

船舶のリスク評価技術の開発に関する研究

伊藤 博子*, 木村 新太*, 山田 安平**, 三宅 里奈*,
柚井 智洋*, 工藤 潤一*, 河島 園子*

Development of Risk Assessment Techniques for Ships

by

ITOH Hiroko*, KIMURA Arata*, YAMADA Yasuhira**, MIYAKE Rina*,
YUZUI Tomohiro*, KUDO Junichi*, KAWASHIMA Sonoko*

Abstract

In response to the growing need for measures against climate change and advancements in digital technologies for ship operation environments, this study focuses on the safety aspects of ships and maritime traffic. Research has been conducted in two key areas: novel concept ships and maritime traffic. To reduce greenhouse gas emissions, various innovative ships are being developed in maritime transport. These include ships designed for the transportation and use of liquefied hydrogen (LH2) and liquefied natural gas (LNG) as fuels, as well as those employing fuel cells either as propulsion energy or for transporting fuel cell vehicles. Ensuring the safe, practical implementation of these ships requires appropriate safety measures to address the risks associated with the use of novel fuels, particularly fires and explosions. In this study, we developed quantitative risk analysis methods for liquefied hydrogen carriers, probabilistic equivalency-based safety assessment methods for layout design, and analytical techniques for fuel leakage. Additionally, to address the risk assessment required by international standards for liquefied hydrogen carriers, a series of detonation experiments with hydrogen-air mixture gas was carried out in a transparent cylinder. The objectives were to investigate detonation phenomena as well as to obtain experimental data in order to validate detonation and structural damage analysis in the event of a hydrogen explosion. Detonation phenomena were visualized using an advanced high-speed camera. Explosion pressures, strain and residual deformation were measured. Towards ensuring maritime traffic safety, we developed techniques to estimate and predict encounter situations between ships that could potentially lead to collisions. These techniques utilize ship movement data obtained through the Automatic Identification System (AIS) and other observation technologies. By applying these techniques, we evaluated and verified the effectiveness of maritime traffic flow control measures. These outputs have been implemented as part of safety measures for quasi-congested areas, as highlighted in the Japan Coast Guard's Fourth Traffic Vision. Specifically, they were used to assess alternative safety measures for coastal areas extending from Tokyo Bay to the Seto Inland Sea, thereby contributing to enhancements in maritime traffic safety. During the study period, advancements in AIS and other sensing technologies significantly accelerated the development of autonomous ship operations, with several demonstration experiments conducted across Japan. The implementation of autonomous navigation relies on complex systems that integrate various devices and software, posing significant challenges to ensuring their safety. To address these challenges, we conducted comprehensive risk analyses for autonomous ships and proposed novel analytical methods. The results contributed to Japan's domestic discussions on draft international regulations under development by the IMO. Additionally, they were incorporated as practical examples in risk analysis guidelines for autonomous ships. These outcomes have advanced risk assessment practices, supporting the safe development and deployment of autonomous ships.

*海洋リスク評価系, **構造・産業システム系

原稿受付 令和7年 1月21日

審査日 令和7年 3月10日

目 次

1. はじめに.....	3
2. GHG 対策のための代替燃料等に係るリスク評価手法の開発に関する研究.....	3
2.1 液化水素運搬船のリスク解析（定量解析の高度化）	4
2.1.1 研究の概要	4
2.1.2 解析対象シナリオ	4
2.1.3 頻度解析	4
2.1.4 被害度解析	6
2.1.5 リスク解析結果	6
2.1.6 まとめ	7
2.2 燃料タンク配置に係る代替設計手法および支援ツールの開発.....	8
2.2.1 研究の概要	8
2.2.2 安全ガイドラインにおけるタンク配置の規定	8
2.2.3 安全ガイドラインにおける代替設計支援ツールの開発.....	9
2.2.4 まとめ	11
2.3 可燃性液化ガスの海上流出に伴う大気拡散・火災放射熱による影響評価ツールの開発	11
2.3.1 概要.....	11
2.3.2 影響評価ツールの特徴.....	12
2.3.3 大気拡散の評価例.....	12
2.3.4 火災の評価例.....	13
2.3.5 まとめ	14
2.4 参考文献.....	14
3. 液化水素運搬船の船体構造に係るリスク評価のための被害度評価に関する研究.....	15
3.1 はじめに.....	15
3.2 液化水素運搬船に係る国際基準.....	16
3.3 水素－空気混合気を用いた爆轟実験.....	17
3.3.1 アクリル円筒.....	17
3.3.2 実験ケース，鋼製板及び計測項目	19
3.3.3 実験結果	20
3.3.4 爆轟圧力による鋼製板応答	23
3.4 まとめ.....	24
3.5 参考文献.....	25
4. 船舶交通の安全対策構築支援と影響評価法に関する研究	26
4.1 はじめに.....	26
4.2 船舶交通流の制御とその影響評価法手法の構築	26
4.2.1 制御ルールの効果検証のための影響評価.....	26
4.2.2 新たな制御ルール構築支援のための設計評価手法の改良.....	29
4.3 衝突事故解析支援のための総合的分析手法の構築	31
4.3.1 事故の概要	31
4.3.2 CREAM 分析手法による認知行動分析	32
4.3.3 AIS データを用いた状況認識評価.....	33
4.4 衝突リスク評価技術の高度化に関する研究.....	35
4.5 まとめ.....	37

4.6 参考文献.....	37
5. 自動運航船のリスク評価手法に関する研究.....	37
5.1 はじめに.....	37
5.2 対象システムのモデル化手法の開発.....	38
5.3 リスク評価手法の開発.....	38
5.4 支援ツールの開発.....	40
5.5 まとめ.....	41
5.6 参考文献.....	41
6. おわりに.....	42
謝辞.....	43
References.....	43

1. はじめに

気候変動問題への対策が求められ、船舶の運航環境のデジタル技術が進展する中、これらに関連する船舶の安全面に焦点をあて、新コンセプト船と海上交通という二つの分野で重点研究を実施してきた。温室効果ガスの排出削減を目指して、液化水素や液化天然ガスの運搬や燃料としての使用、燃料電池車の運搬、燃料電池の推進エネルギーとしての使用といった様々な新しいコンセプトで船舶が開発されている。これらを安全に実用化するためには、新規燃料の使用に伴う火災・爆発のリスクを踏まえて適切に安全対策を実施する必要がある。本研究では、液化水素運搬船のリスクに関連する定量的解析手法や燃料タンクの配置設計に関する確率論的な同等安全性評価手法を構築し、各種燃料の使用に伴う燃料漏洩による大気拡散、火災、爆発事象を簡易に解析するツールを構築した。さらに、液化水素運搬船に係る国際基準で求められる被害度評価を勘案し、水素燃料の漏洩に伴う爆発を想定して水素－空気混合気を用いた爆轟実験を実施し、爆轟現象の可視化、圧力計測、非線形動的構造解析を通して被害度を推定した。

海上交通の安全確保の観点からは、船舶自動識別装置（AIS）やその他の観測技術による船舶の動静情報を用いて、衝突原因となりうる船舶の遭遇発生状況の推定、予測技術を開発し、また、これらを用いた船舶交通の制御対策の評価を実現した。これらは、海上保安庁による第4次交通ビジョンで取り上げられた準ふくそう海域、すなわち東京湾口から瀬戸内海に至る沿岸の海域における安全対策の検討ツールとして使用され、船舶交通の安全性向上に貢献した。一方、本研究の実施期間中に、このようなAISや様々なセンシング技術の向上により、操船を自動化する自動運航の技術開発がますます加速し、日本国内でも複数の実証実験が実施される状況となった。自動運航の機能は多数の装置やソフトウェアに関連する複雑なシステムによって実現されることが多く、その安全性の確保が課題となった。これに対応するため、本研究では、自動運航船のリスク分析について研究し、分析手法を提案した。得られた結果は、IMOで策定中の国際規則案に関する日本国内での検討、自動運航船のリスク解析手順書の具体例として使用され、実際に開発される自動運航船に対するリスク解析の促進に寄与した。

本稿では、2018年度から2022年度にかけて実施した以上の重点研究について報告する。

2. GHG対策のための代替燃料等に係るリスク評価手法の開発に関する研究

本章では、低炭素、脱炭素社会の実現に向けた液体貨物の輸送における定量的リスク解析手法および事故時の影響解析ツールの概要を紹介するとともに、内航船のカーボンニュートラル化を支援するためのリスク解析手法およびツールについて紹介する。

2.1 液化水素運搬船のリスク解析（定量解析の高度化）

2.1.1 研究の概要

水素を取り扱う多くの設備における重要ハザードの一つとして「水素漏洩」が挙げられている。陸上の水素ステーションを対象としたリスク解析²⁻¹⁾²⁻³⁾では、「水素漏洩」の定量的なリスク解析が実施されている。一方、液化水素運搬船に関しては、定性的・半定量的リスク解析²⁻⁴⁾は実施されているが、定量的リスク解析は実施されていない。そこで、本研究において検討した液化水素運搬船の漏洩リスクの定量解析²⁻⁵⁾について以下に記す。

2.1.2 解析対象シナリオ

本研究では文献²⁻¹⁾を参考に、解析対象シナリオ、すなわち Event Tree (ET) を図 2.1.1 のように構築した。本研究では ET の太線で示されている噴出火炎 (Jet fire) と爆発 (Explosion) をリスク推定の対象として取扱うこととした。それらのリスクはそれぞれ式 2.1 及び式 2.2 から求められる。

$$R_{Ji}(x) = f_i(x) (1 - p_1) p_2 S_{Ji}(x) \quad (2.1)$$

$$R_{Ei}(x) = f_i(x) (1 - p_1) (1 - p_2) p_3 S_{Ei}(x) \quad (2.2)$$

ここで、 $R_{Ji}(x)$ 及び $R_{Ei}(x)$ はそれぞれ機器 i の漏洩孔径が x の時の Jet fire と Explosion のリスク、 $f_i(x)$ は機器 i の漏洩孔径が x である場合の頻度、 p_1 、 p_2 及び p_3 は ET の各分岐確率、 $S_{Ji}(x)$ 及び $S_{Ei}(x)$ は機器 i の漏洩孔径が x の時の被害度である。なお、本研究ではフランジ、バルブ、パイプの 3 種類の機器を対象とした。

H2 Release	Leak detected and isolated before ignition	Immediate ignition	Delayed ignition	Consequence
Yes	Yes			No ignition
$f_i(x)$	p_1			
	No	Yes		Jet fire
	$1-p_1$	p_2		Explosion
		No	Yes	
		$1-p_2$	p_3	No ignition
			No	
			$1-p_3$	

図 2.1.1 水素漏洩に伴う噴出火炎および爆発に関する ET

2.1.3 頻度解析

式 2.1 及び式 2.2 の $f_i(x)$ を推定する必要がある。 $f_i(x)$ は漏洩の発生頻度と漏洩孔径の発生確率の積によって求められるが、利用可能なデータの不足により、これらを直接的に推定することは不可能である。そこで本研究では、水素ステーションにおけるリスク解析²⁻¹⁾²⁻³⁾と同様に、類似するデータを適用し、ベイズ推定によって漏洩頻度を推定することとした。図 2.1.2 にベイズ推定の流れを示す。船舶、海洋構造物における炭化水素の漏洩事故データと、高圧ガス設備における水素漏洩事故データの 2 つの要素を用いた二段階のベイズ推定を実施した。一段階目では英国 HSE の Hydrocarbon Release Database (HcRD) を尤度とし、漏洩頻度を推定した。二段階目では、一段階目の結果を事前分布とし、高圧ガス保安協会の事故事例データベースにおける水素漏洩のデータを尤度として、そのベイズ推定結果を液化水素運搬船の漏洩頻度と仮定した。図 2.1.3 にフランジに関するベイズ推定結果を示す。

漏洩孔径についても漏洩頻度と同様に確率分布を求める必要があり、ベイズ推定を実施することも可能であるが、ここでは FLNG における漏洩孔径の発生確率^{2-6),2-9)}を利用した。この漏洩孔径の発生確率^{2-6),2-9)}は主に原油等の漏洩を対象としている HcRD を用いて、LNG 施設では発生し得ないと思われる Corrosion/Erosion が漏洩原因であるデータを除外する等の適正化を施したデータから推定した確率であり、FLNG そのものの実測データから推定されたものではない。また、これが水素に関する漏洩孔径の発生確率と同様であると言えるかは不明である。そのため、漏洩孔径の発生確率に関しても漏洩頻度と同様にベイズ推定することが望ましいと考えるが、これは今後の課題としたい。式 2.1 及び式 2.2 において必要となる ET の各分岐確率 p_1 、 p_2 及び p_3 は既往研究^{2-1), 2-10)}を参考に設定した。 p_2 及び p_3 について文献^{2-1), 2-10)}では、水素の放出流量によって段階的に瞬時着火および遅れ着火の確率が変化する表 2.1.1 の値が示されているが、本研究ではこれらの平均を p_2 及び p_3 として、それぞれ 0.1 及び 0.05 を用いた。

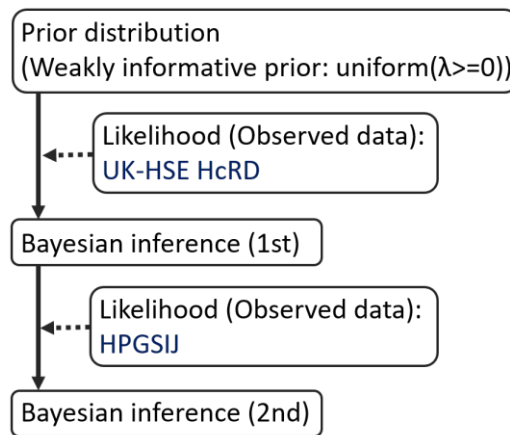


図 2.1.2 二段階のベイズ推定を用いた液化水素運搬船における水素漏洩頻度推定の流れ

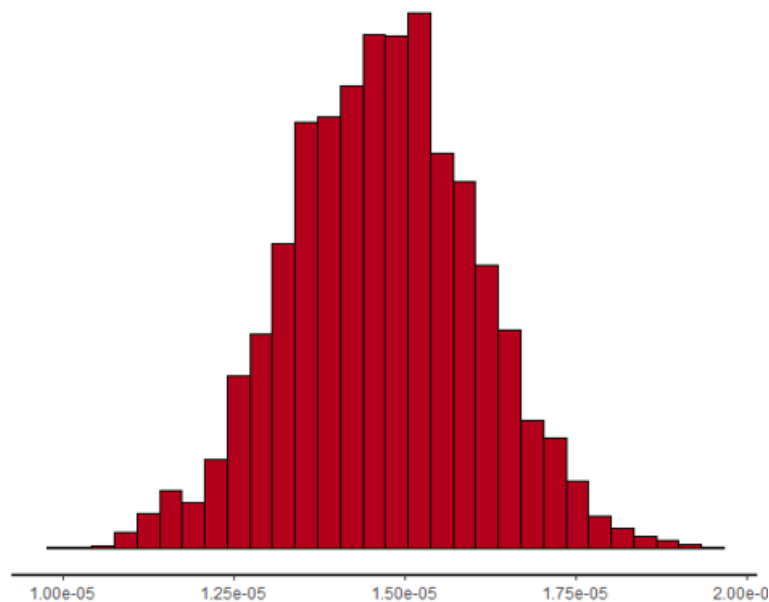


図 2.1.3 ベイズ推定による水素漏洩頻度の推定結果（フランジ）

表 2.1.1 イベントツリーにおける各分岐確率の値^{2-1), 2-10)}

水素放出流量 [kg/s]	着火前に検知および隔離に 成功する確率 p_1 [-]	瞬時着火の確率 p_2 [-]	遅れ着火の確率 p_3 [-]
<0.125	0.9	0.008	0.004
0.125 - 6.25		0.053	0.027
>6.25		0.23	0.12

2.1.4 被害度解析

本解析では、水素漏洩によって生じる潜在的な被害度を推定するために HyRAM⁺²⁻¹¹⁾を用いて数値シミュレーションを実施した。解析にあたっては、個船の設計は考慮せず障害物や大気風が無い空間で鉛直上向きに液化水素が漏れていると仮定して被害度を求めた。被害度の指標として、影響が到達する距離 (Effective distance)、または面積 (Effective area) が考えられるが、被害規模をより単純に判断することが可能な前者の事故発生源から影響が到達する距離を指標として選定した。漏洩した水素ガスによって形成する可燃性の水素/空気混合ガスの遅れ着火によって生じる Explosion については、米国 EPA の影響評価ソフトウェア ALOHA²⁻¹²⁾を参考に影響度レベル 2 (重傷を負う可能性) の爆風圧 (Overpressure) 24.1 kPa を基準値として Effective distance を決定した。また、漏洩ガスに瞬時着火して生じる Jet fire についても ALOHA を参考に放射熱による影響度レベル 2 (60 秒以内に II 度の火傷を引き起こす) の基準値 5 kW/m²を用いて、Effective distance を被害度として計算した。これらの計算は複数の孔径に対して実施し、各事象の被害度と孔径の関係を求めた。その結果を図 2.1.4 に示す。

図 2.1.4 から Effective distance は漏洩孔径のべき乗で表されることが分かる。すなわち、 $S_{ji}(x)$ 及び $S_{ei}(x)$ は次の式 2.3 および 2.4 で表される。なお、本研究では $S_{ji}(x)$ 及び $S_{ei}(x)$ は全ての機器で同じであると仮定した。

$$S_{ji}(x) = 1.471x^{1.106} \quad (2.3)$$

$$S_{ei}(x) = 3.982x^{0.946} \quad (2.4)$$

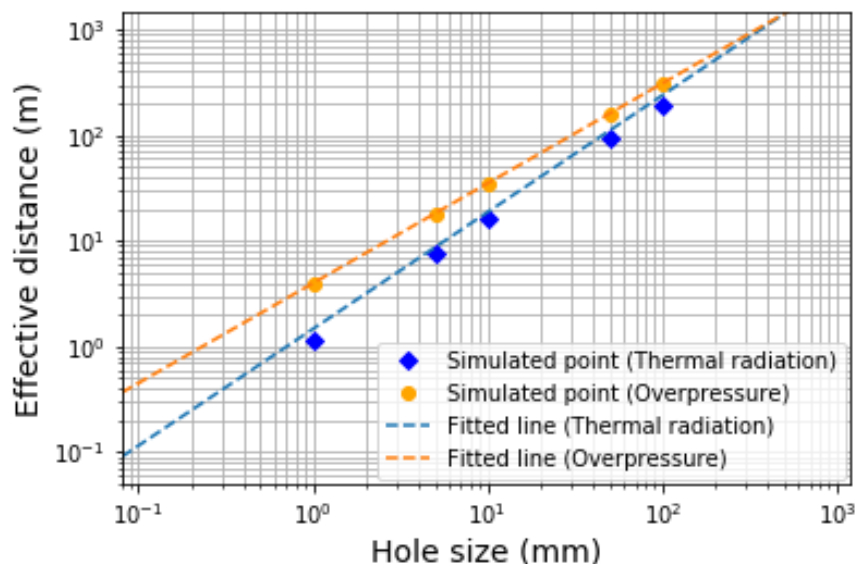


図 2.1.4 2つのシナリオに対する漏洩孔径と Effective distance の関係

2.1.5 リスク解析結果

頻度解析と被害度解析の結果を式 2.1 及び式 2.2 に代入し、それを漏洩孔径に関して積分することで各機器のリスクが求められる。その結果を図 2.1.5 に示す。この結果から、機器によらず、Jet Fire の方が Explosion よりリ

スクがやや大きいこと、Jet Fire と Explosion によらずバルブ、パイプ、フランジの順にリスクが大きいくことが分かる。

本研究のリスクモデルは、漏洩孔径をパラメータとしている。すなわち漏洩孔径別のリスクの大きさの相対比較も可能である。その一例として、図 2.1.6 にフランジの計算結果を示す。図 2.1.6 から Jet Fire, Explosion とともに漏洩孔径 1mm から 2mm で最もリスクが大きくなることが分かる。

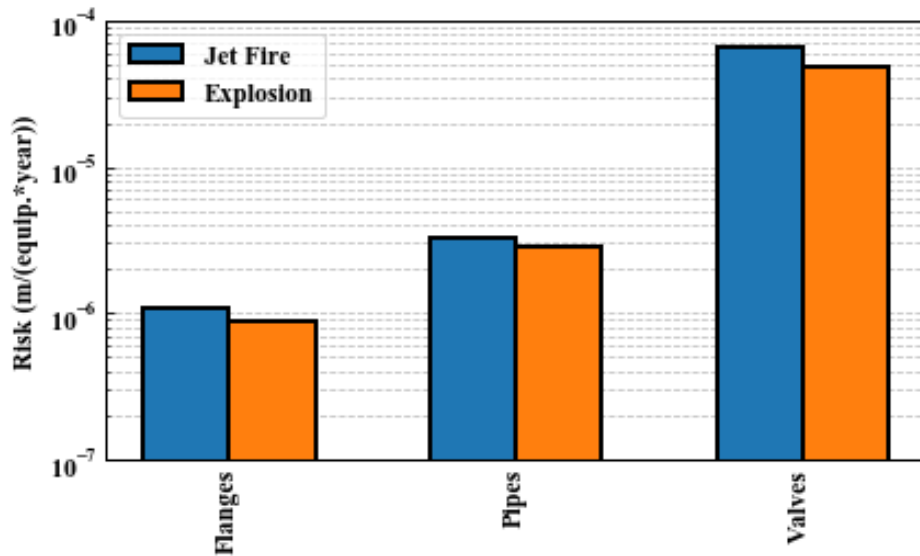


図 2.1.5 機器別の噴流火炎、爆発シナリオにおける漏洩リスクの推定結果

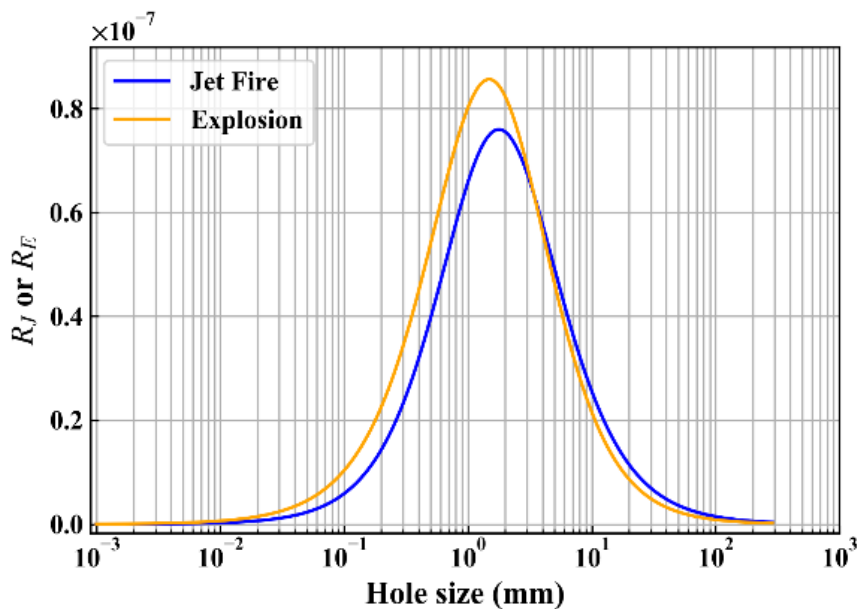


図 2.1.6 漏洩孔径を変数とするリスクの分布（フランジ）

2.1.6 まとめ

本節では、液化水素運搬船の漏洩リスクの定量解析に関する研究の概要を報告した。我が国では 2023 年 6 月 6 日改定の「水素基本戦略」²⁻¹³⁾により 2030 年以降早期の水素運搬船の商業運航実現を目指している。本研究にお

いてベイズ推定により得られた漏洩頻度は実運航に基づいた値ではないが、検討したリスク解析手法が液化水素運搬船における水素漏洩発生頻度をより正確に推定し、その安全性向上に寄与することを期待する。

2.2 燃料タンク配置に係る代替設計手法および支援ツールの開発

2.2.1 研究の概要

わが国では、内航船のゼロエミッション化に向けて国土交通省より水素燃料電池船の安全ガイドライン²⁻¹⁴⁾（以下、安全ガイドライン）が公表されている。当該安全ガイドラインは、外航大型船を主たる対象とする国際ガス燃料船安全コード²⁻¹⁵⁾（IGF コード）を基にしているため、小型船が中心となる内航船に対しては火災安全・防爆、タンク配置、バンカリングなどに関する基準の中に、適用が困難な安全要件が含まれている。これを踏まえ、安全ガイドラインでは、同等安全性の証明に基づく代替設計が可能となっている。しかしながら、同等安全性を証明するための手法選定や計算条件設定の前例が十分になく、標準的な手法が確立されていない。

そこで、著者らは、内航の圧縮水素燃料電池船を取り上げ、船舶事故情報を活用することで、燃料タンク配置の代替設計に必要なリスク評価手法を開発した²⁻¹⁶⁾。本研究では、このリスク評価手法に基づく代替設計を支援するツールを開発したので、本節ではその概要を紹介する。

2.2.2 安全ガイドラインにおけるタンク配置の規定

安全ガイドラインでは、衝突や座礁から燃料タンクを保護することを目的としてタンクの配置に制限を課している。この制限は、決定論と確率論の手法により規定されている。決定論による規定では、安全ガイドラインの5.3.3 項に確保すべき寸法に関する計算方法が記されており、図 2.2.1 に示すように(1)喫水線での外板位置から水平方向に船の型幅に応じた距離内、(2)外板から指定距離内（旅客船は船の型幅に応じた距離、貨物船は燃料タンクの容積に応じた距離）、(3)船底から船の型幅に応じた距離内のいずれかに該当する箇所を燃料タンクの設置が禁止される箇所としている。

一方、確率論による規定は安全ガイドラインの5.3.4 項に記載され、IGF コードの5.3.4 項を参照する形で図 2.2.1 の(1)の距離の代替を認めている。IGF コードの同項は、確率論によるタンク配置の設計方法として、SOLAS 条約 II-1 章に記載の損傷時復原性の計算式を参照している。この計算に必要な寸法を表 2.2.1 に、それらの関係の略図を図 2.2.2 に示す。

本規定においては、あるタンク配置を考え、これらの寸法を先述の損傷時復原性の計算式に代入することで、衝突が発生した際に燃料タンクの外板の位置まで損傷が到達する確率に相当する指標である f_{CN} を算出し、得られた値が船種に応じて与えられた閾値未満であることを要求している。

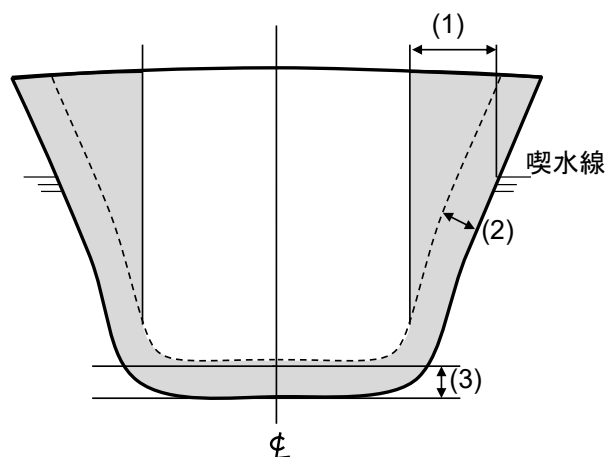


図 2.2.1 決定論における燃料タンク設置禁止場所（網掛け部）

(IMO, resolution MSC. 370 (93)²⁻¹⁷⁾を参考に作成)

表 2.2.1 安全ガイドラインにおける確率論の手法による設計で必要となる寸法

	記号
隔壁甲板長	L_s
船の型幅	B
最高喫水	d
船尾端から燃料タンク後端までの距離	x_1
船尾端から燃料タンク前端までの距離	x_2
最高区画喫水線における外板境界とタンク境界の水平距離	b
燃料タンクの最下部から船底までの距離	H

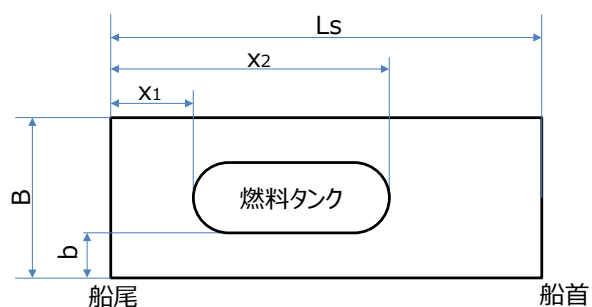


図 2.2.2 安全ガイドラインにおける確率論の手法による設計で必要となる寸法の関係（平面概略図）

2.2.3 安全ガイドラインにおける代替設計支援ツールの開発²⁻¹⁸⁾

小型船の場合、船体が小さく燃料タンクの配置の自由度が限られる可能性があるため、前節の大型船を前提とする IGF コードの規定に対してさらなるタンクの設置可能範囲の拡大が望まれている。そこで著者らは、燃料タンク配置を代替設計により行う方法として、船舶事故情報を基に衝突時の部位ごと（例えば、船体前部、中央部、後部の3部に分ける）の損傷確率を求め、その確率を用いる指標 f_{CN} の計算方法を開発した²⁻¹⁶⁾。この代替設計手法及び安全ガイドラインで定められた確率論に基づく方法の2種類の方法によってタンクの配置に関する設計を

支援するためのツールとしてアプリケーションソフトウェアを開発した。本ツールは、指標値 f_{CN} を計算する機能、得られた結果から燃料タンクを配置できる範囲を図示する機能を備えている。

IGF コードに規定された方法と事故情報を用いる方法は共に入力した条件に対してのみ適否が得られるため、燃料タンクを配置できる範囲は表 2.2.1 に記載した寸法を変化させ、計算を繰り返すことで求めている。計算量の関係から、前述のように船舶の諸元が与えられている状態を想定することで、変化させる寸法の数減らした。また、基本的な燃料タンク配置を対象とした。計算条件は以下の通りとした。

- ・船体寸法（隔壁甲板長 L_s 、船の型幅 B 、最高喫水 d ）は固定。
- ・船長方向のタンク位置（ x_1, x_2 ）は、後端位置を固定、前端位置を固定、タンク長さを固定の 3 つの選択肢からユーザーが選択。
- ・幅方向は左右対称。

図 2.2.3 に本ツールのメインウィンドウを示す。これは計算条件の設定を行うもので、ウィンドウの左側で船体の情報として、隔壁甲板長 L_s 、船の型幅 B 、最高喫水 d を入力し、右側で配置したいタンクの寸法や場所に関する値を入力する。

図 2.2.3 代替設計支援ツールのメインウィンドウ ²⁻¹⁸⁾

メインウィンドウで指定した燃料タンクの形状および設置条件に基づいて算出された、燃料タンクを配置できる範囲が表示されるウィンドウを図 2.2.4 に示す。このウィンドウの左側で、旅客船または貨物船などの船種の設定を変更すると、 f_{CN} の上限が IGF コード 5.3.4.1 に従って旅客船では 0.02、貨物船では 0.04 に設定され、右側にはこの値に対応するグラフが表示される。図 2.2.4 に示すグラフでは、タンク後端位置(x_1)を固定した場合におけるタンク前端位置(x_2)と船側から確保すべき距離(b)のの関係を表している。船側から b の距離を確保する必要があることから、各条件においてそれぞれ折れ線グラフよりも上の領域であればタンクを配置することが可能と判断される。青線は安全ガイドラインで定める確率論的手法による境界を、橙色の線は代替手法による境界をそれぞれ表し、各曲線の上側が IGF コードにて指定されている f_{CN} の条件を満たす範囲である。したがって、図 2.2.4 では規則通り(青色)よりも代替手法(橙色)の方が曲線の上側の範囲が広く、代替手法によって、例えば長い燃料タンクの使用や燃料タンクを船側に近づけた配置が可能となり設計の自由度が高くなると判断できる。

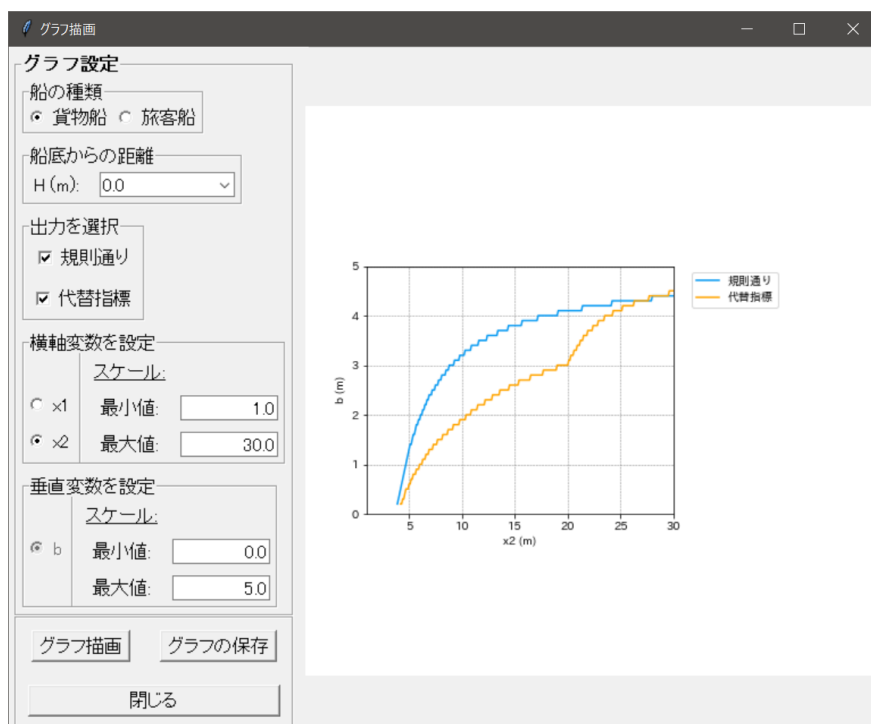


図 2.2.4 グラフ描画ウィンドウによる燃料タンクを配置できる範囲の描画例²⁻¹⁸⁾

2.2.4 まとめ

内航の圧縮水素燃料電池船を想定して開発された燃料タンク配置に係るリスク評価手法に基づく代替設計のための支援ツールとしてアプリケーションソフトウェアを開発した。本ソフトウェアが、内航船におけるカーボンニュートラル化の一助となれば幸いである。

2.3 可燃性液化ガスの海上流出に伴う大気拡散・火災放射熱による影響評価ツールの開発

2.3.1 概要

国際海事機関による船舶の排出ガス規制が強化されるに伴い、液化天然ガス（Liquefied Natural Gas、以降 LNG と略す）を始めとする代替燃料を使用する船舶の導入に向けた動きが進んでいる。LNG は燃焼性が高く、火災・爆発を生じると深刻な被害を及ぼすおそれがあるため、本研究では、LNG を船舶燃料として供給する LNG バンカリング時の事故などで代替燃料が漏洩した場合における被害影響範囲を推定する解析システム（以下、影響度解析システム）の開発に取り組んだ。具体的には、漏洩した LNG の蒸発ガスが大気拡散する、あるいは着火により液面火災に至るシナリオを想定した影響評価システムを開発した。本節では、当該ツール²⁻¹⁹⁾の特徴と評価事例について紹介する。



図 2.3.1 影響度解析システム起動時のメイン画面

2.3.2 影響評価ツールの特徴

図 2.3.1 に、影響度解析システムのメイン画面を示す。LNG は深冷液化ガスであるため、常温では沸騰して可燃性ガスが発生する液だまり（プール）を形成する。このようなプールの数値モデルとして、簡便な相似解モデルである Fay²⁻²⁰⁾のモデルに加えて、オランダ応用科学機構（TNO）の影響解析ガイドライン（通称 Yellow Book）²⁻²¹⁾において推奨される Webber のモデル²⁻²²⁾を用いることができる。Webber のモデルは、米国連邦エネルギー規制委員会（FERC）の LNG 運搬船からの漏洩・影響評価手法²⁻²³⁾にも用いられている。プールの形状として、Fay²⁻²⁰⁾は海上漏洩した LNG が船側に沿って半円形に広がることを指摘している。本ツールでは、この効果を考慮することができるようプール形状として円形および半円形を選択することができる。

プールから発生した可燃性ガスが大気拡散に移行した際の拡散範囲の予測には、米国環境保護庁(EPA)の推奨コードである高密度ガス拡散モデル（DEGADIS）²⁻²⁴⁾を適用するとともに、Vilchez ら²⁻²⁵⁾によって提案されている大気中の湿気が凝縮して形成する視認可能な水蒸気の拡散範囲を推定する手法を新たに組み込んだ。これによって、視認可能な水蒸気雲と可燃範囲の関係を推定することができ、海上漏洩事象に緊急対応する者がこれを参考に本来視認することが困難な着火危険性の範囲を把握し、安全を確保しながら作業ができる可能性がある。

プールが着火すると、プール上に火柱のような拡散火炎を生じるプール火災と呼ばれる事象が発生するが、この火炎から発生する放射熱の影響解析に Rew²⁻²⁶⁾の Solid Flame Model を適用し、比較的精度の良い結果を簡便に得ることが可能となっている。

従来、これら条件の入力や得られた結果の処理、可視化といった一連の作業をそれぞれ別々に行う必要があり、実質的に簡便に使用することができない状況にあった。そこで、本プログラムでは、計算部分だけでなく、これらの作業を GUI 上で操作できる機能も含めて提供することで、迅速な結果の確認を可能なものとした。

2.3.3 大気拡散の評価例

ツールの個別の計算結果の妥当性を検証したのち、LNG タンカー等の事故現場における緊急対応に関する意思決定への本ツールの活用を想定して、試計算を行った。評価例として、衝突等によって LNG 貨物を燃料使用する大型 LNG タンカーの 12500 m³ のタンク 1 基から LNG が海上漏洩し、大気拡散した際のガス拡散範囲の推定結果を図 2.3.2 に示す。なお、本来 LNG はメタンを主成分とする混合組成物であるが、計算上はメタンのみを考慮したものとなっている。(a)の図では、燃焼下限濃度の範囲を示しており、その条件において Vilchez ら²⁻²⁵⁾の推定手法を用いて水蒸気雲の範囲を重ね書きしたものを(b)の図に示す。視認可能な水蒸気雲よりも風下方向に可燃濃度範囲のガスが拡散していることを予測することができる。緊急対応者が LNG タンカーに救助に向かう際にどこまで接近可能かどうかを判断する上での一つの材料となることが期待される。

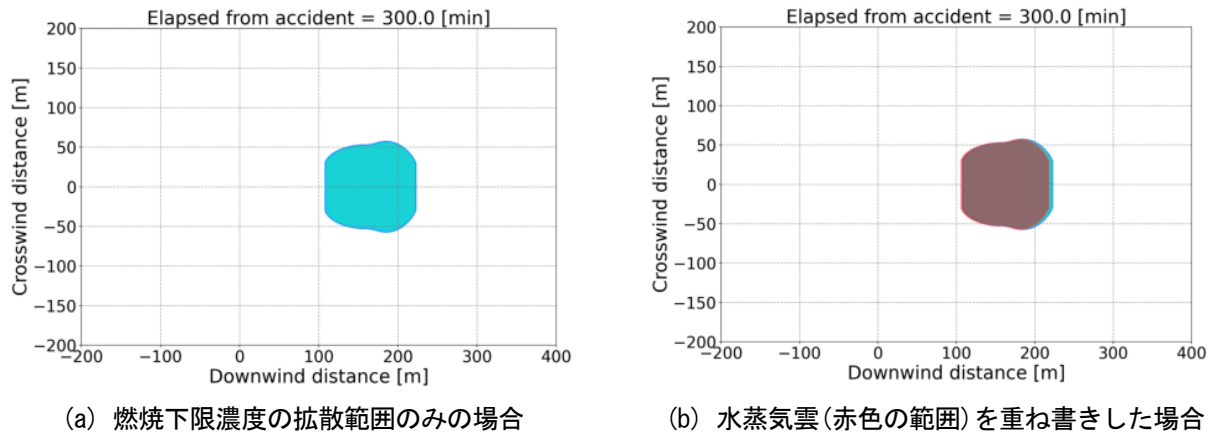


図 2.3.2 LNG プールから発生したメタンの大気拡散計算例

(LNG はその主成分メタンが 100%の組成であることを仮定している)

2.3.4 火災の評価例

前節の大気拡散評価例に対して、本節では LNG の漏洩によって火災が発生した場合における意思決定のための評価例として衝突等によって大型 LNG タンカーの 12500 m³ のタンク 1 基から LNG が海上漏洩し、着火、プール火災に至った場合の放射熱による影響範囲の予測結果を図 2.3.3 に示す。本計算では、米国 EPA が開発した影響評価ソフトウェア ALOHA²⁻²⁷⁾の計算モデルを参考に、半円形に広がる LNG プールが着火して形成する拡散火炎の形状を半円筒形と仮定し、曲率のある放射面を多数の長方形の放射面に分割して評価地点の間の形態係数を算出している。同図の左側から右側に向かって気流がある条件下において、火炎が風下方向に向かって傾斜するため影響範囲も風下方向に向かって広がる結果となっている。この結果を用いることで、火災を生じている LNG タンカーの周りを航行する船舶に対して放射熱による二次的な被害を生じないように注意喚起を行うことに役立てられることが期待される。

本ツールは引き続き改良が進められており、ユーザーインターフェースの改良を行うとともに現在では図 2.3.5 に示すように無料で利用可能な OpenStreetMap²⁻²⁸⁾上に重ね書きすることでより地理的な情報を加味して影響範囲の推定を行うことが可能となっている。

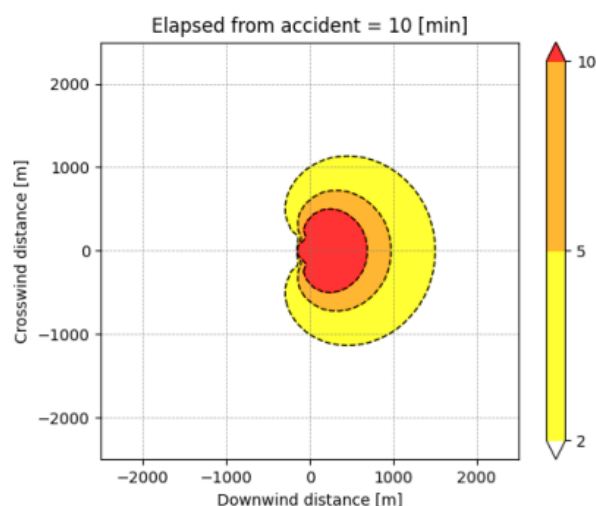


図 2.3.4 半円形に広がるプール火災の影響範囲計算例

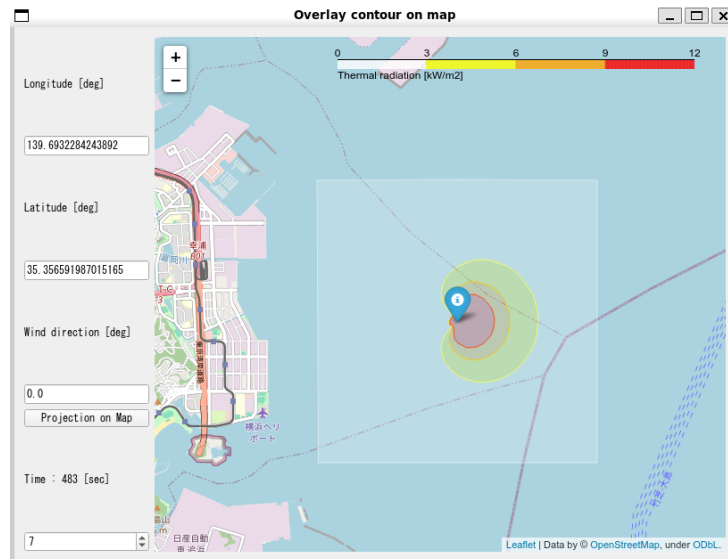


図 2.3.5 半円形に広がるプール火災の影響範囲計算例 (©OpenStreetMap)

2.3.5 まとめ

本節では、LNG 貨物を燃料として使用する LNG タンカーが衝突等によって貨物タンクから LNG が海上へ大規模漏洩する際に生じる影響について被害影響度を予測するためのツールについて紹介した。今後は LNG に加えてアンモニア等の貨物を対象に影響評価ツールの高度化を行っていく。

2.4 参考文献

- 2-1) Katrina M. Groth, Jeffrey L. LaChance, Aaron P. Harris: Early-Stage Quantitative Risk Assessment to Support Development to Codes and Standard Requirements for Indoor Fueling of Hydrogen Vehicles, SAND2012-10150 (2012).
- 2-2) 産業技術総合研究所：水素ステーションとその周辺のリスク評価書 (2019).
- 2-3) 木原武弘, 牧野良次, 小野恭子, 佐分利禎, 久保田士郎, 恒見清孝, 和田有司: 有機ハイドライド型水素ステーションの漏洩頻度のベイズ推定, 安全工学, 56 巻 4 号 (2017), pp.245-254.
- 2-4) K. Nishifuji: Hazard Identification Study of Liquefied Hydrogen Carrier, Proc. of the 7th International Maritime Conference on Design for Safety (2018), pp.20-30.
- 2-5) 柚井智洋, 伊藤博子, 木村新太, 塩莉恵, 三宅里奈, 工藤潤一, 石村恵以子, 河島園子: リスク評価技術の高度化-自動運航船と新規貨物・燃料船のリスク評価-, 海上技術安全研究所報告第 22 巻別冊, 第 22 回研究発表会講演集, (2022), pp.75-80.
- 2-6) 金湖富士夫, 柚井智洋, 前田健策: FLNG における極低温流体漏洩事故を想定した漏洩ホール径の確率分布について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 15 号 (2012), pp.277-280.
- 2-7) 柚井智洋, 金湖富士夫, 前田健策: FLNG における極低温流体漏洩頻度について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 15 号 (2012), pp.285-288.
- 2-8) 金湖富士夫, 柚井智洋, 前田健策: FLNG における極低温流体漏洩頻度解析, 海上技術安全研究所報告第 13 巻, 第 4 号 (2013), pp.1-12.
- 2-9) Akio Usami, Naohiko Kishimoto, Hiroki Kusumoto, Fujio Kaneko, Takehiro Inoue: Cryogenic leakage risk analysis for FLNG and use of brittle crack arresting material as a risk mitigation measure, SNAME Maritime Convention (2015), pp.518-527.
- 2-10) Canadian Hydrogen Safety Program: Quantitative Risk Comparison of Hydrogen and CNG Refueling Options. Presentation at IEA Task 19 Meeting (2006).

- 2-11) DE. Brian and SH. Ethan: Walkup. HyRAM (Hydrogen Risk Assessment Models), Version 3.0. Sandia National Laboratories (9/30/2020); software available at <https://www.sandia.gov/energy/programs/sustainable-transportation/hydrogen/hydrogen-safety-codes-and-standards/hyram/>.
- 2-12) US EPA: ALOHA Software; software available at <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>.
- 2-13) 経産省: 水素基本戦略 (2023 年 6 月改訂版) (2023)
- 2-14) 国交省: 水素燃料電池船の安全ガイドライン第 1 回改訂版 (2021)
- 2-15) IMO: resolution MSC.391(95), Adoption of the international code of safety for ships using gases or other low-flashpoint fuels (IGF code) (2015)
- 2-16) (一財) 日本船舶技術研究協会: 内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全評価手法の構築, (2023)
- 2-17) IMO: resolution MSC.370(93), Amendments to the international code for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk (IGC Code) (2014)
- 2-18) 工藤潤一, 木村新太, 伊藤博子: 燃料タンク配置に係る代替設計支援ツールの開発, 海上技術安全研究所報告第 23 巻別冊 (令和 5 年度), 第 23 回研究発表会講演集 (2023), pp.99-100.
- 2-19) 木村新太: 可燃性液化ガスの海上流出に伴う大気拡散・火災放射熱による被害影響評価プログラム, SOFIC 登録番号 P 第 11188 号-1, (2021).
- 2-20) J. A. Fay: Model of spills and fires from LNG and oil tankers, Journal of Hazardous Materials, 96(2-3), (2003), pp.171-188.
- 2-21) C.J.H., van den Bosch and R.A.P.M. Weterings: Methods for the Calculation of Physical Effects. Committee for the Prevention of Disasters, CPR 14E (TNO ‘Yellow Book’), Chapter 3 “Pool Evaporation”, (1997).
- 2-22) D. Webber: A model for pool spreading and vaporisation and its implementation in the computer code GASP. HSE report. SRD/HSE/R507, (1990).
- 2-23) ABS Consulting: Consequence Assessment Methods for Incidents Involving Releases from Liquefied Natural Gas Carriers, Study for Federal Energy Regulatory Commission GEMS 1288209, (2004).
- 2-24) T. O. Spicer and J. A. Havens: Field Test Validation of the DEGADIS Model, Journal of Hazardous. Materials, 16 (1987), pp. 231-245.
- 2-25) J. A. Vilchez, D. Villafane, J. Casal: A dispersion safety factor for LNG vapor clouds, Journal of Hazardous Materials, 246-267, (2013), pp.181-188.
- 2-26) P.J. Rew and W.G. Hulbert: Development of Pool Fire Thermal Radiation Model, HSE Contract Research Report No. 96-1996, Health and Safety Executive, (1996).
- 2-27) Jones, R., W. Lehr, D. Simecek-Beatty, R. Michael Reynolds: ALOHA® (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4: Technical Documentation. U. S. Dept. of Commerce, NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 43. (2013).
- 2-28) OpenStreetMap, <http://openstreetmap.org/>

3. 液化水素運搬船の船体構造に係るリスク評価のための被害度評価に関する研究

3.1 はじめに

地球温暖化防止観点から、水素は有望なクリーンな代替燃料の一つであり、船舶による水素の輸送・貯蔵の需要が高まっている。このような社会的背景により、船舶による水素輸送の安全性確保は重要な課題の 1 つとなっており、個船の建造に際しては、国際基準等により、リスク評価が要求されている。構造被害度の観点からは、水素爆発による船体損傷並びに全損被害有無が重要な要素となる。水素爆発が発生した際、爆発圧力等により、船体がどの程度損傷し、全損に至るかどうかが、定量的に評価するには、実船実験は現実的に極めて難しく、したがって、「数値計算手法」を用いる方法が有望である。「数値計算手法」を用いる際に、その妥当性評価が重要であると共に、水素爆発現象のメカニズムや実験データが有用である。しかしながら、水素爆発に関する実験データは、closed のものが多く、公開可能な実験データが十分に蓄積されているとはいえない³⁻¹⁾⁻³⁻¹⁰⁾。

そこで、本研究³⁻¹¹⁾では、

- ① 水素・空気の混合ガス爆発の実験データを取得し、「爆発」のメカニズムを解明すること。
- ② 将来の数値計算手法の妥当性評価に有用な実験データを確保すること。

を目的として、【透明なアクリル製円筒管】を用いて、水素－空気混合気の爆轟（ばくごう）実験を実施した。特に、最新の高速カメラを用いて爆発現象の可視化に重点を置き、爆轟現象の可視化に成功した。さらに、水素爆発による構造応答を調査するために、円筒管の一端に鋼製板を設置し、爆轟圧力を受けた鋼製板の構造応答も計測した。また、通常歪ゲージでは、ローカルな1点しか計測することができない。そこで、爆発実験後の塑性変形を3次元画像計測システムを用いて計測し、爆発によって残留した鋼製板の変形量を3次的に計測した。

3.2 液化水素運搬船に係る国際基準



図 3.1 液化水素運搬船「すいそふろんていあ」（HySTRA 提供）

温室効果ガス（CO2 等）排出量削減のため、水素は有望なクリーンな代替燃料の一つである。水素は自動車や船舶などの輸送車両の燃料としてだけでなく、発電にも使用可能である。船舶業界に関しては、国際海事機関（IMO）より「液化水素のばら積み輸送に関する暫定勧告」が制定された³⁻¹¹⁾。当該勧告を参照して、図 3.1 に示すように、世界初の液化水素運搬船「すいそふろんていあ」が川崎重工業によって設計・建造され^{3-12), 3-13), 3-14)}、『技術研究組合 CO₂ フリー水素サプライチェーン推進機構（HySTRA）』にて実証試験運航が継続中である。

しかし、水素の爆発の危険性は、水素の輸送、貯蔵、使用の観点から重要な問題の一つである。水素の爆発特性については多くの研究が実施されている。2017 年、我が国の船級協会である ClassNK は、IMO 暫定ガイドライン³⁻¹²⁾を考慮した「液化水素運搬船に関するガイドライン^{3-15), 3-16), 3-17)}」を発行した。このガイドラインでは、「爆轟（ばくごう）」と「爆燃（ばくねん）」を表 3.1 のように定義している。ガイドラインでは、「個別の船舶の設計仕様に基づいてリスク評価を行うこと」と規定している。リスク評価において考慮すべき事項は、ガイドラインの-2.-2 に記載されている。リスク評価では、「バント火災の可能性と、その結果として生じる逆火、爆燃、爆発に対する対策」を考慮する必要があると明記されている。

表 3.1 爆轟と爆燃の定義^{3-15), 3-16), 3-17)}

爆轟 (Detonation)	A form of combustion with flame front that propagates at a supersonic velocity in unburnt region, coupled with shock wave.
爆燃 (Deflagration)	A form of combustion with flame front that propagates at a subsonic velocity in unburnt region without shock wave.

ClassNK ガイドラインの³⁻¹⁶⁾「2.2.18/-2/-6.」によれば、リスク評価においては「貨物機械室、パイプラック、GVU(ガスバルブユニット)室等の配管が込み入った閉囲区画等における爆発・デトネーションの可能性と影響検討」を考慮することが求められている。したがって、このような評価手法が液化水素運搬船の建造に際して必要である。しかし、爆轟・爆燃をどのように評価するかについては具体的に記載されていない。それぞれのリスク評価において爆轟実験を行うことは困難であるため、何らかの数値シミュレーションやリスク評価を活用することが想定される。一方、水素の爆発に関する実験データは非常に限られており、完全には得られておらず、オープンに開示されていないことが多い^{3-1) 3-10)}。したがって、このような評価方法論に貢献するためには、公開可能な実験データを入手し、検討することが有益である。

3.3 水素－空気混合気を用いた爆轟実験

本研究では、①数値計算手法の妥当性検証のためのデータ取得、②爆轟現象のメカニズム解明、のために、水素－空気混合気の爆轟実験を実施した。船舶内での水素漏洩を想定し密閉管（ダクト）を使用した。通常、液体水素は大型の貨物タンクに保管される。貨物タンク内で水素が爆発した場合、船舶全体の損失につながる大爆発が発生する可能性があるため、リスク分析においてはその影響は明らかである。したがって、本研究では、船内のパイプや廊下などの比較的長い密閉空間に水素が漏洩することを想定した。比較的長い空間を有する狭い密閉空間に水素が漏洩すると、爆燃ではなく、より激しい爆発が起こる可能性がある。さらに、密閉された船内空間内での水素爆発の影響は明らかではない可能性がある。

本研究では、耐爆ピット（図 3.3）を備えた群馬県山中の実験施設において、円筒管内で水素と空気の混合ガスの一連の爆発試験を順番に実施した。

- i) 実験データを取得する
- ii) 水素の爆発現象を調査し、可視化する
- iii) 爆発による鋼製板の構造応答を調査する。

アクリル円筒の端片に薄鋼製板を設置し、爆発的な圧力を加えて面外変形させた。

3.3.1 アクリル円筒

本実験で使用した試験モデル（円筒管）を図 3.2～図 3.7 に示す。図 3.4 および図 3.5 にアクリル円筒管の概略図を示す。円筒形のチューブを数本用意し、実験ごとにチューブを交換する。Shot01 と 02 は円筒モデル 1 (Shchelkin spiral 方式、図 3.4 上段) を使用して実行され、Shot03 と 04 は円筒モデル 2 (図 3.4 下段) を使用して実行される。試験モデルは主に、(i) 円筒管 (アクリル)、(ii) 管のキャップ (鋼)、(iii) 試験片 (鋼製板)、(iv) Shchelkin spiral、(v) 支持バー (鋼) で構成される。モデル 1 では爆発が起こらないため、数回の事前テストの後、図 3.4 下段に示す円筒管モデル 2 が本研究に採用された。どちらの方法も効果的である。ただし、モデル 1 (Shchelkin spiral 方式) を使用すると、Shchelkin spiral の存在により実質的な長さが短くなり、障害物がない状態のチューブ長さが大幅に短くなる。シリンダーが非常に長い場合は、モデル 1 を使用しても爆発が発生する可能性がある。スペースの制限と防爆ピットのサイズ、その他の問題により、シリンダーの長さは 1.0m とした。なお、円筒管は爆発により破壊・汚損する可能性があったため、実験ケース分の円筒管を準備し、実験ケース毎に新規の円筒管を用いて実験を実施した。

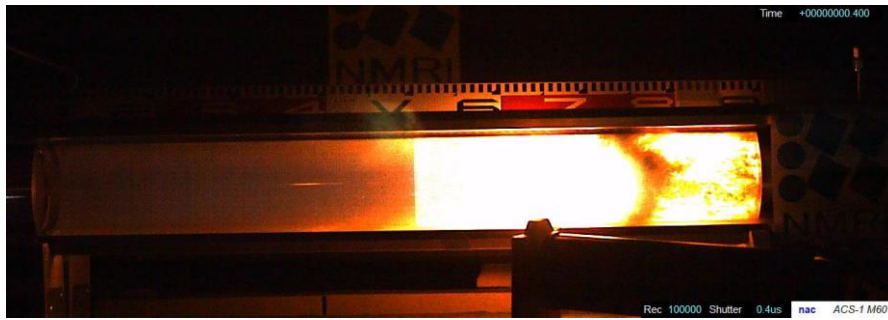


図 3.2 アクリル円管内での水素爆発例



図 3.3 水素爆発の実験ピット外観（群馬県山中）

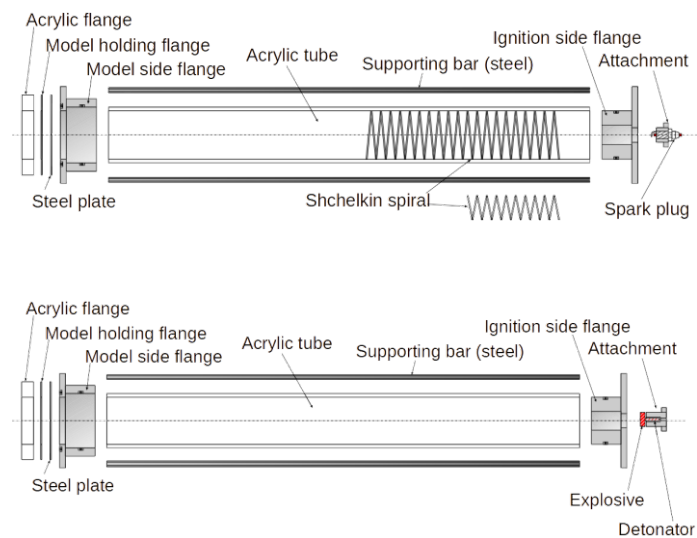


図 3.4 実験に用いたアクリル円筒管及び周辺治具構成図
(上段：Shchelkin spiral 方式；下段：爆発着火方式)

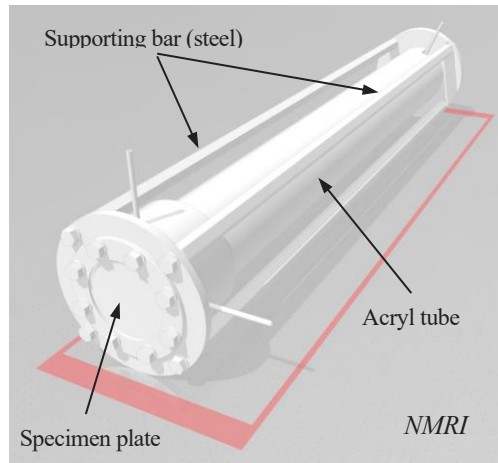


図 3.5 アクリル円筒管 3D-CAD 図

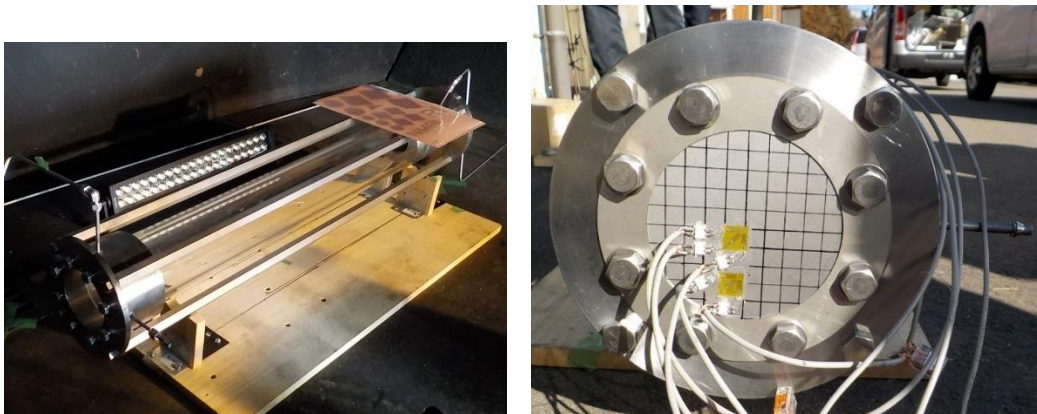


図 3.6 アクリル円筒管+鋼製治具（写真）

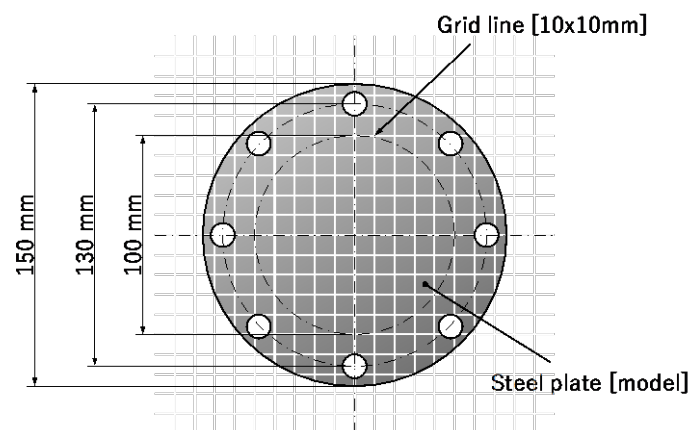


図 3.7 円筒管端部に設置した鋼製板

3.3.2 実験ケース、鋼製板及び計測項目

表 3.2 に実験ケースと諸条件を示す。鋼製板（SPCC：降伏応力）として、2 種類の板厚（ $t = 1.0 \text{ mm}$, 1.2 mm ）を準備し、前者を shot03 に、後者を shot04 に用いた。前述のとおり、実験毎に、円筒管を交換しており、shot03 と shot04 の最も大きな違いは、鋼製板の厚みである。その他、やむをえず、アクリル管内に充填した混合ガス温

度およびその水素濃度は shot 毎に異なっている (表 3.2)。水素濃度については、極力、同一条件になるように努めたが、ガス流入・流出しながら目標濃度に調整する方式のため、完全に同一濃度にすることは困難であった。しかし、濃度を正確に計測しておけば、数値シミュレーションにおいて、当該濃度における解析結果と実験結果を比較すれば良いため問題はないと考える。

円筒管内の圧力を計測した。また、爆発による端部鋼製板応答を調査するために、当該鋼製板に 3 軸ひずみゲージ (図 3.8) を設置した。その他、3 台の高速度カメラ、通常カメラを用いて、アクリル管内の爆発状況並びに端部鋼製板の変形状況を撮影した。端部鋼板の撮影に際しては、水素爆発により、鋼製板破片等が飛散し、カメラを損傷する可能性が危惧された。そのため、撮影対象傍に鏡を設置し、鏡に反射させて、爆発による影響が少ない方向に高速度カメラを設置し、爆発方向と撮影方向を変えて撮影する工夫をした。

表 3.2 実験ケース毎の水素濃度、鋼製板厚

	Shot03	Shot04
Temperature of hydrogen-air mixture gas inside tube [°C]	3.1	2.7
Hydrogen concentration [%]	30.25	31.6
Thickness of steel plate [mm]	1.0	1.2

3.3.3 実験結果

2 ケースの実験において、画像計測による衝撃波面の位置から衝撃速度を推定した結果 (図 3.10)、爆轟に至っていることを確認した。したがって、2 ケースの爆発実験のいずれも、爆轟現象であることを確認した。高速度カメラによる衝撃波面の撮影画像を図 3.9 に示す。実験動画を当所の YouTube に公開している³⁻¹⁹⁾³⁻¹⁹⁾。当該図は、爆発後 $t = 0.45 \text{ ms}$, 0.46 ms , 0.47 ms 時点の撮影画像であり、当該図より、衝撃波面の形状が凹形状から平面に変化していることがわかる。爆轟現象では衝撃波面先端が平面となる。 $t = 0.47 \text{ ms}$ 以後は、この平面となった衝撃波面が左端部の鋼製板に衝突し、端部鋼製板を変形させた。また、衝撃波面は、円筒管内を幾度も往復し、両端部に何度も衝撃力を与えることが観察された。ただし、ピーク圧力は 2 回目、3 回目となるにつれ徐々に減少していくことが確認できた。

本実験結果により、閉囲空間で爆発が発生した場合は、衝撃荷重は、1 回ではなく、漸減するとはいえ複数回の衝撃力が作用することが分かり、設計に際しては、複数回の衝撃を考慮する必要があることが分かった。

また、端部鋼製板の変形状況の 3 次元計測例を図 3.12 に示す。衝撃波により鋼製板は外側に大きく凹損していることが分かる。最大変形量は 17.823 mm と、板厚の約 17 倍に達しており、また、実験後の板厚は、変形が最も大きな位置付近で、約 0.934 mm と、本板厚より 5% 程度も薄くなっていることが分かった。これは板の面外変形が進むと、曲げ変形 (内側は圧縮、外側は引張) から全断面引張状態となり、薄肉化 (thinning) が発生していたと考えられる。しかし、今回の実験では端部鋼製板の破断は発生しなかった。

今回の実験の寸法や構造は船体構造とは全く異なる。したがって、本実験結果は、今後開発される数値計算手法の妥当性検証のために用いるのに有用である。本実験結果を用いて妥当性を検証した数値計算手法を用いて、実際の船舶における被害度影響評価を実施することが期待される。なお、本実験で、端部に鋼製板を設置したのは、単に爆発圧力を推定するのみならず、構造物の変形についても、精度検証するためである。多くの爆発解析ソフトウェアは、爆発圧力と構造応答を別々のソフトウェアで解析し連成しないことが多い。しかしながら、爆発のような高速現象においては、荷重と応答の共振が影響する可能性があり、連成解析が重要となる可能性がある。また、設計上の評価対象はあくまで構造物であり、構造物の変形や応答を正しく評価できるかどうかが重要である。このような観点から、アクリル円筒の端部に容易に変形する鋼製板を設置した。鋼製板の変形により、円筒管内の体積が膨張し、圧力が微小に低下する。その圧力変化を考慮して、再度、鋼製板に作用する爆発荷重を推定する。このような場合、荷重と構造を連成 (強連成) して解く必要性があると考えられ、2 段階の解析手

法は適していないと考えられる。また、連成計算であっても、「弱連成（一方向連成）」を用いる場合には、妥当性検証が重要であると考えられる。ただし、構造物が非常に剛に設計されており、変形がほとんど生じないと見込まれる場合には、連成解析を用いずに解析することも可能であると考ええる。

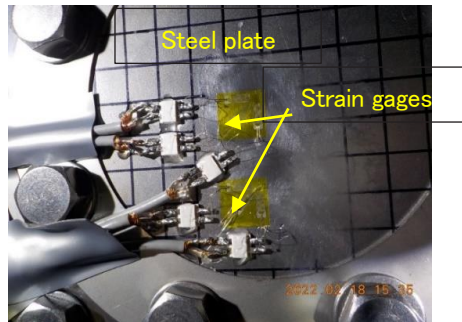


図 3.8 鋼製板に設置した3軸ひずみゲージ及びその配置図

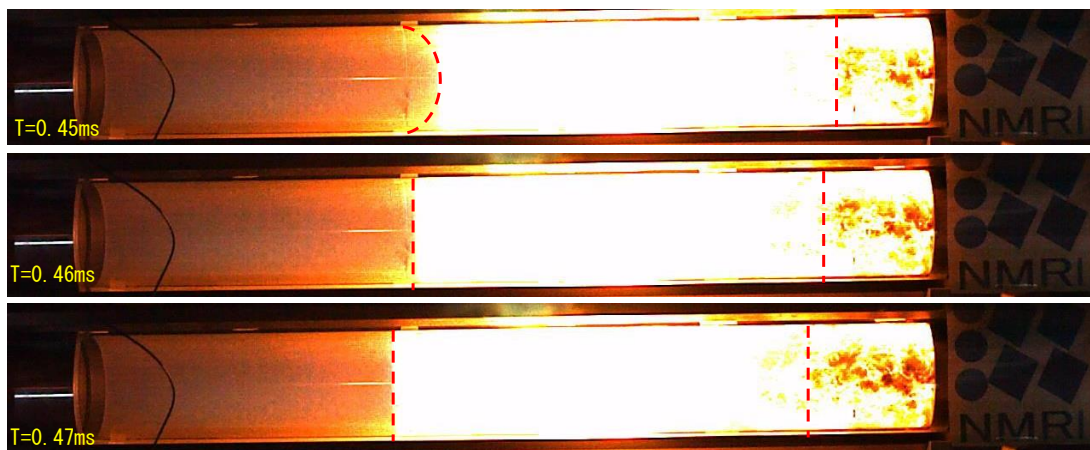


図 3.9 高速度カメラで撮影した爆轟現象の衝撃波先端形状

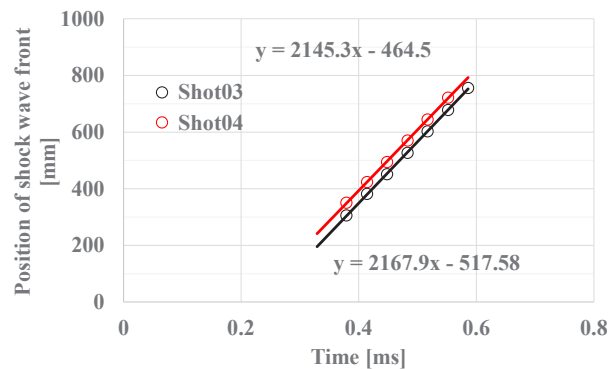


図 3.10 衝撃波先端位置の時刻歴

表 3.3 衝撃波面の速度

Experiment ID	Approximate speed of shock wave front [m/s]
Shot 03	2145.3
Shot 04	2167.9

図 3.10 は、2つの爆轟実験のケースにおける衝撃波面の位置の時系列を示している。線の傾きは衝撃波面の速度を示している。衝撃波面の位置は、高速度カメラの画像で測定した。表 3.3 は、それぞれ shot03 と shot04 の衝撃波面の速度を示している。表 3.3 より、両ケースの速度が水素の爆轟速度 ($= 2000 \text{ m/s}$) よりも大きくなっていることが分かり、本実験では爆轟が発生したことが確認できる。

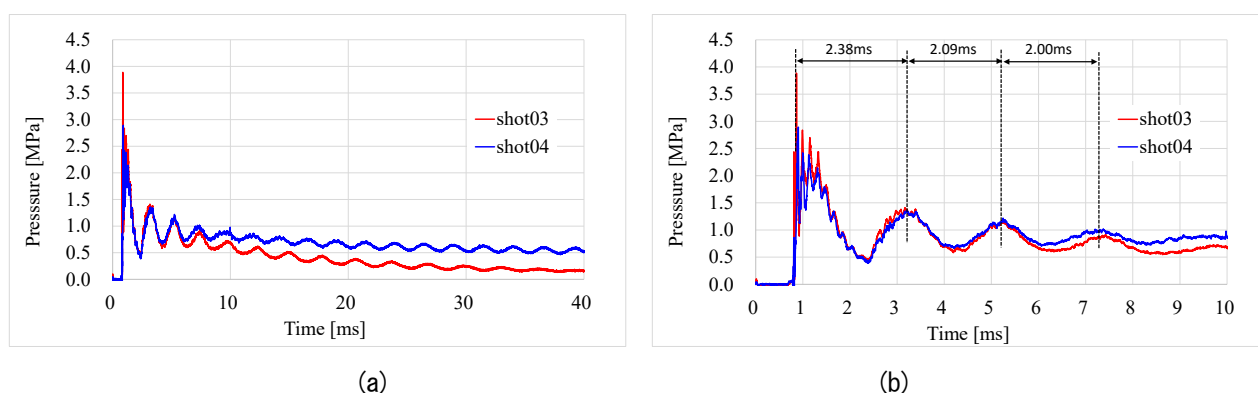


図 3.11 計測した圧力の時刻歴 (a: 全体図; b: 拡大図)

shot03 と shot04 の場合の測定圧力の時刻歴を図 3.11 に示す。0 ms から 10 ms の間の拡大図を図 3.11(b)に示す。図 3.11 より、shot 03 と shot 04 における最大圧力はそれぞれ 3.88 MPa と 2.89 MPa であった。shot 03 の最大圧力は shot 04 の最大圧力より高い値であった。一方、約 8 ms 近辺以後、shot 03 における圧力は shot 04 における圧力よりもわずかに低く推移していることが分かる。これは、表 3.2 に示すように、鋼製板の厚さの違いによるものと考えられる。shot 03 の鋼製板の厚さは shot 04 よりも薄いため、shot 03 の鋼製板の変形は shot 04 の鋼製板の変形よりも大きくなる。さらに、鋼製板の変形により、円筒管内の空間（体積）が増加することで圧力が微減する可能性がある。さらに変形が進むと、鋼製板とアクリル管端部との間に隙間が生じ、その結果、vent と同様の効果により、圧力が若干低下した可能性がある。そのため、板厚が薄い shot03 の方が早期に圧力が漸減していることが考えられる。

なお、瞬間的な極短時間の最大ピーク圧が作用した場合、構造が応答できない場合があり、必ずしも、変形に影響を与えない可能性がある。最大圧力のみで設計すると過度に安全側になる可能性や、経済合理性上厳しい設計となる可能性がある。よって、このような短時間の爆発荷重に対しては、ピーク圧力を考慮しつつ、荷重履歴を積分した力積 (Fdt) を考慮して、安全性を検討することが合理的であると考えられる。また、図 3.11 (b)より、約 2.0 - 2.38 ms 周期の局所圧力ピークが繰り返し現れていることが分かる。このピーク値は、衝撃波面が両端で反射してアクリル管を複数回移動することによって発生する。したがって、本研究では、衝撃波面は 2.0 - 2.38 ms ごとに繰り返し左端 (圧力センサが配置されている場所) に達していることが分かる。図 3.11 の縦の黒点線は局所的に最大圧力が発生するポイントに設定されているため、周期の開始タイミングは衝撃波面が最初に鋼製板に接触した時間に設定されているため、最初の周期のみが 2.38 ms となる。最初の周期 ($t = 0.8 - 2.3 \text{ ms}$) の局所圧力曲線の形状は、それ以降のものと異なる。

3.3.4 爆轟圧力による鋼製板応答

ひずみゲージは実験で有用な計測方法の一つであり精度良く変形歪を計測できるが、非常に局所的な情報しか得られない。一方で、リスク評価における被害度評価のためには、爆発後の残留変形が修理費用と密接に関係する。爆発後の開口部の径等弾性変形を除いた塑性変形量が重要となる。また、今後、数値計算で被害度影響評価する際には、当該塑性変形を数値計算法でも推定し、実験結果と比較することにより、妥当性検証が可能となる。特に爆発解析における被害度評価においては、爆発解析と構造解析を別コードで解析する2段階解析手法も多く、このような場合、連成解析ができないこと、また、爆発解析から構造解析への荷重伝達過程での誤差も生ずるため、個々の解析コードの妥当性は検証されていても、システムとして、構造応答や残留変形の精度が必ずしも保証されるとは限らない。したがって、爆発解析+構造解析を一気通貫で実施した場合の解析システムの妥当性検証を考慮して、今回のような爆発実験時の構造応答実験が有用であると考えている。

このような背景より、本研究では、鋼製板全体の塑性変形量を把握する目的で、3次元スキャン技術を使用して試験後の鋼製板の変形を測定した。本計測は実験後の計測であるため、爆発時の弾性変形は測定せず、塑性変形に注目した計測であることを特記する。変形した鋼製板の形状と厚さの測定には、Gom Inc.（ドイツ）が開発した3次元スキャンシステムを使用した。両表面（前面と背面）の3次元位置を正確に測定し、両表面間の距離を計算して鋼製板の厚さを推定した。本研究では、鋼製板の表面を500万個の三角形要素でデジタル化した。計測結果の例を図3.12、図3.13及び図3.14に示す。図3.14より、鋼製板の面外変形量は、17.823 mmとなっており、元板厚の約17倍も変形していることが分かる。これは大変形であり微小理論は適用できない。変形初期は曲げを受けた鋼製板は、変形量が板厚の2倍程度になると表裏共に引張状態となる。図3.14より、最も変形が大きい位置では板厚が $t = 0.923 \text{ mm}$ となり、引張により鋼製板が **thinning** を生じ、薄くなっていることが分かる。一方、外周部では $t = 1.014 \text{ mm}$ であり、鋼製板中央部のみが特に引張変形により伸ばされたことが分かる。そのため、爆発圧力がさらに高くなると、鋼製板の外周部ではなく、中央部が先に破断する可能性があるかと推測できる。

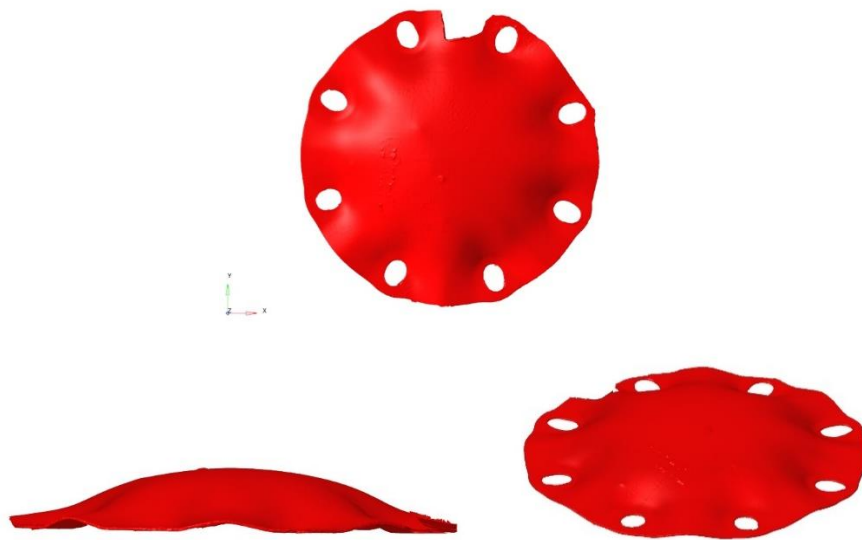


図 3.12 3次元計測機で計測した鋼製板の変形形状

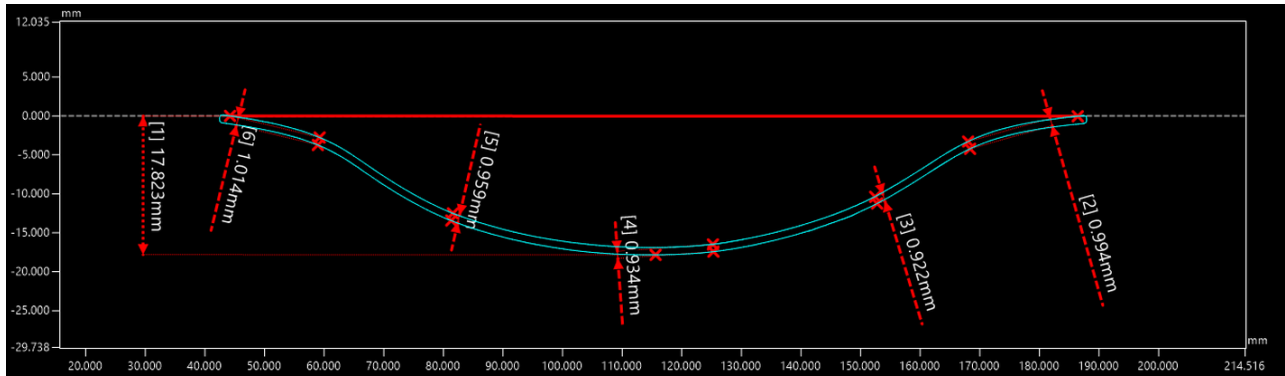


図 2.13 3次元計測による鋼製板の変形量（面外変形量，板厚変形量）

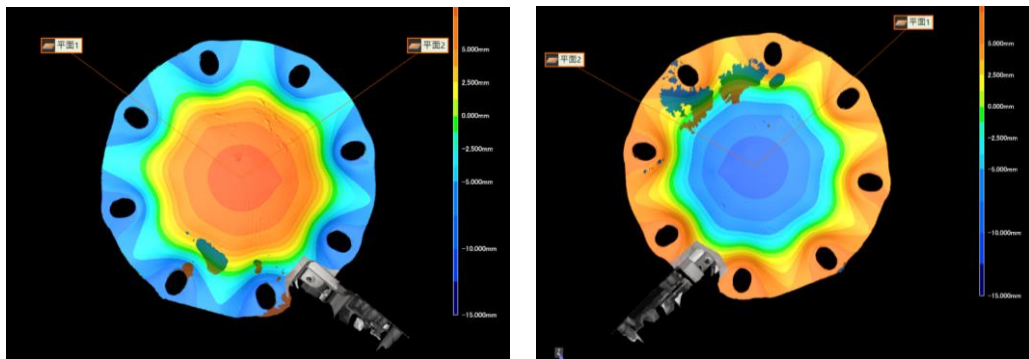


図 3.14 3次元計測による鋼製板の変形図コンター

3.4 まとめ

水素空気混合ガスの「爆轟」メカニズムの解明，また，水素爆発による数値計算手法の妥当性検証のためのデータを取得するため，アクリル製円筒模型を用いて，水素－空気混合ガスの爆轟実験を行った．得られた知見は次のとおり．

- (1) アクリル透明円筒管内を伝播する水素－空気混合ガスの爆轟実験に成功した．衝撃波面速度の推定により爆轟現象であることを確認した．
- (2) 透明アクリル円筒管内の爆轟現象及び爆轟による鋼製板変形を超高速度カメラを用いて撮影することに成功した．特に，アクリル円筒管を用いて爆轟現象をカラーで可視化したのは世界でも類をみない実験である．
- (3) 爆轟現象の高速カメラによる撮影により，「衝撃波面」が凹面から平面に遷移する瞬間を高速カメラで捉えた．これは「爆燃」から「爆轟遷移」(DDT : Deflagration to Detonation Transition³⁻²⁰⁾) によるものと考えられる．
- (4) 3D スキャン技術を使用して，爆轟による鋼製板試験片の塑性変形を測定した．爆轟による衝撃により，鋼製板は元板厚の約 17 倍の面外変形を生じ，板厚中心付近は引張状態となり，Thinning が発生していたことを確認した．

今回，得られた実験データは，特に，爆発解析及び構造解析の数値計算手法の妥当性検証に利用されることが期待される．被害度の評価には，最終的に，爆発荷重による構造応答の推定が重要であることから，とりわけ，爆発解析のみの妥当性評価，構造応答解析のみの妥当性検証ではなく，「爆発解析から構造応答までを一気通貫で推定する解析システム」としての妥当性検証に用いることが重要である．

妥当性検証により，このような解析システムが確立されれば，高精度な個船の被害度評価が可能となると考える．船舶のリスク評価においては，特に，全損 (total loss) となるかどうかリスク評価に大きく影響する．修繕費用の変動よりも，水素爆発が発生した船舶が全損するかどうかに着目して，精度検証することが期待される．

3.5 参考文献

- 3-1) A. Friedrich, J. Grune, T. Jordan, A. Kotchourko, N. Kotchourko, M. Kuznetsov, K. Sempert and G. Stern: Experimental Study of Hydrogen-Air Deflagrations in Flat Layer, (2007).
- 3-2) M. P. Moyle, R. B. Morrison and S. W. Churchill: Detonation Characteristics of Hydrogen-Oxygen Mixture, A.I.Ch.E. Journal, (1960), pp. 92-96.
- 3-3) E. S. Oran and V. N. Gamezo: Origins of the deflagration-to-detonation transition in gas-phase combustion, Combustion and Flame, (2007), pp. 4-47.
- 3-4) K. Zheng, M. Yu, L. Zheng, X. Wen, T. Chu and L. Wang: Experimental study on premixed flame propagation of hydrogen/methane/air deflagration in closed ducts, International Journal of Hydrogen Energy, (2017), pp. 5426-5438.
- 3-5) K. Zhang, S. Du, H. Chen, J. Wang, J. Zhang, Y. Guo and J. Guo: Effect of hydrogen concentration on the vented explosion of hydrogen air mixtures in a 5 m long duct, Process Safety and Environmental Protection, (2022), p. 978-986.
- 3-6) Y. Nakayama: Large Scale Field Explosion Experiment-Studies on Hydrogen Explosion, Journal of Japan Society for Safety Engineering, (2005), pp. 412-420.
- 3-7) H. Han, Q. Ma, Z. Qin, Y. Li and Y. Kong: Experimental study on combustion and explosion characteristics of hydrogen-air premixed gas in rectangular channels with large aspect ratio, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.57, (2024), p. 1041-1050.
- 3-8) S. Rui, C. Wang, S. Guo, R. Jing and Q. Li: Hydrogen-air explosion with concentration gradients in a cubic enclosure, Process Safety and Environmental Protection, no. 151, (2021), p. 141-150.
- 3-9) Q. Wang, X. Luo, C. Wang, Y. Liu, P. Zhou and B. Li: Experimental study on external explosion for vented hydrogen deflagration in a rectangular tube with different vent coefficients, Process Safety and Environmental Protection, Vol.158, (2022), p. 331-339.
- 3-10) H. Xiao, D. Makarov, J. Sun and V. Molkov: Experimental and numerical investigation of premixed flame propagation with distorted tulip shape in a closed duct, Combustion and Flame, Vol.159, (2012), pp. 1523-1538.
- 3-11) Y. Yamada: Model Test on The Detonation of Hydrogen-air Mixture Gas in Closed Cylindrical Tube, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, (in press).
- 3-12) International Maritime Organization: Interim recommendations for carriage of liquified hydrogen in bulk, MSC.420(97), (2016).
- 3-13) K., Nishifuji: Rules and Safety Measures for Liquified Hydrogen Carriers, Journal of the JIME, Vol.54, No.5, pp43-46, (2019).
- 3-14) Y. Takaoka, A. Saeedo, K. Nishifuji and K. Kanbe: Design and Operation of the First LH2 Carrier, Gastech-2019, (2019), pp. 1-10.
- 3-15) Y. Takaoka, K. Mizumukai and Y. Kamenno: Suiso Frontier, the First LH2 Carrier, Demonstration of Technologies and Operational Phase, Int. J. Offshore Polar Eng, vol. 33(03) , (2023), pp. 225-233.
- 3-16) ClassNK: Guidelines for Liquefied Hydrogen Carriers ver.1.0, (2017).
- 3-17) ClassNK: Guidelines for Liquefied Hydrogen Carriers ver.2.0, (2023).
- 3-18) ClassNK: Guidelines for Liquefied Hydrogen Carriers ver.3.0, (2024).
- 3-19) Y. Yamada: Model test of detonation of hydrogen-air mixture, National Maritime Research Institute, Online. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=ggILBNg34EY>.
- 3-20) A.V. Gaathaug, K. Vaagsaether, D.Bjerketvedt: Experimental and numerical investigation of DDT in hydrogen-Air behind a single obstacle, International Journal of Hydrogen Energy, 37, (2012), pp. 17606-17615.

4. 船舶交通の安全対策構築支援と影響評価法に関する研究

4.1 はじめに

海上保安庁⁴⁻¹⁾によると船舶事故は過去10年間で減少傾向にあり、2023年の船舶事故は1,798件発生している。商船（貨物船・タンカー・旅客船）の船舶事故は281件発生しており、船種により傾向は異なるものの商船全体では衝突が最多の約33%を占め、単独衝突が約22%、乗揚げが約20%と続いている。海上保安庁は交通政策審議会での答申を受け策定される「交通ビジョン」により海上保安庁が取り組むべき海上安全政策の方向性及び具体的な施策を提示し、船舶事故隻数の減少に向けた取り組みを実施している⁴⁻²⁾⁻⁴⁻⁴⁾。2013年の「第3次交通ビジョン」では、船舶交通量が多く複雑な進路交差により重大船舶事故が発生する蓋然性が高い準ふくそう海域（東京湾湾口～石廊崎沖～伊勢湾湾口～潮岬沖～室戸岬沖～足摺岬沖の各海域を経て瀬戸内海に至る海域）の安全対策が課題の一つとして掲げられた。また船舶交通の海難を削減するためには事故の原因究明および対応策の立案が重要であり、事故解析手法の高度化が求められている。

本章では交通ビジョンの成果創出および海難の原因究明に寄与することを目的として構築した船舶交通に関連する評価手法や事故解析手法、さらにこれらを支えるための要素技術について紹介する。

4.2 船舶交通流の制御とその影響評価手法の構築

4.2.1 制御ルールの効果検証のための影響評価

2013年9月に伊豆大島西岸沖において内航貨物船（総トン数498GT）と外航貨物船（総トン数2,962GT）が衝突し、内航貨物船の転覆により乗組員6人全員の死亡事故が発生した。この事故を踏まえ海上保安庁は第3次交通ビジョンにおける準ふくそう海域の安全対策の一つとして、伊豆大島西方海域における安全対策の構築に関する調査研究委員会⁴⁻⁵⁾を設置し、海上技術安全研究所が構築した船舶交通流の制御対策の設計評価手法を適用することにより船舶交通の整流化方策としての具体的な形状の検討およびその影響評価を行った。同委員会による国内の関係者の合意形成および国際海事機関（IMO）での採択を経て、2018年1月1日より国内初の推薦航路（図4.1）が運用されている⁴⁻⁶⁾。推薦航路は国際海上人命安全条約（SOLAS条約）に規定され、法的拘束力はないものの、海図への記載が可能な幅を持たない基線（中心線）により示される航路である。

本研究では、推薦航路の効果検証および制御ルール設計評価手法へのフィードバックを目的とし、AIS（Automatic Identification System、船舶自動識別装置）データにより運用開始後の追跡調査を行った。追跡調査では、船舶交通状況として通航位置分布の変化および推薦航路の順守率を、また安全性評価として遭遇頻度とOZT（Obstacle Zone by Target）⁴⁻⁷⁾による衝突危険性の変化を観察したので、これを報告する。



図4.1 伊豆大島西岸沖推薦航路の位置及び概要（海上保安庁提供、一部加工）

まず AIS データによる船舶交通状況の観察結果を示す。対象海域および解析のための仮想ライン設定を図 4.2 に示す。青線は通航経路別の通航隻数、紫線は推薦航路の順守率を解析するための仮想線である。なお、本研究では推薦航路の入口において正しく右側通航した船舶を順守したと定義し、各経路別隻数に対して順守した船舶数の割合を順守率とした。図 4.3 (a)(b)はそれぞれ当該海域の航行船舶数の推移および経路別の推薦航路順守率の推移を示す。推薦航路運用前後の比較のため、運用前は3年間に渡り1年ごと、運用時から1年後までの期間について1か月毎に変化を観察した。航行船舶数は多少の増減があるものの、東西向きで概ね同数の船舶が航行しており、運用前後で大きな変化は見られなかった。

経路別の推薦航路順守率について見ると、西航の「東京湾→M（神子元）島南」および「東京湾→M 島北」は運用開始後、90%以上の高い水準で順守されていた。東航の「M 島南→東京湾」および「M 島北→東京湾」は経路によって大きく傾向が異なり、神子元島南側を通航する経路では約 90%の高い順守率である一方、神子元島北側を通航する経路では運用開始直後に順守率が上昇したものの、最大でも約 17%（2018 月 7 月）という低い順守率となった。この順守率の相違には幾つかの要因が考えられた。ひとつ目は、通航船群の特徴によるもので、神子元島南側は十分な操船空間を確保して航行する傾向にある大型船もしくは外航船で構成されていることが高い順守率につながっていると考えられるのに対して、神子元島北側は主として最短の経路設定を好む小型船舶や内航船が多いことが低い順守率の原因となっていると考えられた。また、従来の通航パターンからの差異も大きく影響していると考えられた。神子元島南側を通航する経路は図 4.3 (b)が示すように運用開始前から当該経路の 70%～80%の船舶が推薦航路の入口（南端点）の東側を通航しており、通航パターンを大きく変化させずに高い順守率を達成していることに対し、神子元島北側を通航する経路では、運用開始前は当該経路の全船舶が推薦航路の入口（南端点）の西側を通航しており、運用開始に伴い推薦航路入口に向かう迂回を行うよう通航パターンが大きく変わっていた。



図 4.2 対象海域と仮想ライン設定

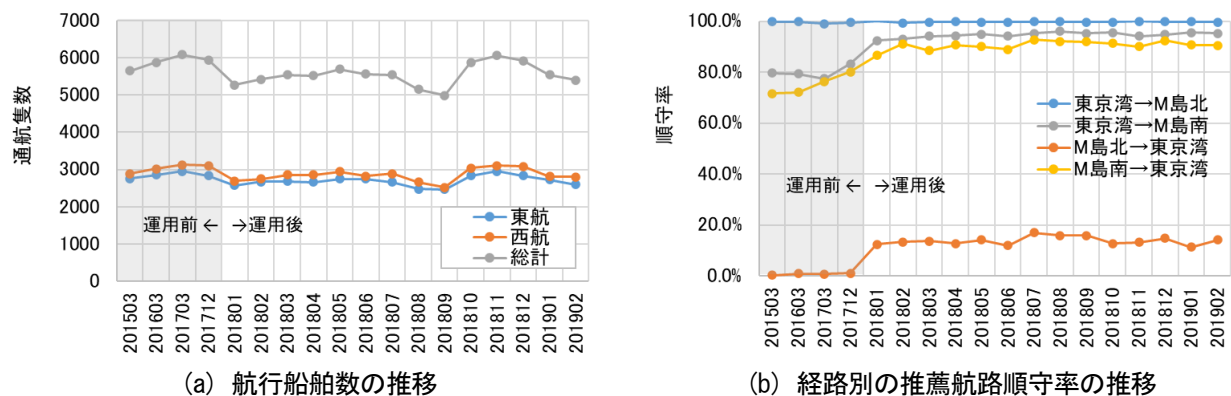


図 4.3 推薦航路導入前後の航行船舶数および推薦航路順守率の推移

続いて遭遇頻度と OZT による衝突危険性の変化を観察した。図 4.4 および図 4.5 は導入前後の 1 日当たりの反航の遭遇頻度と OZT 発生回数であり、どちらもカラースケールが赤色に近づくほど衝突危険性が高いことを意味するがそれぞれの評価方法は文献⁴⁸⁾を参照されたい。推薦航路の北側域および推薦航路の北端付近での衝突危険性が完全には解消していないものの、遭遇頻度および OZT とともに導入前と比較して程度および範囲が緩和されていた。衝突危険性の完全な解消に至らなかった理由は、前述の通り当該海域を通航する船舶の一部が何らかの理由により推薦航路を順守しておらず、航行向き別の整流効果が限定的になったためと考えられた。

これらの観察結果から、衝突危険性低減のためには推薦航路の順守率の向上が重要であり、順守率は通航船の特徴や通航パターンの変化が大きく影響していることが示された。さらに交通ルール（推薦航路）の設計においては、従来の通航パターンに近い進路および通航位置を考慮することが重要であり、これを制御ルール設計評価手法にフィードバックを行った。フィードバックされた制御ルール設計評価手法は、次項の潮岬沖の推薦航路の設計評価に適用された。

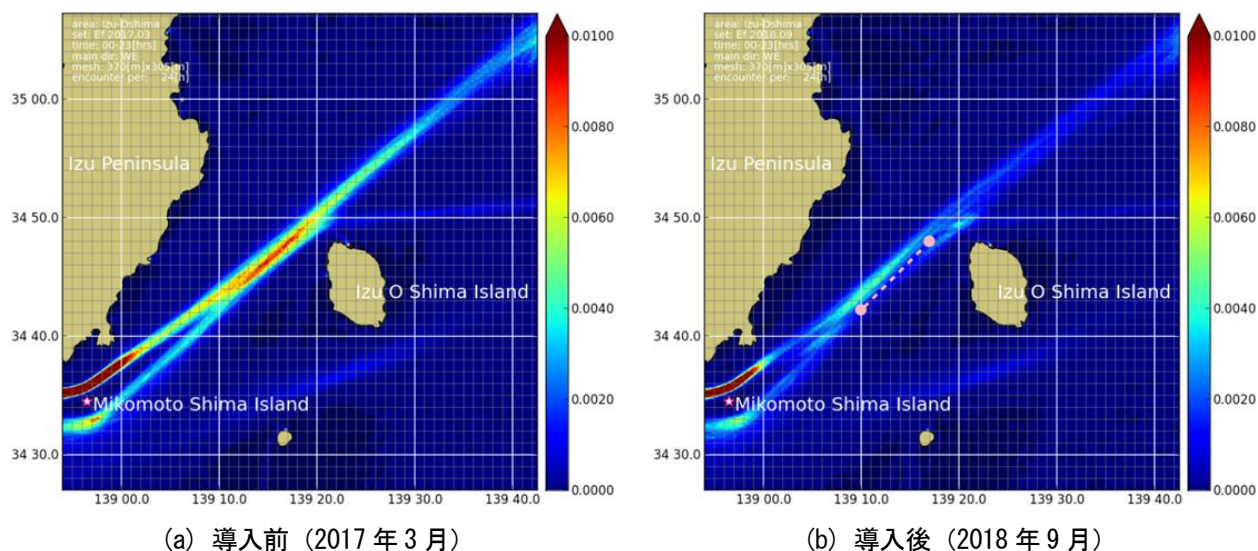


図 4.4 推薦航路導入前後の反航船の遭遇頻度の分布

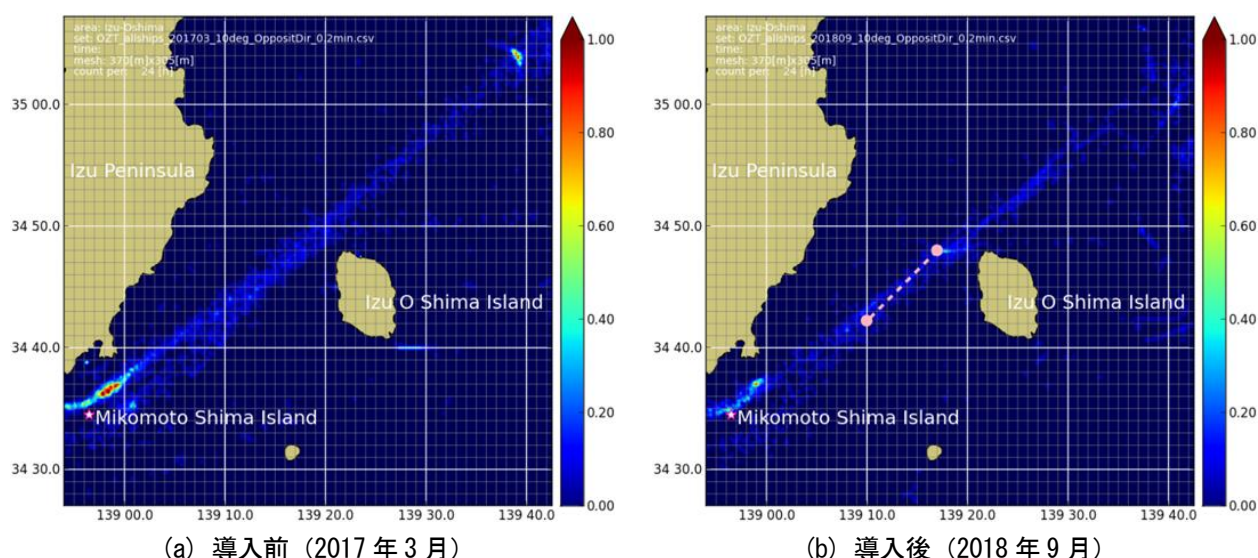


図 4.5 推薦航路導入前後の反航船の OZT の分布

4.2.2 新たな制御ルール構築支援のための設計評価手法の改良

2018 年に策定された第 4 次交通ビジョン⁴³⁾では、第 3 次交通ビジョン⁴²⁾に引き続き、課題の一つとして準ふくそう海域における安全対策の構築が掲げられた。本研究では、交通ビジョンの成果の創出を支援のため、衝突が多いとされる潮岬沖の安全性向上を目的として、前項のフィードバックによる制御ルール設計評価手法⁴⁷⁾の改良と要素技術の開発を行い、これらを適用して潮岬沖推薦航路の設計および安全性評価を行った。本論では制御ルール設計評価手法の概要とともに、潮岬沖推薦航路の設計および安全性評価への適用結果を紹介する⁴⁹⁾。

制御ルール設計評価手法のステップを以下に示す。

- ① 船舶交通の事象の把握による海域の危険要因の特定と対策方針の検討
- ② 詳細な安全対策の立案
- ③ 対策案の安全性評価
- ④ 安全性評価の比較による最適案の選定

ステップ①として、本研究では衝突の発生要因の分析と解決方策の検討を行うことを目的とした AIS データ解析と既往衝突の調査を実施した。この結果、潮岬沖は AIS を搭載した船舶だけでも多日月で毎日約 250 隻が通航している交通量の多い海域であり、西は大阪湾や高知沖から、東は伊勢湾や伊豆半島沖へと続く東西の主要航路が交差する海域であることが明らかとなった。発生する東西の向きに関わらず通航船舶のうち約 80%が潮岬灯台から 3.5 海里 (6,482 メートル) 以内の範囲を航行していることが明らかとなった。通航量や主要航路の交差に加え、東西の通航船舶の通航位置が重複しているという特徴が示された。さらに当該海域では漁業活動が活発であり、午前 3 時から午前 5 時の早朝に出港し、午前 10 時から午後 3 時に帰港することにより、この時間帯に前述の東西の通航船舶との交差が発生していることが明らかとなった。事故について見ると潮岬沖は衝突が多発しており、2007 年から 2016 年の 10 年間で衝突発生数は 19 件であった。内訳は商船と漁船の衝突が 14 件（11 件が航行中の漁船、残り 3 件が操業中の漁船が関与）であり、残りの 5 件が商船同士の衝突で、いずれも行き会いの見合い関係にあることが示された。この結果を踏まえ、衝突の削減に有効であると考えられる東西交通を分離・整流化する推薦航路が対策方針として挙げられた。

次にステップ②の詳細な安全対策の立案として推薦航路の設計を行った。当該海域の重要な目印である潮岬灯台等の物標との位置関係や従来の通航パターン等の商船に関する要素および漁場や漁法の漁業活動の漁船に関する要素、区切りの良い緯度経度や角度等の運用に関する要素を総合的に考慮し、基線的位置、角度、長さを設定した上で、陸地との距離を変えた 3 つの案を作成した。

対策案の安全性評価ステップ（ステップ③）として、AIS 非搭載船も含めた当該海域を航行する船舶を対象として、AIS データ等の観測に基づく観測航行モデルおよび各案導入後の予測交通モデル、また漁業活動を表現した漁船行動モデルを作成し、交通流シミュレーションにより現行および予測航跡を生成した。予測交通モデル構築においては、航路の順守率を予測し、これに基づき船舶の行動を決定した。設計評価段階での正確な順守率の予測は難しいものの、推薦航路導入前後の変化を明確に示すため、高い順守率が達成された場合に得られる最大の衝突危険性軽減効果を推定した。さらに推薦航路および位置表示に使用される仮想ブイの特性より航路を順守しない船舶が一定数存在すると想定し、航路の適用船舶のうち 95%が航路を順守すると仮定した。なお現行の通航パターンおよび航路通航の合理性を考慮し、航路の適用船舶は潮岬灯台から 180° の方向 5 海里 9,260 メートル以内を航行する船舶とした。さらにこれらの航跡情報に基づき、衝突が発生しやすい船舶交通および漁業活動が多い早朝の時間帯を対象として、遭遇頻度と OZT により衝突危険性の軽減効果を推定した。

最後のステップ④では、遭遇頻度と OZT による衝突危険性の軽減効果の比較により最適案が選定された。最適案では、交通流が集中する状況であっても行き会いによる遭遇頻度は航路周辺海域において導入前から約 90%減少すると推定された。図 4.6 は 1 日当たりの航路導入前後の商船同士の遭遇頻度分布である。

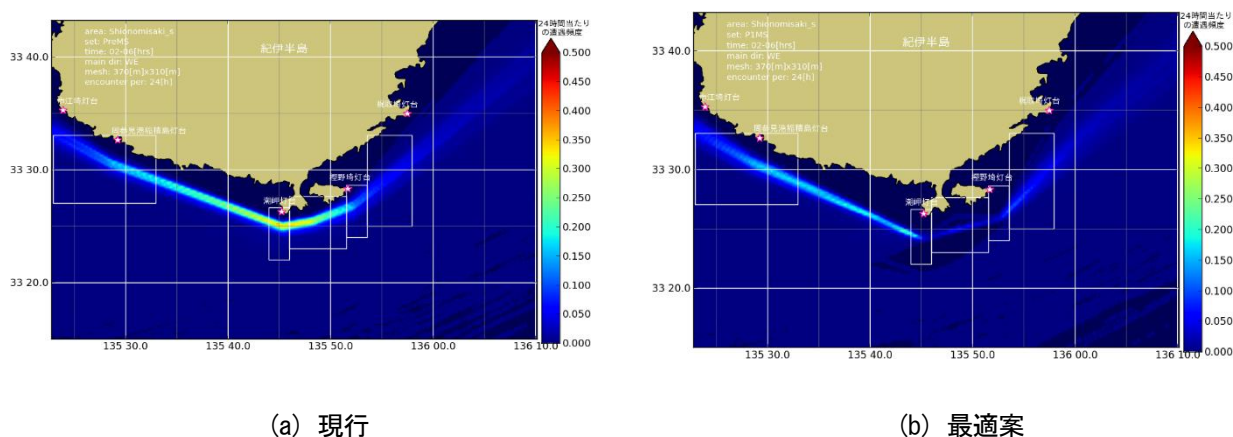


図 4.6 商船同士の衝突軽減効果確認のための遭遇頻度推定結果

この結果は国内の漁業関係者も含めた専門家による合意形成を経て、国際海事機関（IMO）MSC106（2022 年 11 月）の審議により 2023 年 6 月 1 日からの運用開始が決定された（図 4.7）。この推薦航路の導入により、潮岬沖の交通が整流化されることで反航する商船同士および商船と漁船の間の衝突危険性が低減すると期待されている。

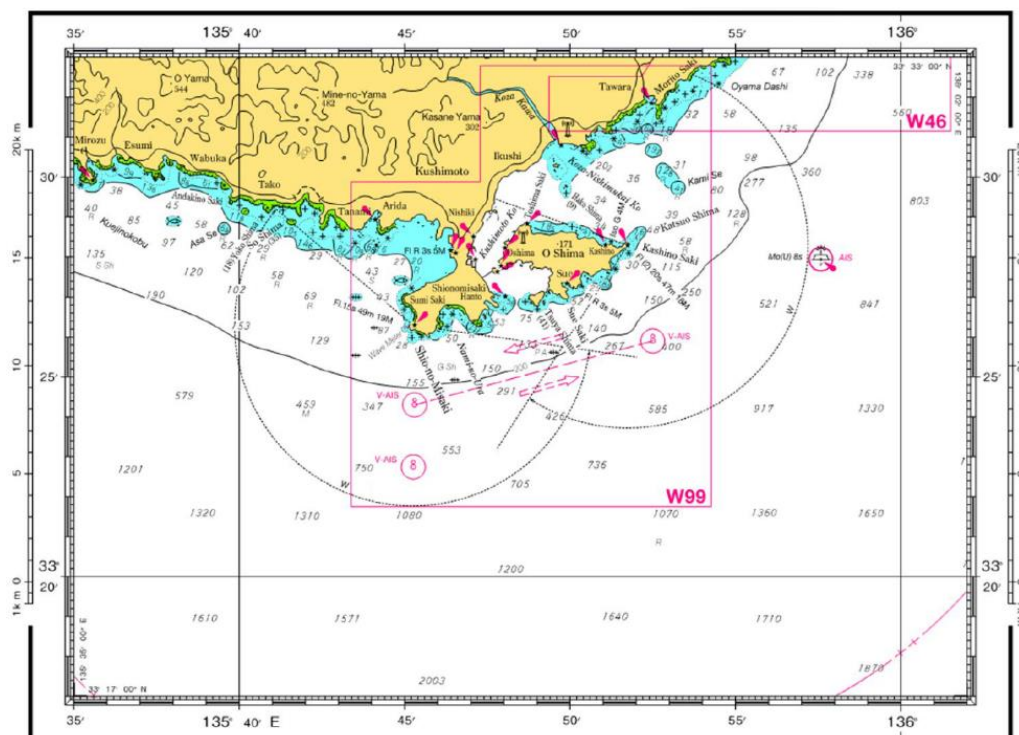


図 4.7 潮岬沖推薦航路の位置（文献⁴⁻⁹⁾を基に加工）

4.3 衝突事故解析支援のための総合的分析手法の構築

IMO では将来の海上事故および海上インシデントを防止するため、体系的な事故調査を要求しており、人的要素に関する分析を包含することを求めている。また近年の情報技術の発展により、船舶事故の調査においても事故時の各種データが使用できるようになってきた。本研究では一般的な人的要因の解析手法である CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method) 分析手法⁴⁻¹⁰⁾に、AIS データ等の航行状況情報から得られる事故時の両船の物理的状況を相補的に活用することにより人的要因に起因する事故を総合的に分析する手法を構築した。衝突の事例に適用し、この有効性を検証したので報告する。

4.3.1 事故の概要

2016 年 6 月 7 日 07 時 08 分 54 秒頃に神戸中央航路で発生した A 船（17 万総トン）と B 船（1 万総トン）の衝突事故を例に解析を行った。事故前の状況図を図 4.8 に示す。なお周囲に停泊船や航行船が存在していたが、衝突した船舶のみを表示している。

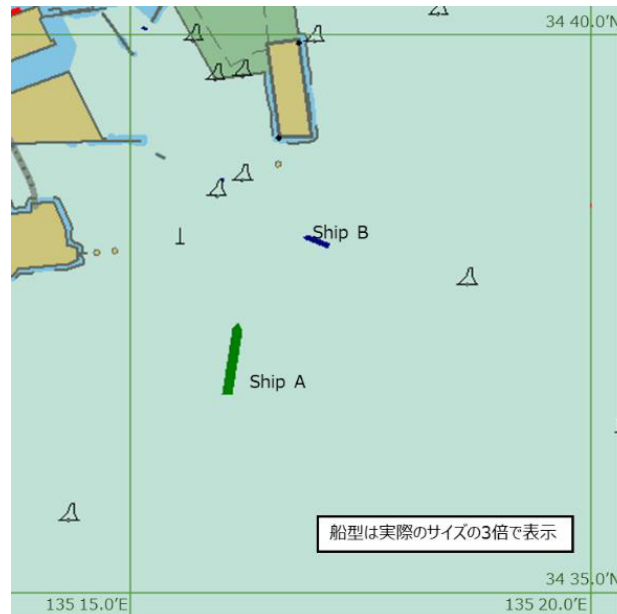


図 4.8 衝突した船舶（A 船および B 船）の位置関係（07 時 00 分 00 秒頃）

4.3.2 CREAM 分析手法による認知行動分析

海上事故の多くは人的要因によるとされるが、事故調査では物理的要因が主に分析され、操船者の認知や意思決定に関する要因は十分に扱われていない。特に、認知行動に起因するエラーや事故原因の解明は困難であり事故調査の情報収集の限界が指摘されている。この問題を解決するため、船者の認知行動とその要因を評価する手法の構築を行った。CREAM は、人間の認知行動を分析する手法であり、作業環境や組織的要因がエラーに与える影響を評価する。分析は以下の工程で進められる。

- ① 実際に発生した事柄の記述：事故に関する事柄を客観的に抽出し記述する
- ② CPC (Common Performance Conditions：共通作業条件) の特定：安全管理体制や航行・当直環境等の 9 種類についての適正さの抽出
- ③ 大きな事象の時間関係の記述：抽出した事柄に関する時間関係を記述する
- ④ 着目すべき行動の選出：整理された事故の過程の中から不安全行動（逸脱した行動）を選出する
- ⑤ 行動に対するエラーモードの特定：不安全行動に対するエラーモード（作業上の逸脱の種類を言い、例えばタイミング（早すぎ・遅すぎ・省略）等の 8 つが設定）を特定する
- ⑥ 各エラーモードの原因 - 結果リンクの特定：整理されている「原因-結果リンク」のガイドを参考に原因と結果のリンクの連鎖を特定する
- ⑦ 全体記述による原因の特定：各結果を基に原因を特定する

分析結果を総合して、事故に至る行動の要因として以下のような事項が背後要因として関係していることが分かった。A 船は、水先人と船長のコミュニケーションの失敗により巨大船である自船の入港が優先されるとの誤った認識を修正できなかったこと、水先人が操船指揮をとっているため船長は意見を述べ難かったこと等が背後要因として挙げられた。B 船は、入港予定時刻よりも遅れていたこと等が背後要因として挙げられた。事故における人的要因分析に適用するためには、使用する情報量や確かさの確保が課題となるが、CREAM 手法を適用することで、事故に関与した作業者の事故に至るまでの認知行動と背後要因を総合的に説明できることを示した。

4.3.3 AIS データを用いた状況認識評価

海難事故の再発防止を目的として、事故の原因究明と予防策の策定が求められている。船舶の位置情報等の定量的情報から、平時と同様の操船が行われていたかの航行状況の評価や操船者が衝突の危険状況を認識しえたかどうかの状況認識を評価（以下、状況認識評価）する手法を構築した。

分析方法および概要を示す。事故時の航行状況を平時と比較するため、A 船の過去 14 回の入港実績と事故当日の航跡を AIS データにより解析した。事故当日の A 船の航跡は、航路入口付近で停泊船や他の船舶を回避するため西寄りの航路をとったと推定されるが、過去の実績と比較して大きな逸脱は見られなかった。速力についても過去の平均と大きな差は確認されなかった。

また操船者が衝突の危険状況を認識しえたかどうかの状況認識を評価するため、方位変化、距離、最接近時間 (TCPA: Time of Closest Point of Approach)、最接近距離 (DCPA: Distance of Closest Point of Approach)、船首横切り距離 (BCR: Bow Crossing Range) の船上で観測可能な相対状態量と、AIS データ等の航跡情報から得られる遭遇船舶の物理的状況を基に計算される衝突危険性を表す指標を用いてそれぞれの時間変化を分析した。それぞれの時間変化を図 4.9 および図 4.10 に示す。衝突危険性を表す指標として、航行安全性に関する評価指標としてよく利用される CJ (Collision Judgement)⁴⁻¹¹⁾、SJ (Subject Judgment)⁴⁻¹²⁾、CR (Collision Risk)⁴⁻¹³⁾、BC (Blocking Coefficient)⁴⁻¹⁴⁾、OZT⁴⁻⁷⁾を適用した。CJ、SJ、CR、BC は危険性を定量的に示す指標であり、CJ と CR は正の値が大きいほど、SJ は負の絶対値が大きくなるほど、BC は数値が大きくなるほど衝突危険性が高いことを意味する。

図 4.9 より、方位変化は 7:00 頃まで大きな変化は見られず衝突の危険性に気づきやすい状況にあったこと、また DCPA や BCR は 6:55 頃から非常に小さい値が継続していることから、6:55 以降は衝突の危険性の認知は可能であったと推定された。図 4.10 より、指標や船により異なるが、6:55 頃もしくは 7:00 頃から衝突危険性が高くなっていることから、それ以前は衝突の危険性の認知は難しかった可能性があるが、それ以降では認知は可能であったと推定された。また相手船により進路が妨害されたときの自船位置を図 4.11 に示す。相手船により進路が妨害されたときとは、安全航過距離を 0.1 NM (2 船が衝突している状態) として、自船から OZT までの到達時間が 5 分以内、自船針路から左右片舷 10°内に OZT が存在していることを条件とした。図 4.11 より、1 分程度の差はあるが両船共に 7:01～7:02 には相手船により進路が妨害されている状況であり、危険な状況にあることが認知可能であったと推定された。

本研究で使用した全ての指標が本事例以外にも適用可能かは、更なる事例の蓄積が必要であるが、操船者が衝突の危険状況を認識しえたかどうかの状況認識評価において、船上で観測可能な相対状態量および遭遇船舶の物理的状況を基に計算される衝突危険性を表す指標は有効であることを確認した。

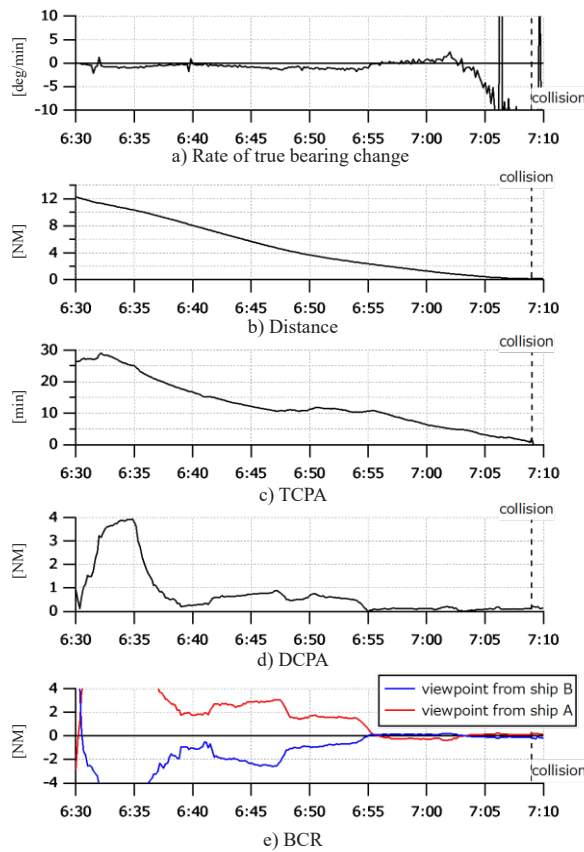


図 4.9 衝突前の相対状態量の変化

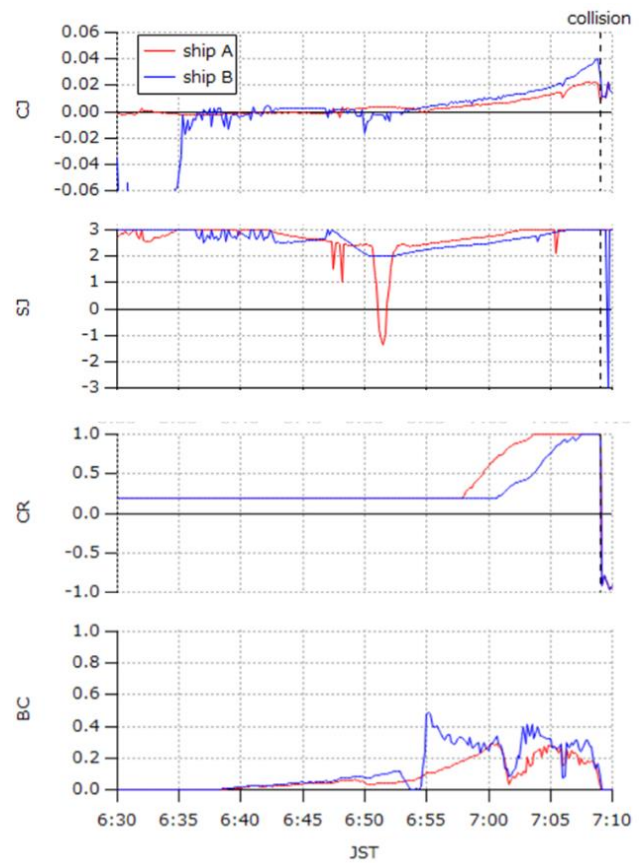


図 4.10 衝突前の衝突危険性の指標の変化

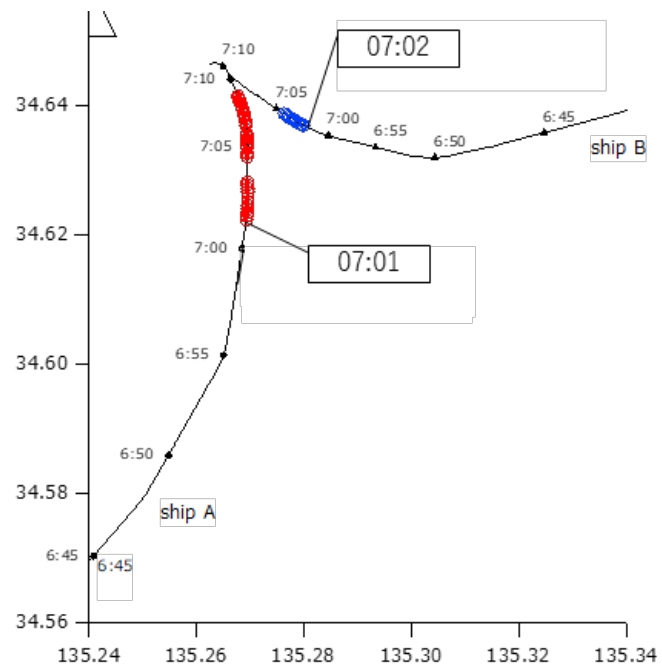


図 4.11 相手船により進路が妨害されたときの自船位置

4.4 衝突リスク評価技術の高度化に関する研究

これまで船舶同士の潜在的な衝突発生数は、主に、限定された数の交通流が一定の出会い角や見合い関係で交差する理想的な海域であり、かつ船舶の密度や速度等の航行状況が一定である限定された条件において、その限定された数の船舶を識別し、交通流全体を流れ方向に一樣、幅方向には一定の確率分布に従うとみなすことで推定されてきた。このような制約から、従来の手法は主に航路や狭水道等といった限定的な対象における衝突危険性の評価に使用されてきた。一方、ふくそう（輻輳）海域では様々な進路の船舶が行き交うため、交通流全体の一樣性を仮定することに無理があり、潜在的な衝突発生数の推定に従来の考え方を適用することは難しい。更に、AIS（船舶自動識別装置）の義務化以前は、海上交通はレーダー観測と目視の併用などで実施されたため、長時間の航行状況の観測や複雑な交通流の把握に多大な時間と労力を必要とし、陸から離れた沿岸域の船舶動静の把握は容易ではなかったことから、主要な航路や狭水道において観測された僅かなデータをもとに、交通状況が一定であるとの仮定をおくことで推定を実現していた。しかし、近年 AIS が普及し、ふくそうする沿岸域の船舶動静に関する詳細な情報を取得することが可能となったため、当該海域の交通流の複雑な実態に即した衝突危険性の度合い、海域内における危険性が高い場所の掌握、衝突事故防止のための安全対策の立案等に注目が集まっている。

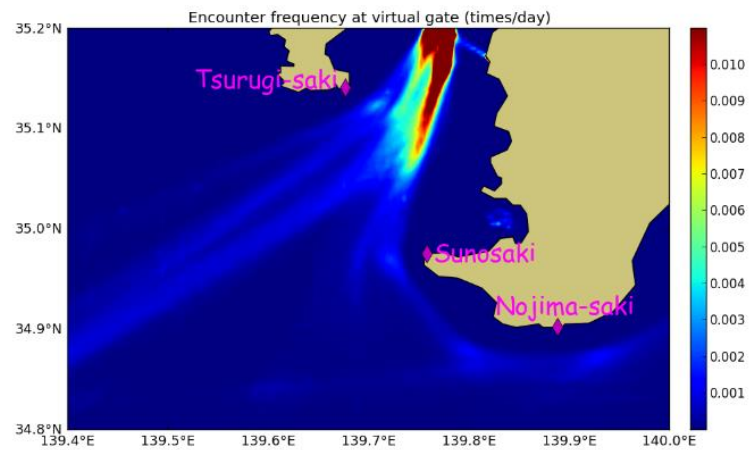
そこで本研究では、ふくそう海域の複雑な交通流に対して潜在的な衝突発生数を推定する手法を開発した。交通流の一樣性を仮定し、交通流同士の幾何学的な位置関係から推定する従来の手法とは異なり、まず緯度経度に沿う直交座標系を用いた計算格子を対象海域に導入し、海域を格子毎に離散化することにより、格子毎に進路別の通航量や通航位置分布の計算を可能とした。次に、各格子における全通航船舶を有限な数のグループに分けて、発生する全ての見合い角の船舶同士の潜在的な衝突発生数を推定することで、出会い角に対応した理想の交通流下で潜在的な衝突発生数を推定する手法を提案した。直進する船舶群*i*と*j*が交差する場合に各格子における潜在的な衝突発生数（以下、幾何学的衝突回数という）は以下のように計算される。

$$E_n = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=i+1}^{n_j} \frac{Q_i}{V_i} \cdot f_i(z_i) \cdot \frac{Q_j}{V_j} \cdot f_j(z_j) \cdot V_{ij} \cdot D_{ij} \cdot A \cdot \Delta t \quad (4.1)$$

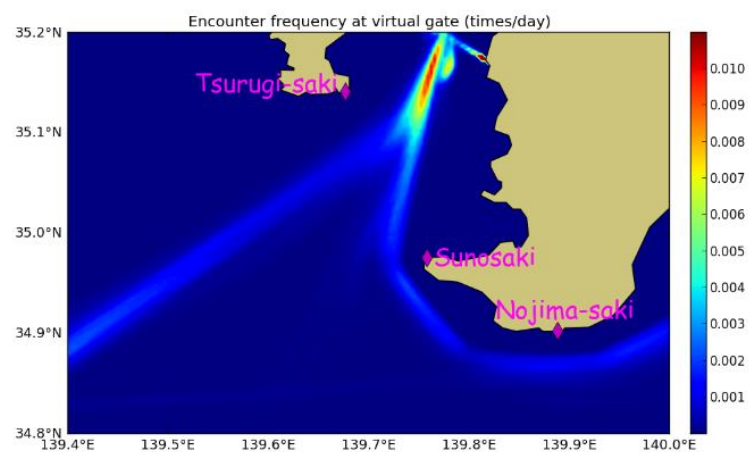
ここで Q_i 、 Q_j は各船舶群の船舶数、 V_i 、 V_j は各船舶群の速度、 $f_i(z_i)$ 、 $f_j(z_j)$ は各船舶群の通航位置分布、 V_{ij} は相対速度、 D_{ij} は幾何学的衝突直径と呼ばれる船舶同士が衝突する範囲、 A は格子面積（評価面積）、 Δt は評価時間、 n_i 、 n_j は全通航船舶を有限な数に分けた際のグループ数を表す。

このように、航路あたりで行われていた従前の計算手法に対し、単位面積、単位時間あたりの衝突頻度という概念をとり入れ、これをもとに格子毎の幾何学的衝突回数を計算することで、海域及び時間帯の特徴を考慮することや、海域間での比較に用いることが可能となった。また、格子毎にあらゆる出会い角の船舶遭遇に対応していることで、見合い関係別の幾何学的衝突回数が計算できるため、例えば、潜在的衝突の分布状態を可視化することも可能となった。なお、本手法の妥当性の検証として、従来手法でも適用可能な整流された単純な交通流を対象に計算結果を比較し、両者で定量的に良好な一致が見られることを確認した。

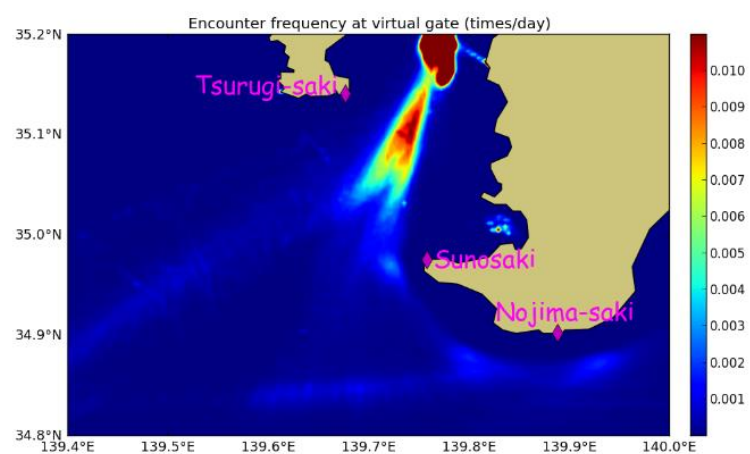
図 4.12 に、東京湾口において見合い関係（追越し関係、正面関係、及び横切り関係）別に計算した幾何学的衝突回数の分布状態を地図上に可視化した図を示す。見合い関係別に分布図を可視化することにより、見合い関係によって幾何学的衝突回数の多少が異なることが分かった。具体的には、どの見合い関係においても湾口において幾何学的衝突回数が多いが、湾内では、横切り関係の幾何学的衝突回数が多く、湾内に設置されてある浦賀水道航路では追越し関係の幾何学的衝突回数も多かった。湾外では、追越し関係及び横切り関係の船舶が通航する筋が存在することが分かった。



(a) 追越し関係



(b) 正面関係



(c) 横切り関係

図 4.12 東京湾口における見合い関係別の幾何学的衝突回数の分布状況

4.5 まとめ

船舶の航行安全を確保することを目的とし、船舶交通を制御する交通ルール設計評価手法および効果検証のための影響評価手法を構築するとともに、これらの要素技術となる衝突リスク評価技術の高度化を実施した。また海難、特に衝突を対象とした人的要因に起因する事故を総合的に分析する手法の構築を行った。本研究が船舶の航行の安全性向上の一助になれば幸いである。

4.6 参考文献

- 4-1) Japan Coast Guard: Current Situation and Countermeasures of Marine Casualties (provisional translation), (2023), https://www6.kaiho.mlit.go.jp/info/keihatsu/20240614_state_measure01.pdf (Accessed 18 December 2024) (In Japanese).
- 4-2) Japan Coast Guard: The Third Transportation Vision, <https://www.mlit.go.jp/common/001085409.pdf> (Accessed 18 December 2024) (In Japanese).
- 4-3) Japan Coast Guard: The Fourth Transportation Vision, <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001354840.pdf> (Accessed 18 December 2024) (In Japanese).
- 4-4) Japan Coast Guard: The Fifth Transportation Vision, <https://www.kaiho.mlit.go.jp/seisaku/5thkotsuvision.html> (Accessed 18 December 2024) (In Japanese).
- 4-5) Japan Association of Marine Safety: The Investigation on Development of Safety Measures off the Western Coast of Izu O Shima Island(provisional translation), The Japan Association of Marine Safety: Tokyo, Japan, (2016). (In Japanese)
- 4-6) IMO: SN.1/Circ.335, Routeing Measures Other Than Traffic Separation Schemes, (2017).
- 4-7) Imazu, H. Evaluation Method of Collision Risk by Using True Motion. TransNav, Int. J. Mar. Navig. Saf. Sea Transp. (2017), 11, 65-70. <https://doi.org/10.12716/1001.11.01.06>.
- 4-8) Miyake, R., and Itoh, H.: Design and Safety Assessment of Recommended Route off the Western Coast of Izu O Shima Island. Journal of Marine Science and Engineering 10 (8) (2022), p.1060. <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/8/1060>.
- 4-9) IMO, NCSR 9/3/2: Routeing Measures and Mandatory Ship Reporting Systems: Establishment of a recommended route off Cape Shio-no-Misaki, Japan, (2022).
- 4-10) Erik Hollnagel: Cognitive Reliability and Error Analysis Method CREAM, Elsevier, (1998).
- 4-11) 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, 日本航海学会論文集, 第 56 号, (1976), pp.101-109.
- 4-12) 原潔: 輻輳海域における避航操船基準の有効性, 日本航海学会論文集, 第 85 号, (1991), pp. 33-40.
- 4-13) Kazuhiko Hasegawa, Junji Fukuto, Rina Miyake, Masahiko Yamazaki: An Intelligent Ship Handling Simulator With Automatic Collision Avoidance Function Of Target Ships, Proc. of 17th International Navigation Simulator Lecturers' Conference, INSLC 17, Germany, (2012).
- 4-14) 長澤明, 原潔, 井上欣三, 小瀬邦治: 避航操船環境の困難度-II: シミュレーションによる評価に向けて, 日本航海学会論文集, (1993), pp.137-144.

5. 自動運航船のリスク評価手法に関する研究

5.1 はじめに

センシングや AI/IoT 等の技術が年々進化しており、これらの技術を船舶の運航に活用した自動運航船の開発・実証が、安全性向上や船員労働環境の改善等への期待から、世界的に進められている。こうした動きを受けて、国際海事機関（IMO）は、2018 年から 2021 年にかけて IMO 関係規制の論点整理（Regulatory Scoping Exercise, RSE）を実施するとともに、2019 年には安全な実証試験実施のための原則等を定めた暫定指針⁵⁻¹⁾を策定し、2022 年からは自動運航船の国際規則である MASS コードの検討が進められている。また、旗国や船級協会においても、自動運航船のガイドライン^{5-2) - 5-6)}が公開されている。それらでは、自動運航船設計時にリスク評価を実施するこ

とが明記されており、リスク評価は自動運航船の安全性を評価する手法として有効である⁵⁻⁷⁾と考えられている。しかし、自動運航船のリスク評価の方法は十分には確立されておらず、自動運航船の安全性の検証・評価に課題があった。このような背景のもと、本研究では、大規模・複雑システムである自動運航船のモデル化手法、リスク評価手法を開発した。また、リスク評価実施者の負担軽減のために、自動運航船のリスク評価の支援ツールの開発も実施した。以下では、これらの概要を報告する。なお、リスク評価には様々なアプローチ⁵⁻⁸⁾があるが、本章では主に HAZID (Hazard Identification) を想定している。

5.2 対象システムのモデル化手法の開発

リスク評価を実施するためには、対象システムを明確化する必要がある。自動運航船のリスク評価の場合、対象システムは自動運航船であり、その明確化が必要となる。自動運航船は、ハードウェア、ソフトウェア及び人間から構成される大規模・複雑システムであり、その全体像（アーキテクチャやタスク等）をリスク評価に適したレベルで表現・定義する必要があるが、その手法は確立されていない。このような背景のもと、本研究ではソフトウェアのモデル化に利用される UML (Unified Modeling Language) のクラス図を応用したモデル化手法⁵⁻⁹⁾⁻⁵⁻¹⁴⁾を開発した。本手法により仮定の自動運航船をモデル化した例を図 5.1 に示す。本手法では、各構成要素の構成要素名、保有情報及びそれらのタスクを図 5.1 に示すような箱に記載するとともに情報の流れ等を 2 種類の矢印で示す。このようにしてモデル化することで、自動運航船の全体像の理解促進が期待され、これを参照しながら次節で示す手法でリスク評価を実施することで漏れの無いハザード同定が期待される。

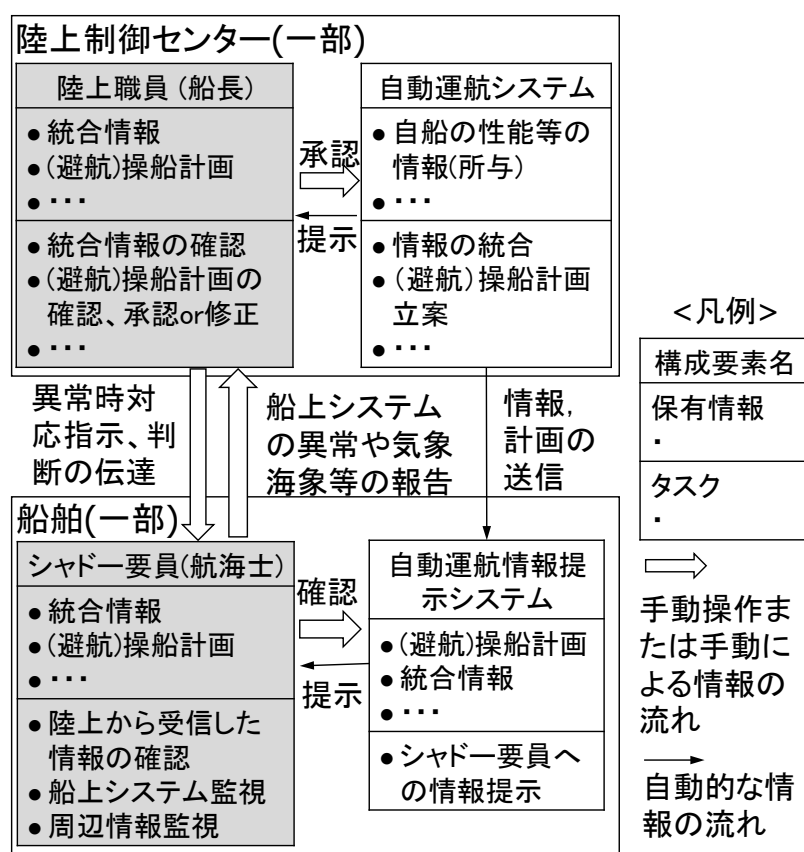


図 5.1 UML のクラス図を応用した手法による仮定の自動運航船のモデル化の例⁵⁻¹³⁾を修正

5.3 リスク評価手法の開発

従来船に対するリスク評価では、ハードウェアの故障等に着目しハザードを同定することが一般的であった。自動運航船は、従来人間が行っていた認知・判断・操作等のタスクをソフトウェアが担う比重が増す。そのため、

自動運航船のリスク評価の場合、タスクの失敗に着目する必要がある。ただし、自動運航船であってもハードウェアの故障は運航に支障を来す為、従来通りハードウェア故障にも着目する必要がある。また、自動運航船の場合、設計上想定されている運航条件である運航設計領域（ODD, Operational Design Domain）内で自動運航が実施され、そこから逸脱した条件となった場合に危険が生じるため、ODDからの逸脱にも着目する必要がある。本研究では、これら3点に着目してHAZIDを行うTask-Based HAZID (TB-HAZID)^{5-13) - 5-16)}手法を開発した。本手法では、タスクに着目する場合、対象タスクを「しない、間違える、遅れる」となった場合等を想定してハザードの同定を実施する。仮想の自動運航船を想定し、TB-HAZIDを実施した結果の例を表5.1に示す。

表 5.1 TB-HAZID の結果の例⁵⁻¹⁵⁾

タスク実施者	避航操船計画立案システム
タスク	避航操船計画の立案
ハザード	実行不能な操船計画の作成
原因	・操船計画立案システムの不適切なパラメータ ・経年劣化や故障、気象海象による船体機能の低下（パラメータ修正が未実施）
結果	・ODD 外での自動運航 ・避航の失敗
タスク実施者	陸上職員（船長）
タスク	避航操船計画の承認
ハザード	誤った避航操船計画の承認
原因	・情報と現状の相違の誤認
結果	・航行の緊急停止，航行不能 ・衝突，座礁，乗揚げ

本研究では更に TB-HAZID 法を高度化し、Structure Model-Based HAZID (SMB-HAZID)手法^{5-9), 5-10), 5-12), 5-17) - 5-18)}を開発した。SMB-HAZID では、①5.2 節で示した手法により自動運航船のモデル化を実施し、②そのモデルをベースに船舶分野のリスク評価で良く利用されてきたSWIFT (Structured What If Technique)でHAZIDを実施する。本手法は、表 5.2 に示すチェックリストと TB-HAZID のタスクに関するキーワード（「しない、間違える、遅れる」）も使ってハザードの同定を行う点に特徴がある。表 5.2 に示す通り、チェックリストは TB-HAZID における3つの観点を詳細に整理したものとなっている。チェックリスト及びキーワードを使ってハザード同定を実施することで、自由なブレインストーミングによってハザードを同定するよりも効率的かつ網羅的にハザードを同定することが可能となる。本手法により、自動運航船の構成要素のタスクや構成要素間の相互作用に関連するハザードを考慮することが可能であり、自動運航船のハザード、原因及び結果、更にはそれらを防止する効果的な安全対策の検討が可能である。表 5.3 に SMB-HAZID によるハザード、原因及び結果の同定結果の一例を示す。

表 5.2 自動運航船の HAZID のチェックリスト⁵⁻⁹⁾

	HAZID における観点
構成要素の種類 毎の観点	<u>ハードウェア</u> : ・ 機器故障 ・ 不適切な配置や接続 <u>ソフトウェア</u> : ・ タスクの不具合 (バグ, 誤診断, モード切替エラー) ・ サイバーセキュリティ問題 <u>人間</u> ・ タスクの不具合 (誤判断, 不適切な計画) ・ 実施間違い
構成要素間の相 互作用の観点	・ 不適切な HMI (Human-Machine Interface) ・ ソフトウェア間の不適切な相互作用 ・ 人間同士の不適切な相互作用 ・ 通信ネットワークの不具合
ODD からの逸脱 の観点	・ ODD 逸脱の検知エラー ・ 不適切な通知計画 ・ 人間によるテイクオーバーのエラー

表 5.3 SMB-HAZID によるハザード、原因及び結果の同定結果の例⁵⁻⁹⁾

ハザード	ODD 逸脱が船長に認識されない
原因	・ センサ等の故障 ・ 自船状態値等の送信不具合 ・ ODD 情報表示システムの不適切な配置による船長の確認不足
結果	・ ODD 外での自動運航
ハザード	遠隔操船センターと船舶間の通信システムへのサイバー攻撃
原因	・ 不適切／不十分なセキュリティ対策
結果	・ 遠隔操船センターと船舶間で避航操船計画等の情報が通信されない ・ 誤った避航操船計画等の情報が船舶に送信される

5.4 支援ツールの開発

自動運航船の安全性向上のために有用であると考えられるが、自動運航船の開発者や認証者等の中にはリスク評価に不慣れな関係者も多いことが想定される。そのため海技研では、日本財団が実施している MEGURI2040 プロジェクト⁵⁻¹⁹⁾の一環で同財団の助成を受けて日本船舶技術研究協会が実施している「MEGURI2040 に係る安全性評価事業」の一部として、自動運航船のリスク解析の具体的な手順等を示した「自動運航船/無人運航船のリスク解析手順書」(日本語版及び英語版)を開発し、一般に公開した⁵⁻²⁰⁾⁻⁵⁻²¹⁾。本手順書には、仮想的な自動運航船に対して 5.2 節及び 5.3 節で示した手法を使ってモデル化及びリスク評価を実施した具体的な例を付属書として含んでおり、自動運航船開発者等の負担軽減や自動運航船の安全性向上が期待される。なお、本手順書は国土交通省海事局による「自動運航船に関する安全ガイドライン」⁵⁻²⁾でリスク評価の具体的な実施例として参照されている。

リスク評価において、対象システムに関する資料やリスク評価を実施して同定されるハザード、原因及び結果等を記録した HAZID ワークシートは一般的に人手により非定型・半定型的に作成される。そのため、i) 作業負担が大きい、ii) 各種資料間の一貫性・整合性の不足、iii) 各種資料と HAZID ワークシート間の一貫性・整合性の不足等が課題として考えられる。本研究では、これらの課題解決に向けて自動運航船のリスク解析支援ツールの

開発⁵⁻²²⁾にも着手した。本ツールでは主に5.3節で示したSMB-HAZID手法の利用を想定しており、5.2節で示したUMLクラス図応用手法によるモデル作成の支援機能やHAZIDワークシートの作成支援機能を実装した。後者の機能では、HAZIDワークシートのフォーマットを自動で作成し、更に自動運航船の各構成要素及びそれらのタスクからハザードが自動的にHAZIDワークシートに記載される。その出力結果の一部を図5.2に示す。現状では、原因や結果等については人手で記載することを想定しており、これらも自動で記載されるようにすることが今後の課題である。

ID	Hazard	Causes	Consequences
	ハザード	原因	結果
自律操船システム			
1	操船計画の立案の誤り		
2	操船計画の立案の未実施		
3	操船計画の立案の実施が遅すぎる/早すぎる		
4	運航フェーズ切替（通常航行→着岸操船）の誤り		

図 5.2 HAZID WS 作成支援機能による出力結果の例（一部）⁵⁻²²⁾を修正

5.5 まとめ

リスク評価は自動運航船の安全性の確保・向上のために有用であるが、自動運航船のリスク評価の方法は十分には確立されていないという背景のもと、本研究では、大規模・複雑システムである自動運航船のモデル化手法、リスク評価手法、支援ツールの開発を実施した。本研究で開発した手法及びツールにより自動運航船のリスク評価の効率的な実施や網羅的なハザード同定等が期待される。本研究が自動運航船の安全性向上や社会実装の一助になれば幸いである。

5.6 参考文献

- 5-1) IMO: INTERIM GUIDELINES FOR MASS TRIALS, MSC.1/Circ.1604, (2019).
- 5-2) 国土交通省海事局：自動運航船に関する安全ガイドライン，令和4年2月，(2022).
- 5-3) Norwegian Maritime Authority: Guidance in connection with the construction or installation of automated functionality aimed at performing unmanned or partially unmanned operations, RSV 12-2020, (2020).
- 5-4) ClassNK：自動運航，自律運航に関するガイドライン(Ver. 1.0)～自動化システム／遠隔制御システムの設計開発，船舶搭載並びに運用について～，(2020).
- 5-5) Bureau Veritas: Guidelines for Autonomous Shipping, Guidance Note NI 641 DT R01 E, (2019).
- 5-6) DNV-GL: Autonomous and remotely operated ships, DNVGL-CG-0264, (2018).
- 5-7) 山田智章：自動運航船関連技術に対する安全性評価，KANRIN，第97号，(2021)，pp.36-39.
- 5-8) UK HSE: Marine Risk Assessment. Offshore Technology Report 2001/063, Prepared by DNV for HSE, (2001).
- 5-9) Shiokari, M., Itoh, H., Yuzui, T., Ishimura, E., Miyake, R., Kudo, J., Kawashima, S.: Structure model-based hazard identification method for autonomous ships, Reliability Engineering & System Safety, Volume 247, (2024).
- 5-10) 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，(2021)，pp.355-366.
- 5-11) 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会学術講演会講演論文集，(2021)，pp.167-168.

- 5-12) 塩莉恵, 伊藤博子, 柚井智洋: 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, (2020), pp.393-396.
- 5-13) 石村恵以子, 伊藤博子, 塩莉恵, 柚井智洋, 三宅里奈, 工藤潤一, 河島園子: 仮想の自動運航船を対象とした安全性評価, 海技研第 21 回研究発表会, (2021), pp.85-86.
- 5-14) 柚井智洋, 伊藤博子, 石村恵以子: 自動運航船のリスク解析・評価 海上技術安全研究所における研究の紹介, KANRIN, 第 118 号, (2021), pp.36-39.
- 5-15) 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, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 59 巻, 第 4 号, (2024), pp.113-122.
- 5-16) 石村恵以子, 高野慧, 笛木隆太郎, 塩莉恵, 伊藤博子: 短距離小型旅客船の無人運航実証実験のリスク解析～無人運航船プロジェクト MEGURI2040～, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 34 号, (2022), pp.179-180.
- 5-17) 三宅里奈, 伊藤博子, 石村恵以子, 柚井智洋, 塩莉恵, 工藤潤一, 河島園子, 平田宏一, 仁木洋一, 小林充, 澤田涼平, 稲葉祥吾, 小型実験船の遠隔操船のリスク解析, 海上技術安全研究所報告, 第 22 巻, 第 2 号, (2022), pp.41-56.
- 5-18) 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会学術講演会講演論文集, (2021), pp. 173-174.
- 5-19) 日本財団: 無人運航船プロジェクト「MEGURI2040」未来の海を支える「無人運航船」の実用化を目指す, <https://www.nipponfoundation.or.jp/what/projects/meguri2040>. (参照 2025-1-17)
- 5-20) 日本船舶技術研究協会, 海上技術安全研究所: 自動運航船/無人運航船のリスク解析手順書 2023 年度版, MEGURI2040 に係る安全性評価成果報告書別紙, (2024), <https://www.jstra.jp/PDF/a4b9ac084c02102537c2a4bacf6fd4d1413a21f8.pdf> (参照 2025-1-17)
- 5-21) JSTRA, NMRI: Risk analysis procedure for MASS, FY2023 Edition, Attachment Report of the MEGURI2040 Safety Assessment, (2024), <https://www.jstra.jp/PDF/f2fa70eac4509fdb08258dd3ab635757831172c1.pdf>. (参照 2025-1-17)
- 5-22) 柚井智洋, 伊藤博子, 塩莉恵, 石村恵以子, 三宅里奈, 工藤潤一, 河島園子: 自動運航船のリスク解析支援ツールの開発に向けて, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 35 号, (2022), pp.173-176.

6. おわりに

本稿では, 2018 年度から 2022 年度にかけて実施した重点研究について報告した. 液化水素運搬船のリスクに関連する定量的解析手法や燃料タンクの配置設計に関する確率論的な同等安全性評価手法を構築し, 各種燃料の使用に伴う漏洩、大気拡散解析を実現した. また, 水素燃料の漏洩に伴う爆発を想定して水素－空気混合気を用いた爆轟実験を実施し, 爆轟現象の可視化, 圧力計測, 非線形動的構造解析を通して被害度を推定し, 液化水素運搬船に係る国際基準で求められる被害度評価に向けての重要な資料となった. 海上交通の安全確保の観点から, 衝突原因となりうる船舶の遭遇発生状況の推定, 予測技術を開発し, これらを用いた船舶交通の制御対策の評価を実現した. これらは, 海上保安庁による第 4 次交通ビジョンで取り上げられた準ふくそう海域における安全対策の検討ツールとして使用され, 船舶交通の安全性向上に貢献した. 本研究の実施期間中には, 操船を自動化する自動運航の技術開発が加速したことに合わせ, 自動運航船のリスク分析について研究し, 分析手法を提案した. 得られた結果は, IMO で策定中の国際規則案に関する日本国内での検討, 自動運航船のリスク解析手順書の具体例として使用され, 実際に開発される自動運航船に対するリスク解析の促進に寄与した.

本重点研究の一部の内容は, 2023 年度に開始した中長期計画における重点研究に引き継がれ, それぞれ次の段階の目標に向かって研究開発が進められている. また, 一部は本文中に述べたように外部との共同研究や受託研

究等を通して新規技術の社会実装に資する活動が行われている。今後もこれらの活動を通じて、船舶分野における安全性の向上に寄与していきたい。

謝 辞

複数から助成を受けたため、各章毎に謝辞を設けた。

References

参照のし易さのため、各章に参考文献の節を設けた。