar CodeのII-A章1.2.1項）に適合している場合には、2029年7月1日より適用開始となる。なお、貨物として重質油を輸送することは認められている。

(3) UNSPバージへのMARPOL条約要件の適用

MARPOL条約 附属書I, 附属書IV, 及び附属書VIの一部要件について、無人非自航

(UNSP) バージを非対象とする改正が採択された。

(4) AFS条約における新規禁止物質の追加

新たに有害性が確認されたシブトリンを禁止物質に加えるためのAFS条約の改正が採択された。なお、就航船については、最外層に塗布されている塗料にシブトリンが含まれていない場合、塗料除去などの対応は不要である。

ClassNK

ClassNK 技報

No.4(2021 年(Ⅱ)発行)

編集: 藤浪幸仁

発行: 一般財団法人 日本海事協会 技術研究所
〒102-0094 東京都千代田区紀尾井町 3 番 3 号

TEL: 03-5226-2737

E-mail: ri@classnk.or.jp

印刷: 大日本印刷株式会社
〒162-8001 東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 1 番 1 号
03-3266-2111

本誌に掲載された全ての記事内容は、一般財団法人 日本海事協会の許可なく転載・複写することはできません。
記事の転載をご希望の方は、上記までご連絡ください。



一般財団法人 日本海事協会
技術研究所

〒102-0094 東京都千代田区紀尾井町3番3号
Tel : 03-5226-2737
Fax : 03-5226-2736
E-mail : ri@classnk.or.jp

www.classnk.or.jp