

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。

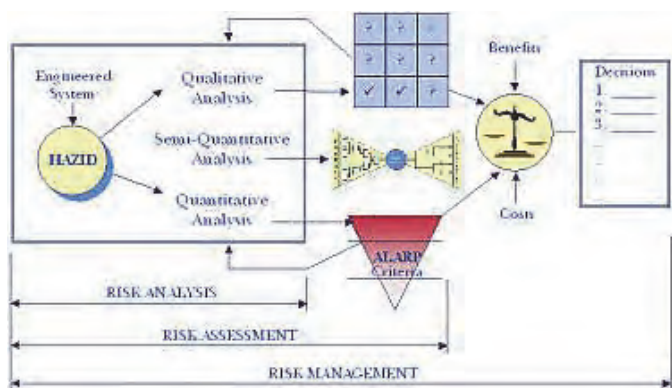


図1 リスク評価の色々なアプローチ⁷⁾

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。

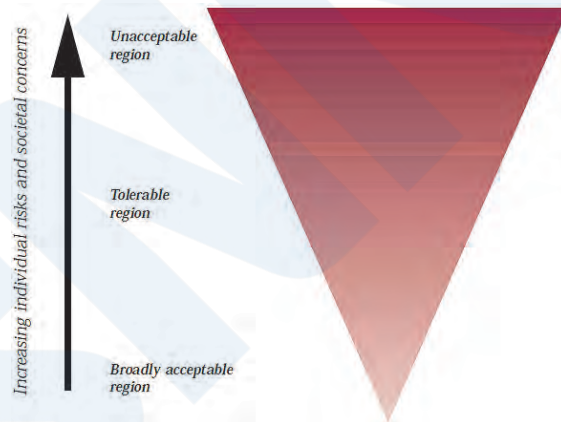


図2 HSEのリスク受容性フレームワーク⁹⁾

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。

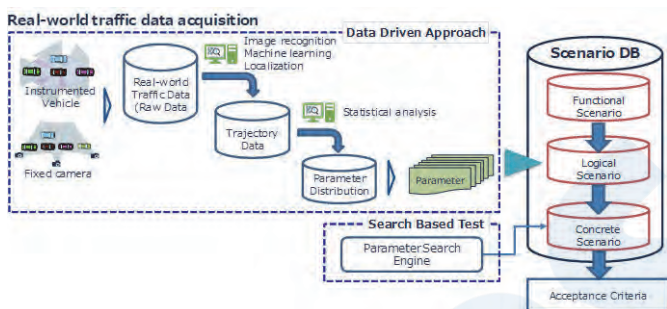


図3 SAKURAプロジェクトにおける自動運転車の安全性確保のためのシナリオ生成プロセス²⁴⁾

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。

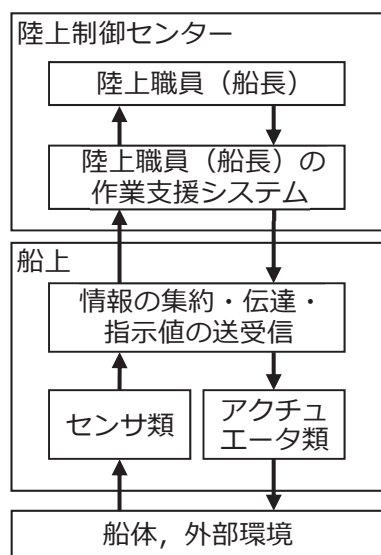


図4 仮想的な自動運航船の概念構造の例³²⁾

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。

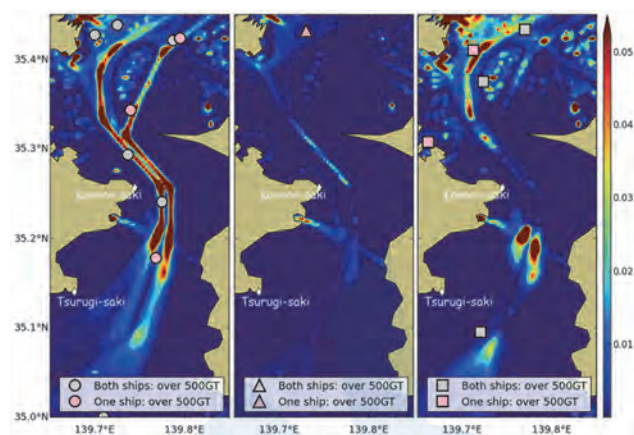


図5 見合い関係の種類別にみた幾何学的衝突頻度分布の推定例(左:追い越し, 中央:正面, 右:横切り)⁴²⁾

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とは、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)