

小型実験船の遠隔操船のリスク解析

三宅 里奈*, 伊藤 博子*, 石村恵以子*, 柚井 智洋*,
塩苅 恵*, 工藤 潤一*, 河島 園子*, 平田 宏一**,
仁木 洋一**, 小林 充***, 澤田 涼平***, 稲葉 祥梧****

Risk Analysis for Remote Operation of Small Experimental Ship

by

MIYAKE Rina*, ITOH Hiroko*, ISHIMURA Eiko*, YUZUI Tomohiro*,
SHIOKARI Megumi*, KUDO Junichi*, KAWASHIMA Sonoko*, HIRATA Koichi**,
NIKI Yoichi**, KOBAYASHI Mitsuru***, SAWADA Ryohei*** and INABA Shogo****

Abstract

The development of autonomous ships has been growing worldwide. The National Maritime Research Institute (NMRI) has also been developing various elemental technologies for autonomous ships using a small experimental ship "Shinpo." To implement such new technologies in the real world, it is essential to evaluate their safety. Conventional risk analysis typically focuses on the physical aspects of the equipment and functions. However, in the case of an autonomous ship, the operations of the autonomous system involve complicated relationships between the hardware, software, and humans. Failures of their interactions might cause a severe accident. Thus, the effects of their interactions need to be considered when performing risk analysis for autonomous ships. We previously developed a modeling method that illustrates the objects, tasks, and interactions that comprise autonomous ships, which can be used in conjunction with existing hazard identification (HAZID) techniques. Then, we also proposed a task-based HAZID technique that focuses on the tasks of autonomous ships. These risk analysis methods target the static aspects of the functions and tasks of autonomous ships. Meanwhile, dynamic aspects such as the sequence and timing of function execution and the duration of tasks on autonomous ships can be significant hazards. Therefore, to analyze the dynamic aspects, we have proposed a dynamic task-based HAZID technique that uses task flow diagrams. In this paper, we report the results of risk analysis for a remote waypoint operation aimed at improving the safety of the autonomous operation of Shinpo.

* 海洋リスク評価系, ** 環境・動力系, *** 知識・データシステム系, **** 海洋先端技術系

原稿受付 令和4年7月22日

審査日 令和4年9月7日

目 次

1. はじめに	42
2. 小型実験船「神峰」と遠隔操船実験	43
2.1 神峰の概要	43
2.2 遠隔制御センターの概要	43
2.3 遠隔操船実験	45
2.3.1 遠隔操船実験の概要	45
2.3.2 遠隔 WP 運航におけるシステムと人の役割	45
3. 静的側面によるリスク解析	46
3.1 遠隔 WP 運航の構成要素のモデル化	46
3.2 遠隔 WP 運航の HAZID	47
4. 動的側面によるリスク解析	48
4.1 遠隔操船者のタスク分析	48
4.2 遠隔操船者のタスクフロー図	50
4.3 遠隔操船者のタスクの HAZID	51
4.3.1 動的タスクベース HAZID の概要	51
4.3.2 動的タスクベース HAZID の結果	51
5. 考察	54
6. まとめ	55
謝 辞	55
References	55

1. はじめに

近年、我が国の船舶の運航の乗務体制、特に内航船では高齢化により船員確保が急務となっている¹⁾。また衝突の原因の多くは人為的要因である²⁾。これらの問題を解決する一つ的手段として、世界的に自動運航船の開発が進められており、海上技術安全研究所（海技研）も、小型実験船「神峰」を対象に様々な自動運航の要素技術を開発している³⁾。

このような新たな技術を社会的に実装するためには、その安全性を評価することが不可欠であり、その手法の一つとしてリスク解析が考えられる。リスク解析（risk analysis）は、リスクの性質を理解しリスクのレベルを決定するためのプロセスを言い、リスク評価（risk evaluation: リスクが許容できるかを判断するプロセス）およびリスク対応（risk treatment: リスクを修正するプロセス）の判断材料を提供することである⁴⁾。従来のリスク解析では、解析対象の機器やその機能といった主に物理的な側面に着目した評価が行われてきた。しかしながら、自動化システムによる自動操船はもとより、例えば自動化システムが提案する避航計画を実行する際に人間の承認を必要とする仕様を持つ自動運航船のように、システムが実行する機能が、ハードウェア、ソフトウェアおよび人間の各要素のいずれか、または全てに関係性を持つ複雑な体系を持つ場合、それらの相互作用による影響も考慮した評価が求められる。

リスクの性質の理解のためのハザード（危険要因）の特定（HAZID: Hazard Identification）手法の一つに、STAMP（Systems-Theoretic Accident Model and Processes）に基づく STPA（Systems-Theoretic Process Analysis）がある。STAMP/STPA は、ハードウェア、ソフトウェア、人間など様々な要素の相互作用に着目した解析手法であり、自動運航船に適していると考えられる。Wróbel ら⁵⁾は、コンセプト段階の自動運航船と沿岸施設などの周辺環境の要素で構成される単純な構造に STPA を適用した。46 個の制御機能と呼ばれる 2 つの要素間の相互作用を対象に、6 個の大分類ハザードについて場合分けされた計 63 個のハザードの発生の可能性について解析した結果、制御機能が無効もしくは不十分になる可能性があるシナリオが特定され、計 249 個の軽減措置が示された。Valdez

Banda ら⁶⁾は、フィンランドの都市部における2隻の自動運航船コンセプトにSTPAを適用し、特定されたハザードとその安全制御策について述べた。その結果、15のハザードとそれに対応する73の安全制御策が提案された。

しかしながら、STAMP/STPAは、構成要素の機能や機能を実行するために必要な情報を明示的に扱っていないため、ハザードの特定でこれらの影響が漏れてしまう可能性がある。そこで、この問題を解決する方法として、塩荊らは、既存のHAZID手法の活用が可能な自動運航船を構成する要素およびタスクを図示するモデル化手法を開発し⁷⁾、この手法を、国内小型フェリーを想定した仮想自動運航船に適用してHAZIDを行った⁸⁾。また石村ら⁹⁾は、前述の仮想自動運航船のモデル図において、各構成要素のタスクに着目し、タスクや構成要素間の相互作用に関するハザードの特定を支援するタスクベースのHAZID手法を提案した。これらの手法は、タスクの不完全な実行、機器の故障、運航設計領域(ODD: Operational Design Domain)からの逸脱という観点でハザードの特定を支援するものであり、システムの構造もしくはタスクに焦点を当てているという違いはあるものの、どちらもシステムが実施する一覧化されたタスクを対象に、タスクの時間変化に依存しない側面(静的側面)に着目した解析と位置付けられる。一方で、自動運航船の機能実行の順序やタイミング、人がタスクを実行するのに必要な時間などのタスクの時間変化に依存する側面(動的側面)がハザードになる場合も考えられる。そこで、三宅ら¹⁰⁾¹¹⁾は、塩荊らの手法による解析対象の構成要素やタスクの静的側面での表現を補完するため、タスクの動的側面を表現できるタスクフロー図を導入し、石村らのタスクベースHAZID手法に組み込んだ動的タスクベースのHAZID手法を提案した。

本論は、神峰の自動運航技術のうち、遠隔操船の安全性を向上させることを目的とし、遠隔操船実験の遠隔ウェイポイント(WP: way point)運航を対象にリスク解析を行った結果を報告する。本論の構成は、以下のとおりである。2章では、神峰の遠隔操船システムおよび遠隔操船実験の概要を紹介する。3章では、塩荊らによる手法を適用し、遠隔WP運航を構成する要素を対象に、静的な側面から見たHAZID結果を示す。これにより遠隔WP運航の安全運航は、遠隔操船者の円滑なタスク遂行が必須であることが示された。続く4章は、遠隔WP運航における遠隔操船者のタスクに着目し、三宅らの手法による動的な側面から見たHAZID結果について述べる。5章は3章と4章の結果について考察し、最後に神峰のリスク解析結果を6章にまとめる。

2. 小型実験船「神峰」と遠隔操船実験

2.1 神峰の概要

神峰は海技研が管理する小型の実験船である。神峰の諸元および外観を表1および図1に示す。また、図2は神峰と遠隔制御センターからなる遠隔操船制御システムの構成である。船上の構成について、操舵関連の機器として、1軸1舵の他、バウスラスタ1機を有している。各種センサーとして、位置情報を取得する準天頂衛星システムQZSS(Quasi-Zenith Satellite System)、船首方位を計測するGPSコンパス、風向風速計、エンジン回転数およびプロペラ回転数を取得するセンサー等が搭載されている。また遠隔操船および通信関連の機器として、周囲映像を取得するネットワークカメラ、LTE(Long Term Evolution)通信システム、アクチュエータを制御するPLC(Programmable logic controller)、PLCへの制御入力値やアクチュエータからの応答値を表示するタッチパネルディスプレイ、PLC制御用PCを装備している。なお遠隔制御センターの構成は2.2節に示す。

表2は、神峰の遠隔操船制御システムの概要である。操船基本システムは、主にPLCによりアクチュエータを制御するとともに、PLCによる自動制御と手動制御の切り替え、異常発生時の警報、誤操作に対するインタロック機能を有している。WP運航システムは、あらかじめ設定されたWPを目標進路として舵角を自動制御するシステムである。遠隔操船システムは、LTE通信により遠隔制御センターから神峰を操船するシステムである。

2.2 遠隔制御センターの概要

図3は、図2が示す遠隔操船制御システムのうち、東京都三鷹市の海技研内にある遠隔制御センターの構成を示す。遠隔制御センターは、PLC、操船基本システムおよびWP運航システムを操作するタッチパネルディスプレイ付きコンソール、神峰およびWPの位置を電子海図(ENC)に表示する自船位置情報等提示モニター、船上

映像用モニター，WP 運航システムが発出する警報等を入力するスピーカー，および画像表示用 PC で構成される。

表 1 小型実験船「神峰」の諸元

要目 [単位]	数値
全長[m]	16.50
垂線間長さ [m]	14.90
幅 [m]	4.60
型深さ [m]	1.50
喫水 [m]	0.75
総トン数	17

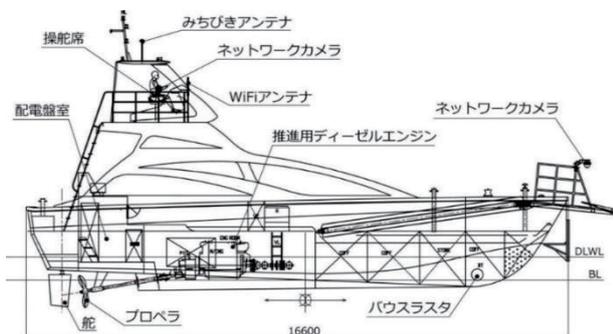


図 1 小型実験船「神峰」の外観 (文献¹²⁾より引用)

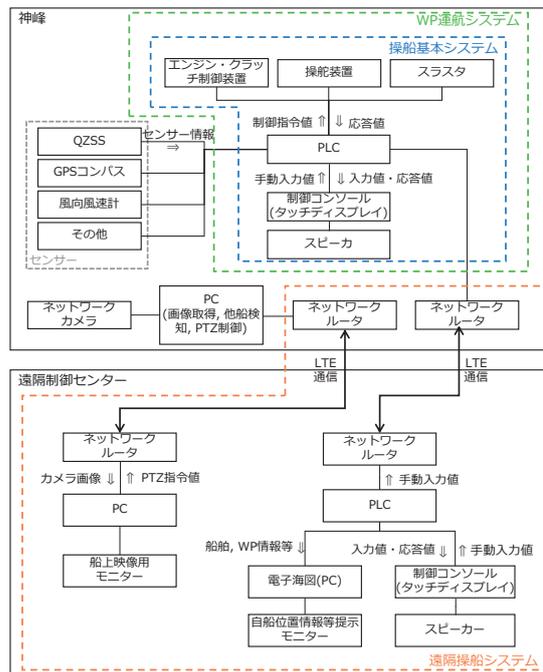


図 2 遠隔操船制御システムの構成 (文献¹¹⁾より翻訳のうえ引用)

表 2 神峰の遠隔制御システムの概要

システム名	概要
操船基本システム	船舶のアクチュエータを PLC により自動制御する基本システム
WP 運航システム	事前に設定された WP に沿って，舵を制御して航行する自動制御システム
遠隔操船システム	神峰と遠隔制御センターを LTE 通信で接続し遠隔操船を可能にするシステム



図 3 遠隔制御センターの構成 (文献¹¹⁾より翻訳のうえ引用)

これらのうち一部は遠隔操船者の操作を要する。操船基本システムおよび WP 運航システムは，同一のタッチパネルディスプレイ上に表示され，システム画面の切替えおよびシステム操作は，タッチパネルディスプレイ上のボタン並びにコンソール機器を通して実行される。また，自船位置情報等提示モニターは，遠隔操船者のマウス操作により表示する範囲等を変更することができる。カメラ映像を表示する船上映像用モニターは 4 分割され

ており、左右舷別に、下段は半球状に視野を持つ固定式魚眼カメラ画像とカメラ画像処理後の他船検出結果が表示される。上段は首振り制御可能な PTZ (Panoramic Tilt Zoom) カメラ画像であり、遠隔操船者がマウスを使って魚眼カメラ画像や PTZ カメラ画像上で指定した場所を拡大表示することができる。遠隔操船者の前方の左側のモニターは、遠隔操船者と船上乗組員の連絡用として音声および着離棧操船システム画像や予備カメラで撮影された船首正画像等を適宜表示するテレビ会議端末であり、表示される画像は予備的な使用目的であることから本研究の対象外である。

遠隔 WP 運航中にシステムから遠隔操船者に提供される情報は、後述する図 5 を参照されたい。なお、表示される情報のリアルタイム性を確認するために、常時各画面にシステム時間 (秒単位) が表示されている。

2.3 遠隔操船実験

2.3.1 遠隔操船実験の概要

遠隔操船実験は、2021年4月に広島県因島周辺にて行われた。図4に実験海域と計画航路を示す。計画航路は片道約20分であり、事前に設定された13個のWPで構成される。遠隔操船実験全体の流れは、試験開始～船上での手動離棧～遠隔操船によるWP運航 (以下、遠隔WP運航) (WP1～6)～仮想棧橋への自動着棧～遠隔での手動離棧～遠隔WP運航 (WP8～13)～自動着棧～試験終了である。本論では、このうち遠隔WP運航 (WP1～6およびWP8～13) のフェーズを対象とする。遠隔WP運航での主な手順は以下の通りである。

- (1) 手動離棧後、十分に離れた地点で遠隔操船者が遠隔操船システムにより WP 運航システムを開始する。
- (2) 遠隔操船者がコンソール上のジョイスティックを操作し、手動で増速する。
- (3) WP 運航システムが自動的に舵角を制御し、目標 WP に向かって航行する。
- (4) 目標 WP に接近すると、次の WP への変針角を周知し遠隔操船者の承認を要求する。
- (5) 遠隔操船者は安全確認を行い、変針を承認する。
- (6) WP 運航システムは変針を開始し、目標 WP を更新する。
- (7) 最終 WP (往路は WP6, 復路は WP13) に接近すると、遠隔操船者に遠隔 WP 運航の終了を通知する。
- (8) 遠隔操船者は遠隔 WP 運航を終了し、次のフェーズに移行する。

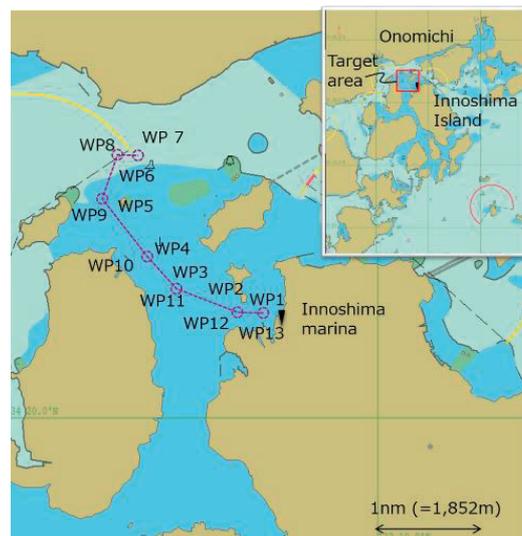


図4 遠隔操船実験の実験海域と計画航路 (文献¹¹⁾より一部修正のうえ引用)

2.3.2 遠隔WP運航におけるシステムと人の役割

表3は、遠隔WP運航におけるシステムと人の役割である。遠隔操船者は船長の役割を担い、モニター等から得た情報を元に神峰の操船を行う。船上の乗組員は、基本的に実験補助要員であり、遠隔操船者からの要請により他船の動向や緊急時対応などの補足情報を収集提示する。

表3 システムと人の役割分担

	陸上	船上
人	遠隔操船者 ・ システム監視 ・ 次フェーズへの移行判断と実行 ・ 手動と自動操船の切替判断と実行 ・ WP 変針承認の判断と実行 ・ 避航の判断と実行	実験補助要員 ・ システム監視支援 ・ 見張り支援と遠隔操船者への情報提供 ・ 遠隔操船の強制終了の判断と実行
システム	・ 船上からの情報の取得と提示 ・ 船上への遠隔操船者の指令値送信 ・ システムエラー時の警報発出	・ 計画航路に沿った操船実行 ・ カメラ情報等の取得と陸上への送信 ・ システムエラー時の警報発出

3. 静的側面によるリスク解析

3.1 遠隔 WP 運航の構成要素のモデル化

神峰の遠隔 WP 運航のハザードを特定するため、遠隔 WP 運航を行う機器類（ハードウェアおよびソフトウェア）並びにそれらの機器類を操作する人間（遠隔操船者および船上の実験補助要員）を構成要素として定義し、各構成要素のタスクや要素間の相互作用について整理して、UML (Unified Modeling Language) のクラス図を応用したモデル図¹³⁾として図5を作成した¹⁴⁾。これを活用することにより、複数の解析者の理解の共有の円滑化とともに、機器故障に加え、各構成要素間のタスクや構成要素間の相互作用に関するハザードの特定に役立つことが期待できる。詳細は文献⁸⁾¹⁴⁾を参照されたい。

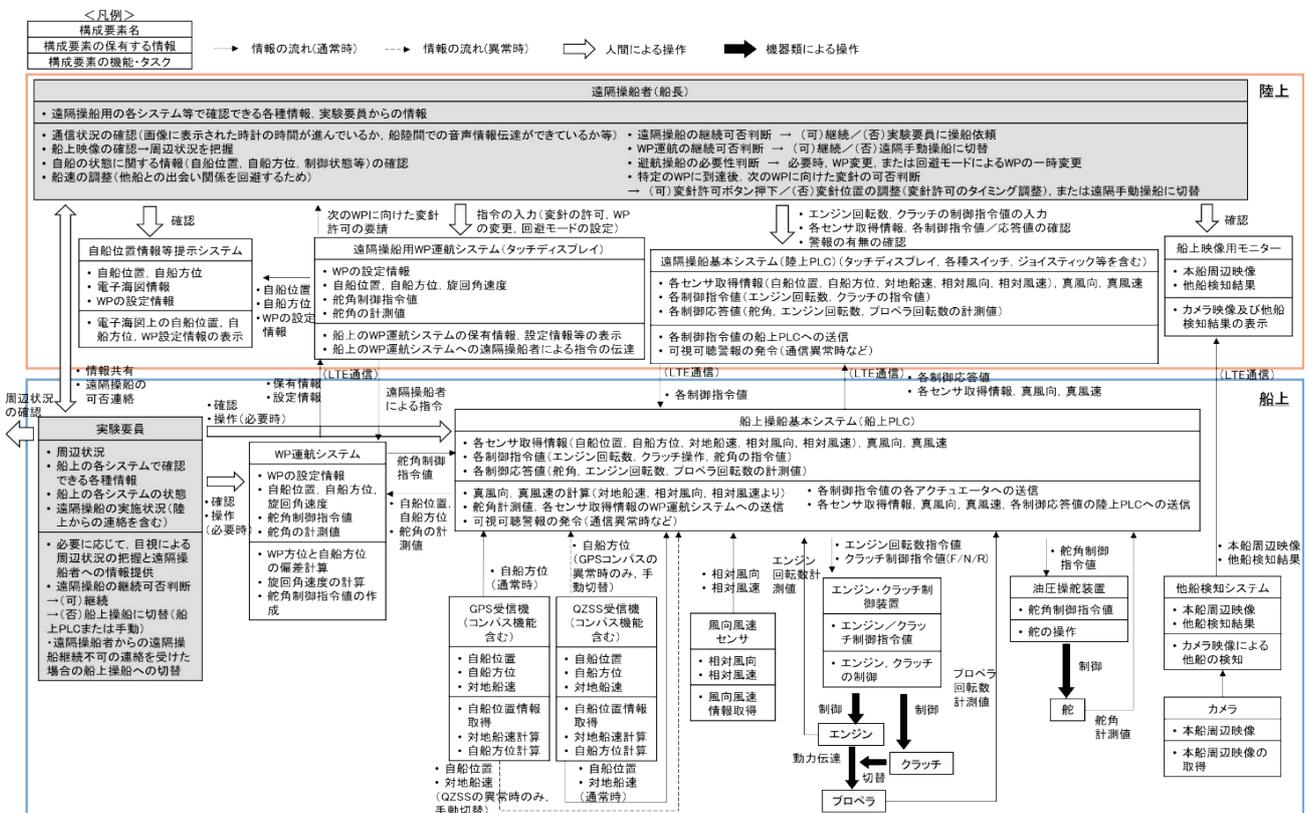


図5 遠隔 WP 運航のモデル図 (文献¹⁴⁾より引用)

モデル図は、ボックスと各ボックス間の矢印により構成される。3段のボックスが一つの構成要素を表し、1段目が構成要素名、3段目がその構成要素が果たす機能やタスクなどの役割、2段目がその役割の実行に必要な保有情報を示す。さらに、矢印は、構成要素間の情報の入出力や人間による機器等の操作、ソフトウェアによる制御指令に基づく機器等の操作などの構成要素間の相互作用を表現する。

遠隔 WP 運航の主要な流れを紹介する。船上では、2.1 節で述べた各種センサーが収集する位置情報等のセンサー情報を船上の PLC が集約し、その情報を元に、WP 運航システムが計算した舵角の制御指令値に基づき目標 WP に向けた自動操舵を行うことが表現されている。また遠隔制御センターの各機器は、LTE 通信により取得した船上 PLC および WP 運航システムの保有情報、船上カメラ映像を表示し、遠隔操船者はこれらの情報を元に状況を判断して、変速や WP 運航システムから提示される次の WP に向けた変針許可を行うという流れがモデル図から容易に理解できる。

3.2 遠隔 WP 運航の HAZID

3.1 節で作成したモデル図を用いて遠隔 WP 運航の HAZID を行い、HAZID ワークシートに結果を整理した。図 6 に、船上について特定されたハザードの一部を示す。モデル図を用いた HAZID の目的は、神峰の遠隔 WP 運航の安全性向上のため、安全対策を講じることが望まれる構成要素を抽出することである。各構成要素の主要なタスクが実行できない場合を中心に、各構成要素のハザードを特定し、ハザードが発生しやすい構成要素を特定した¹⁵⁾。

Sheet ID:	1	Project Name:	神峰HAZID
System:	船上	Project Unit:	自動運航船PTリク班
Sub-system:	-		
Phase:	航行時		
Sub-phase	-		

ID	Components 構成要素	Hazard ハザード	Causes 原因	Consequences 結果	Safeguards 防御手段	Recommendation 追加の対策	Index (after action)			Comments コメント
							SI	FI	RI	
1	船上システム全般	制御信号の遅れ	通信障害, 制御プログラムの動作遅延	指示動作の遅延, 航跡のオーバーシュート						
2	船上システム全般	自船への物理的損傷の発生	障害物への接触, 経年劣化, 整備不良	操縦異常, センサー故障による自動化システム停止, 通信不良						
3	WP航行システム	異常なWP航行	データのエラー, 設定等操作ミス	予定外の航行発生, 自動化システムの停止, 表示異常による混乱						
4	船上操船基本システム (船上PLC)	船舶の制御不能	船舶制御システムの故障	衝突・接触・座礁・船体傾斜・転覆・沈没						
5	船上操船基本システム (船上PLC)	急旋回, 急停止等危険な操船の発生	・自動化システムの急停止 ・ギリギリでの障害物検知による回避行動	乗員の負傷, 荷崩れの発生						
6	船上操船基本システム (船上PLC)	船舶の操縦性の悪化	・荒天, 機関や舵などの異常 ・荷崩れによるバランス崩壊	自動操船で制御できず機能停止						
7	船上乗組員	自動操船解除の遅れ	・不適切なヒューマンインターフェース ・船上乗組員の現場不在	限定領域外での自動運航						
8	船上乗組員	船上乗組員のヒューマンエラー	・訓練不足 ・情報と現状の誤認 ・疲れ, 不注意	衝突・接触・座礁・船体傾斜・転覆・沈没						
9	船上乗組員	(船上乗組員の) 目視監視不全	・濃霧や豪雨による視界不良, 双眼鏡を失くす	周辺状況把握の不全による事故等の発生						

図 6 HAZID ワークシート

表 4 はモデル図の構成要素別に抽出された主要なハザードの個数である。特定されたハザードの個数は、概ね主要タスク数に比例し、タスクが多い船上操船基本システムや船上乗組員、遠隔操船者のハザードが多く特定された。遠隔制御センターの船上映像用モニターは、タスク自体は多くないものの、その情報から状況を判断し操船するという遠隔操船者のタスクに密接に関係することから、船上映像用モニターのハザードも多く特定された。

表 5 は、船上全般と遠隔制御センター全般、遠隔操船者に関するハザード例である。図 6 および表 5 に示すように、特定されたハザードの原因は、機能喪失や情報伝達の遅延や失敗が多く、その他には人的要因や環境等の外的要因などが挙げられた。

ここで、遠隔操船者に関するハザード「WP 変針の承認の遅れ」について観察する。このハザードの原因はその性質から 2 つに分類でき、機器に関連する原因として遠隔操船用 WP 運航システムからの承認要請の遅延と、人的な原因として承認要請の意図の理解に時間を要する、および周辺状況の確認に時間を要するに分けられる。

後者の人的な原因は、遠隔操船用 WP 運航システムと船上映像用モニターに関連するものであり、ハザードを解消するためには、これらインターフェースに何らかの安全対策が講じられることが望まれる。一方で、例えば原因「周辺状況の確認に時間を要する」について熟慮すると、船上映像用モニター画像の遅延や、カメラ操作の手順が多いなどの操作性の困難さ、遠隔操船者のシステムへの不慣れなどの個人的スキルの熟度が、原因の背後に存在している。これらは、タスク実行の順序やタイミング、および個人のタスク遂行の所要時間に関係している。言い換えれば、タスクの順序、タスク実行のタイミング、タスク遂行期間という動的特性は、遠隔操船者のタスク実行の重要な側面であり、これらの不具合は遠隔操船者のタスクの円滑な実行を妨げうる要因となるため、結果として他船との衝突等の重大な結果を引き起こす可能性がある。そこで、多くのハザードが特定され、動的特性を持つタスクが多い遠隔操船者について、動的な側面でのリスク解析を行った¹⁾。

表4 構成要素別のハザード個数

場所	構成要素名	ハザード数
船上	全般	3
	WP 航行システム	2
	船上操船基本システム	4
	他船検知システム	2
	通信機器	2
遠隔制御センター	船上乗組員	4
	全般	4
	遠隔操船基本システム	1
	遠隔操船用 WP 運航システム	1
	自船位置情報等提示システム	1
合計	船上映像用モニター	5
	通信	2
	遠隔操船者	5
合計		36

表5 特定されたハザードの例

	ハザード	制御信号の遅れ
船上全般	原因	通信障害、制御プログラムの動作遅延
	結果	指示動作の遅延、航跡のオーバーシュート
遠隔制御センター全般	ハザード	船上からの情報の欠落・異常
	原因	センサー故障、通信障害
	結果	現在地取得不能や、船上からの情報取得不能により、操船判断不可。
遠隔操船者	ハザード	WP 変針の承認の遅れ
	原因	承認要請の遅延、承認要請の意図の理解に時間を要する、周辺状況の確認に時間を要する。
	結果	航路からの逸脱

4. 動的側面によるリスク解析

4.1 遠隔操船者のタスク分析

遠隔 WP 運航中の遠隔操船者のハザードを特定するため、まず実験および録画した実験映像を観察し遠隔操船者のタスクを整理した。文献¹⁶⁾を参考に、遠隔操作者が行うタスクを抽出しそのタスクを処理する操船技術の要素別に整理したところ、操縦、見張り、測位、システム監視の4つに分類できた。これらを遠隔操船者のメインタスクとして定義した。遠隔操船者のメインタスクとその概要を表6に示す。操縦、見張り、測位は、遠隔 WP 運航に関わらず船上での手動操船でも実行されるタスクである。メインタスクは、表7から表10に示すように、認知行動や操作手順を元にサブタスクに分類した。さらにサブタスクは、カメラ映像やセンサーからの情報収集、意思決定、システム操作など、詳細な作業で構成されていることが観察された。

表6 遠隔 WP 運航中の遠隔操船者のメインタスク

タスク名	概要
操縦	遠隔制御センターからの神峰の操船

見張り	他船動向の監視
測位	神峰と目標 WP の測位
システム監視	システム監視と異常時対応

表7 メインタスク「操縦」の概要

サブタスク	詳細
操作開始	<ul style="list-style-type: none"> ・遠隔 WP 運航の開始時機の判断 ・初期目標 WP の設定 ・WP 航行システムの起動操作 ・エンジン回転数の設定
避航	<ul style="list-style-type: none"> ・避航有無の判断 ・避航手段の決定 ・変針角と速力の調整 ・避航終了の判断 ・WP 航行システム停止と手動による避航の実行
次 WP への移行	<ul style="list-style-type: none"> ・目標 WP までの距離と変針角の確認 ・次 WP への移行時機の判断 ・次 WP への移行の承認 (変針実行の承認)
緊急停止	<ul style="list-style-type: none"> ・遠隔 WP 運航の終了時機の判断 ・WP 航行システム停止操作

表8 メインタスク「見張り」の概要

サブタスク	詳細
障害物発見	<ul style="list-style-type: none"> ・魚眼カメラ画像の確認 (景観画像) ・障害物の発見 ・船上実験要員への情報提供要請 (障害物)
他船識別	<ul style="list-style-type: none"> ・魚眼カメラ画像の確認 (景観画像, 他船検出結果) ・他船検出結果の詳細確認 ・PTZ カメラ画像の確認 ・PTZ カメラ操作 (向き, ズーム) ・障害物が船舶か物体かの識別 ・船上実験要員への情報提供要請 (他船の有無)
他船情報の収集	<ul style="list-style-type: none"> ・PTZ カメラ画像の確認 ・PTZ カメラ操作 (向き, ズーム) ・他船情報の収集 ・船上実験要員への情報提供要請 (他船の有無)
他船の行動予測	<ul style="list-style-type: none"> ・他船との航過距離の予測 ・船上実験要員への情報提供要請 (他船行動)

表9 メインタスク「測位」の概要

サブタスク	詳細
神峰の測位	<ul style="list-style-type: none"> ・魚眼カメラ画像の確認 (景観画像) ・ENC 操作 (移動, ズーム) ・神峰の周辺環境の確認 ・神峰の位置確認 ・ENC 画面上での位置確認
WP の測位	<ul style="list-style-type: none"> ・WP 航行システム画面の操作 ・ENC 操作 (移動, ズーム) ・目標 WP 情報の収集 ・目標 WP 位置の確認 ・ENC 画面上での位置確認
神峰と WP の相対測位	<ul style="list-style-type: none"> ・神峰と WP の相対位置の確認 ・船上実験要員への情報提供要請 (運航情報)

表10 メインタスク「システム監視」の概要

サブタスク	詳細
通信状況の監視	<ul style="list-style-type: none"> ・通信の死活監視 ・通信遅延の監視
システムエラーの監視	<ul style="list-style-type: none"> ・警報発出の確認
船体の安全確保	<ul style="list-style-type: none"> ・船上要員との情報共有 ・緊急停止

4.2 遠隔操船者のタスクフロー図

システム仕様と録画した実験映像の観察結果より、遠隔 WP 運航における遠隔操船者のタスクフロー図を作成した。メインタスク「見張り」「測位」「システム監視」と並行した「操縦」など、操船者の複雑な流れを表現するため、本研究では UML の振る舞い図の一種であるアクティビティ図を適用した。詳細は文献^{13) 17)}を参照されたい。

アクティビティ図は、システムやそれに関連する対象物の動作の流れをモデル化したものであり、アクティビティ図を構成する要素は図 7 に示す記号で表現される。記号で表される要素のうち、処理等の作業を表す要素は「アクション」「シグナル送信」「シグナル受信」の 3 つであるが、本研究では遠隔操船者がシステムに対し何らかの操作を行うことによって実行される処理と、遠隔操船者による操作を必要としない処理を識別するため、遠隔操船者がシステムに対して信号を送る動作を「シグナル送信」、システムが遠隔操船者からの信号を受信することによって行う動作を「シグナル受信」、それ以外を「アクション」として表現した。またアクション間をつなぐ矢印は、コントロールフローエッジとオブジェクトフローエッジの二つの意味合いを有し、コントロールフローエッジはアクション間の順序を定義するだけであるが、オブジェクトフローエッジはアクション間の順序に加えデータやオブジェクトの流れを定義することができる。図 9 を例にすると、遠隔操船者によるカメラ操作により信号が送信され(シグナル送信「PTZ カメラの操作」)、システムが受信した信号に従い PTZ カメラを調整し(シグナル受信「PTZ カメラの調整」)、モニターにカメラ画像が表示される(アクション「PTZ カメラの操作」)。シグナル送信「PTZ カメラの操作」とシグナル受信「PTZ カメラの調整」間の矢印はデータの流れおよびアクションの実行順序を表すオブジェクトフローエッジであり、シグナル受信「PTZ カメラの調整」とアクション「PTZ カメラの操作」間の矢印は、アクションの実行順序のみを表現するコントロールフローエッジの意味を持つ。

記号		説明
●	開始ノード	フローのスタート地点
□	アクション	処理等の作業
Activity	アクティビティ	下位の作業の実行手順を整理したもの
→	シグナル送信	シグナルを送信するアクション
⌋	シグナル受信	イベントの発生を待つアクション
◇	分岐/マージ	条件分岐/合流
—	フォーク/ジョイン	複数処理の同時進行
●	終了ノード	フローのゴール地点
⋯	割り込み可能領域	割り込み(キャンセル要求など)が発生すると、領域内のすべてが終了
Expansion Node	拡張領域	複数の入力の個々に対して実行されるアクティビティ

図 7 アクティビティ図の凡例^{13) 17)}

図 8 および図 9 は、遠隔操船者のメインタスクのアクティビティ図である。「測位」「システム監視」については、文献¹¹⁾を参照されたい。各図の最終状態は、メインタスクの完了と、本研究のスコープ外である仮想棧橋への自動着棧などの別フェーズへの移行を表している。図 8 のアクティビティ「避航」は、表 7 のサブタスク「避航」の下位の作業を実行するための詳細な手順を表現している。図 9 のアクション「他船情報の収集」は、表 8 の遠隔操船者のサブタスクの一つである「他船情報の収集」に相当する。図 9 の拡張領域は、領域内のアクションの反復を表現し、周囲の全ての船舶の動向を監視する「見張り」が、航海中に継続して実行されることを意味する。さらに、フォーク/ジョインで挟まれた部分は遠隔操作者の動作の並列処理を表し、例えば図 9 では、マウスでカメラを操作した後にカメラ画像から情報を収集する過程と、他船識別から行動予測までの認知行動の過程の両方が完了しなければ、次の動作に移行することができないことを意味する。

実際には、遠隔 WP 運航は図2や図5が示すように船上と陸上の複数のシステムで構成されており、センサー情報やシステム間の指令制御値など、多くの詳細な情報が入出している。遠隔 WP 運航全体のリスク解析を行うためには、それらすべての情報をタスクフロー図として表現する必要があるが、本研究では、遠隔操船者のタスクのハザードを特定するために過不足ない情報を表現するため、遠隔操船者とシステムの対比が理解しやすいように、アクティビティ図では2つのパーティションに大別した。システム側におけるアクションは、遠隔操船者に直接関係する要素のみに限定した。例えば、図9のアクション「PTZカメラ画像の表示」をするためには、図5を参照すると「周辺映像の取得」、「カメラ映像による他船の検知」、「LTE通信で遠隔制御センターに画像を送信」の必要があるが図9では省略している。

リスク解析において、「見張り」や「測位」をもとに避航などの「操縦」を行うというメインタスク間の相互作用が、図8から図9では表現できていないことに注意する必要があるものの、タスクフロー図を用いることで、遠隔操船者のタスクの流れや、システムと遠隔操作者間の相互作用を理解することができる。また、タスクフロー図はタスクの順序やタイミングを表現できるため、時間変化を考慮、つまり動的な側面に着目した HAZID に役立つと期待できる。

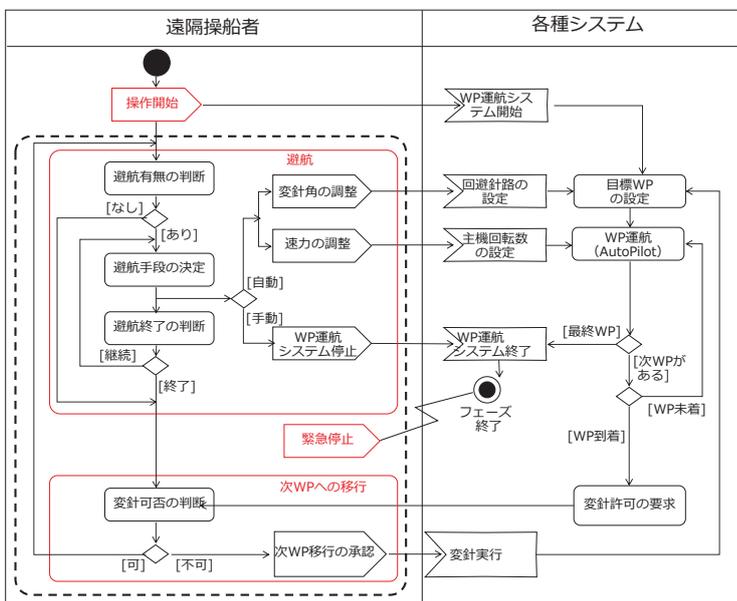


図8 「操縦」のアクティビティ図 (文献¹¹⁾より翻訳のうえ引用)

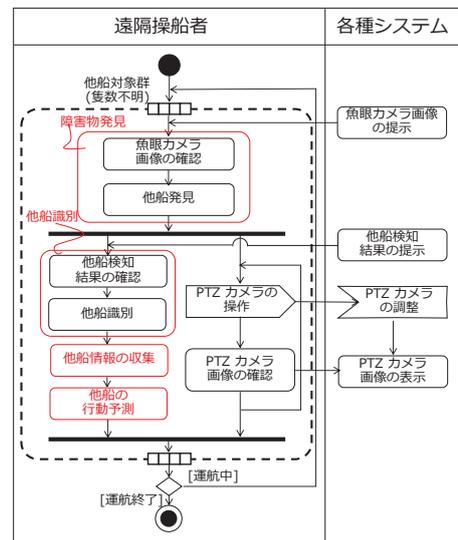


図9 「見張り」のアクティビティ図 (文献¹¹⁾より翻訳のうえ引用)

4.3 遠隔操船者のタスクのHAZID

4.3.1 動的タスクベース HAZID の概要

4.2節で作成したタスクフロー図を用いて、遠隔 WP 運航中の遠隔操船者のタスクについてハザードを特定した。ここでの目的は、神峰の遠隔 WP 運航の安全性向上のため、遠隔操船者の円滑な作業を妨げる要因を特定し、安全対策案を検討することである。HAZID は、ブレインストーミングでハザードを特定する Structured What IF Technique (SWIFT) を用いた HAZID オンライン会議形式で、タスク実行の未完了、タスク実行の失敗、タスクの順番の入れ替え、機器故障による情報の欠落など、通常の手順や状態からの逸脱という観点で行った。更に特定されたハザードの原因および結果を検討し、想定できる安全対策を立案した。なお、4.2節で述べたメインタスク間の相互作用が表現できていないことに対する対策として、本研究では、事前に遠隔 WP 運航の様子を見学するなど、メインタスクが密接に関連していることを解析者全員が理解した上で HAZID を実施した。

4.3.2 動的タスクベース HAZID の結果

HAZID の結果、一部重複を含めて 30 件のハザードが特定された。メインタスク別に特定されたハザードの数を表 11 に示す。カメラ画像の停止や遅延など、全メインタスクに共通するハザードも確認された。表 12 および

表 13 に HAZID 結果の一部として、「操縦」およびタスク共通のハザード，その原因や結果，ハザードに対する安全対策を示す。その他のメインタスクの HAZID 結果は，文献¹¹⁾を参照されたい。

特定されたハザードは，直前タスクの誤り，直前タスクの未完，タスクに必要な情報の不足に起因するものが多かった。その結果，直後タスクの遅延や不実行により，操作の遅れや不実行が発生し，最終的には他船との衝突や座礁，単衝突の発生が想定された。ハザードの頻度は，原因の発生頻度に基づき設定される。機器の不具合に起因するハザードの場合，一般的には機器の故障率などの蓄積されたデータをもとに設定されることが多いが，これらデータを得られるケースはあまり多くない。本研究で特定されたハザードにおいても，その原因は主に機器や通信の精度並びに人為的ミスが発生頻度に依存するため，さらなる詳細解析が必要とされた。詳細解析には，例えば初期事象を起点に分岐するシーケンスの発生確率を求めるイベントツリー（event tree）分析が有効と考えられる。またハザードの深刻度は，結果の影響の度合いに基づき設定され，本研究では船舶海上分野での定義例¹⁸⁾を参考に死亡者が発生するか否かの観点で整理したところ，死亡者が発生する可能性があるハザードが多かった。

このようなハザードに対する安全対策として，システムの冗長化，遠隔操船者の認識支援，遠隔操船者のシステムへの習熟度を向上させるための訓練等が挙げられた。遠隔操船の安全性を確保するためには，例えばマウスやタッチパネルディスプレイの操作方法を容易にして所要時間を短縮するなどにより，各タスクが円滑に実行され，適切な時機にシステムからの情報が遠隔操作者に適切に提示される必要があることが示唆された。

またタスクフロー図を参照することで，遠隔操船者のタスクの流れやタスク実行のトリガー（カメラ画像の提示など）が明確になるとともに，タスク遅延（避航有無の判断の遅れなど）のような時間に関連するハザードが特定された。特に，タスクフロー図の表記法としてアクティビティ図を適用することにより，マウスを使った PTZ カメラ操作と他船識別等の認知のタスクの並列処理が表現でき，他船の航行により画角から外れる，また複数の他船映像の切り替え等のための複数回のカメラ操作に時間を要することにより，結果として，遠隔操船者が他船や障害物の認知の遅延が発生する等，遠隔操船者に負荷がかかるマルチタスク発生個所の発見およびそれによるハザードの特定が容易になった。

動的タスクベース HAZID の結果，機器や通信の不具合並びに人為的ミスに起因するハザードが，人命および財産（船体や積み荷等）の喪失並びに油流出等による環境汚染を引き起こしかねない衝突，座礁，単衝突という結果につながることを示されたが，その頻度については上述の通り詳細解析が必要である。しかしながら，ハザードと結果のリンクおよび結果の深刻度を分析することによって，頻度が不明であっても，ハザードの深刻度が許容できるかを判断し必要に応じてリスクの修正（安全対策の立案など）が可能，言い換えれば，リスク評価・リスク対応の材料を提示することができた。

表 11 メインタスク別のハザード個数

メインタスク	ハザード数
操縦	12
見張り	10
測位	0
システム監視	3
共通	5
合計	30

表 12 特定されたハザードの例（操縦）

ハザード	避航有無の判断の誤り／遅れ／判断ができない
原因	・遠隔操船者が障害物検知，他船識別，他船行動予測などを適切にできない
結果	・他船との衝突，座礁，単衝突
頻度	・詳細解析が必要
深刻度	・死亡者が発生する可能性あり

安全対策	・レーダーや自動衝突予防援助装置 (ARPA : Automatic Radar Plotting Aids) の活用
ハザード	避航手段の判断の誤り/遅れ/判断ができない
原因	<ul style="list-style-type: none"> ・遠隔操船者が他船の行動を予測できない ・避航有無の判断に時間を要する ・複数の他船の存在により、避航対象船や避航手段の判断を誤る
結果	<ul style="list-style-type: none"> ・他船との衝突 ・大幅な変針や変速による計画経路からの逸脱→他船との衝突, 座礁, 単衝突
頻度	・詳細解析が必要
深刻度	・死亡者が発生する可能性あり
安全対策	<ul style="list-style-type: none"> ・正確な自船性能の把握 ・上記のマニュアル記載と遵守 ・レーダーや自動衝突予防援助装置 (ARPA : Automatic Radar Plotting Aids) の活用
ハザード	遠隔操船者の変針角入力への誤り
原因	<ul style="list-style-type: none"> ・変針角設定方法がわからない→操作の遅れ ・設定値の入力ミス→計画航路からの逸脱 ・通信エラーにより設定値が船舶に送信されない→操船の不実行
結果	・他船との衝突, 座礁, 単衝突
頻度	・詳細解析が必要
深刻度	・死亡者が発生する可能性あり
安全対策	<ul style="list-style-type: none"> ・遠隔操船者のシステム完熟訓練 ・上記のマニュアル記載と遵守 ・通信の二重化 ・船上実測値の提示と確認 ・設定値のシステムアナウンス

表 13 特定されたハザードの例 (メインタスク共通)

ハザード	タッチディスプレイでの操作ができない/遅れる
原因	<ul style="list-style-type: none"> ・遠隔操船者がシステムに慣れてない ・システム操作の分かりにくさ
結果	<ul style="list-style-type: none"> ・WP 運航システムと操船基本システム (PLC) の切り替えができない ・適切な時機に必要な情報を得られない, または必要な入力ができない ・(上記の結果) 他船との衝突, 座礁, 単衝突
頻度	・詳細解析が必要
深刻度	・死亡者が発生する可能性あり
安全対策	・操舵輪など, 入力装置や入力方法の二重化
ハザード	カメラ画像の停止/遅延
原因	<ul style="list-style-type: none"> ・通信途絶や遅延 ・船上カメラの故障や不具合
結果	<ul style="list-style-type: none"> ・遠隔操船者が他船や障害物を発見できない→避航の遅れ・避航の不実行→他船との衝突, 座礁, 単衝突 ・自船位置を確認できない→他船や障害物との距離の誤認・認識できない→他船との衝突, 座礁, 単衝突
頻度	・詳細解析が必要
深刻度	・死亡者が発生する可能性あり
安全対策	・通信状況の死活や遅延監視の自動化

-
- ・通信エラー時の警報発出の自動化
 - ・通信の二重化
 - ・通信異常時の船上実験要員による強制的な運航中止
-

5. 考察

本研究では、神峰の遠隔 WP 運航のハザードを特定するため、静的および動的の2つの側面から HAZID を行った。得られた HAZID の結果をもとにリスクが許容できるかの判断並びに安全対策の立案はリスク評価およびリスク対応のプロセスで行うものであるが、4.3.2 項で述べたように、ハザードと結果の関係性を理解することはリスク評価・リスク対応の材料を提示するために重要である。

静的側面による HAZID では、遠隔 WP 運航を行う機器類並びにそれらの機器類を操作する人間を構成要素とし、それらタスクや要素間の相互作用を、UML のクラス図を応用したモデル図として表現した。これを用いることにより、複数の解析者の共有理解を円滑にするとともに、機器故障だけでなく、各構成要素のタスクや構成要素間の相互作用に関するハザードの特定が容易になると期待される。

一方で、モデル図に記載する情報の粒度が大きすぎる（例えば、図5の遠隔操船者のタスクが「システムからの情報をもとに操船する」のみ）、または小さすぎる（例えば、図5の遠隔操船者のタスク「船速の調整（他船との出会い関係を回避するため）」を「速力をボタンで入力する」と「速力をジョイスティックで操作する」に細分化）と、特定されるハザードに漏れが生じる、または解析工数が増加するなどの問題が発生する可能性がある。そのため解析の目的を考慮して、例えば図5に示す主要機能別に整理するなど適切な粒度で情報を整理する必要がある。

また、表5で挙げられたハザード「制御信号の遅れ」の原因「通信障害」は、厳密には、機器の設置場所やアンテナまでの距離などの特性に依存する。しかしながら、本研究の目的は、3章で示した通り、神峰の遠隔 WP 運航の安全性向上のため、安全対策を講じることが望まれる構成要素を抽出することであり、上述した特性をすべて包含した原因「通信障害」とすることで、例えば、「通信障害の冗長性」という核となる安全対策を挙げることができる。当然ながら、例えば機器の特性に起因するハザードに対して安全対策を講じることを目的とする場合は、機器の仕様や特徴を考慮した解析が望ましいと考えられる。

続く動的側面による HAZID では、遠隔操船者のタスクを、UML のアクティビティ図を適用したタスクフロー図として表現した。本研究ではタスクの並列処理を表現できる表記法としてアクティビティ図を適用したが、タスクの時間変化を表現できるのであれば例えばフローチャート（フロー図）でも代用可能と考える。タスクフロー図を用いることで、タスクの流れやタスク実行のトリガーが解析者に簡潔に提示でき、タスク遅延のような時間に関するハザードの特定に役立つと期待される。一方で、例えば、2.2 節に示す PTZ カメラ操作のためのマウス操作をタスクフロー図に記載して粒度を小さくすると、マウス操作に要する待ち時間を考慮しやすい反面、タスクフロー図が複雑になるため、上述のモデル図と同様に記載する情報は適切な粒度で整理する必要がある。また HAZID は、事前に遠隔 WP 運航の様子を観察することによってアクティビティ図で表現できなかったメインタスク間の相互作用を理解したうえで実施したが、メインタスク間の相互作用を表現したタスクフロー図は、漏れなくハザードを網羅するための解析用資料として重要であり、その表現方法の検討は今後の課題としたい。

また、本研究では、静的および動的側面ともに、ブレインストーミング形式でハザードの特定を行ったが、解析に不慣れな初心者には実施が困難な場合がある。これを解決する方法として、4.3.1 項で示す解析の観点（タスク実行の未完了、タスク実行の失敗、タスクの順番の入れ替え、機器故障による情報の欠落など、通常の手順や状態からの逸脱）を挙げることにより、解析の手掛かりが明確になり、ハザードの特定が容易になると考えられる。別の自動運航船に適用する場合においては、評価対象物に対して十分な知見を有する専門家による HAZID の実施、解析の事例や過去の解析結果の参照、また上述の解析観点のようなチェックリストを活用することにより解析者の能力に依存しやすい HAZID の結果の粒度をある程度揃えることが可能と考える。

6. まとめ

本論では、小型実験船「神峰」の安全性を向上させることを目的として、遠隔WP運航を対象にリスク解析を行った結果を報告した。まずリスク解析に必要な情報を容易に理解できる形で表現するため、UMLのクラス図の表記法を応用して遠隔WP運航を構成する要素のモデル化を行い、これを用いてHAZIDを行った結果、タスクが多い要素で多くのハザードが特定された。特に遠隔操船者はそれ単体でのハザードが多く特定された他、遠隔操船者のタスクに密接に関係する船上映像用モニターにおいても多くのハザードが特定された。そのため、重大な結果を持つハザードを引き起こしうるタスクの順序、タスク実行のタイミング、タスク遂行期間という時間変化に着目して、遠隔操船者のタスクについて、動的な側面でのリスク解析を行った。遠隔操船者のタスク分析結果をもとに作成したUMLのアクティビティ図の表記法を適用したタスクフロー図を用いてHAZIDを行った結果、タスクの遅延やタスクの同時発生など、時間に関するハザードを特定することができ、安全対策の案を講じることができた。

これらのリスク解析の結果は、神峰の遠隔操船技術の安全性向上に活用されている。さらに、神峰ばかりでなく将来の自動運航船における遠隔操船技術の安全性向上にも貢献することが期待される。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20K14969 の助成を受けたものです。

References

- 1) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) : MLIT Maritime Bureau Annual Report 2020, <https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001415996.pdf> (as of July 14 2022) (In Japanese)
- 2) Matsuo T: Trends in Hiring and Retiring Seafarers in Domestic Shipping Industry, Navigation of Japan Institute of Navigation, Vol. 203, pp. 81-87 (2018) doi: 10.18949/jinnavi.203.0_81. (In Japanese)
- 3) Sawada R et al.: Path following algorithm application to automatic berthing control, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 26 (2021) pp.541-554, doi: 10.1007/s00773-020-00758-x.
- 4) ISO 31073: Risk management — Vocabulary (2022).
- 5) Wróbel K et al.: System-theoretic approach to safety of remotely-controlled merchant vessel Ocean Engineering, Vol. 152 (2018) pp. 334-345, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.020>.
- 6) Valdez Banda O.A. et al.: A systemic hazard analysis and management process for the concept design phase of an autonomous vessel, Reliability Engineering and System Safety, Vol 191 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106584>.
- 7) Shiokari M et al.: Towards the Development of Risk Analysis Method for Autonomous Ships, Proc. Conf. on the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers (Tokyo) Vol. 30 (2020) pp. 393-396. (In Japanese)
- 8) Shiokari M et al.: Application of Risk Analysis Method with System Modeling to Conceptual Design of Autonomous Ships, Proc. Conf. on the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 32 (2021) pp. 355-366. (In Japanese)
- 9) Ishimura E et al.: Task-Based Hazard Identification for a Hypothetical Autonomous Ship, Proc. the 91st Conf. on the Japan Institute of Marine Engineering (JIME) (2021) pp 169-170. (In Japanese)
- 10) Miyake R et al.: Task Analysis Based on Remote Control Trial of Small Experimental Ship "Shimpo," Proc. the 91st Conf. on the Japan Institute of Marine Engineering (JIME) (2021) pp. 171-172. (In Japanese)
- 11) Miyake R et al.: Application of Dynamic-Task-Based Hazard Identification Method to Remote Operation of Experimental Ship Shimpo, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2311, 012013 (2022) <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2311/1/012013>.
- 12) Hirata K et al.: Functional Verification Tests for Automated System of Small Experimental Ship "Shimpo," Proc. the 91st Conf. on the Japan Institute of Marine Engineering (JIME) (2021) pp. 165-166. (In Japanese)
- 13) Inoue T, Thorough Use of UML by Diagram, 2018, Shoehisha (In Japanese).
- 14) Shiokari M et al.: Modeling of Remote Control System of Small Ship Experimental Ship "Shimpo," Proc. the 91st Conference of Japan Institute of Marine Engineering (JIME) (2021) pp.167-168. (In Japanese)

- 15) Kudo J et al.: Hazard Identification for Remote Automatic Control Trial of Small Experimental Ship "Shimpo," Proc. the 91th Conference of Japan Institute of Marine Engineering (JIME) (2021) pp.173-174. (In Japanese)
- 16) Kobayashi H et al.: Development of Shiphandling Techniques into Elemental Techniques, Journal of Japan Institute of Navigation, Vol. 96 (1997) pp. 119-125. (In Japanese)
- 17) Seidl M et al.: UML@ classroom (2015) Springe, ISBN: 978-3-319-12742-2.
- 18) IMO: Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO Rule-Making Process, MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2 (2018).