



内航カーボンニュートラルの実現に向けた 新技術の安全評価手法の構築

2023 年度 成果報告書

2024 年 3 月



一般財団法人 日本船舶技術研究協会

目次

1.	事業の概要	1
1.1	目的	1
1.2	目標	1
1.3	事業内容	2
1.4	委員会の設置	2
2.	水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築	4
2.1	概要	4
2.2	水素燃料電池船ガイドラインにおける IEC 規格活用の妥当性検証	4
3.	新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築	15
3.1	概要	15
3.2	トリプル連結バージ	16
3.3	船内省力化システム	18
4.	まとめ	19
添付資料 1	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検討委員会 名簿	20
添付資料 2	水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築 ー水素燃料電池船ガイドラインにおける IEC 規格活用の妥当性検証ー	22
添付資料 3	トリプル連結バージ ・概要及びコンセプト	67
添付資料 4	トリプル連結バージ ・運動性能評価	69
添付資料 5	トリプル連結バージ ・自律運航バージの遠隔操縦システム	90
添付資料 6	内航船の船内作業の電化・自動化に関する研究	100

1. 事業の概要

1.1 目的

※日本財団助成申請書からの転載

国の内航船対策・日本財団の ZERO EMISSION 2050 を受け、内航カーボンニュートラルに向けた新技術の導入の環境整備が今後進められる予定である。

環境整備の一つの内航の新技術の安全基準は、外航船の条約基準ベースで整備されているが、内航船適用が困難なことを踏まえ同等安全証明（安全評価）した場合は要件緩和ができる。しかし、導入実績が少なく内航建造の造船所が証明するのは困難で、特に新コンセプト船は代替設計の高度な証明が必要となる。

このため、標準的な安全評価手法を構築し、以て脱炭素化・船舶産業の発展の一助とすることを目的とする。

1.2 目標

※日本財団助成申請書からの転載

(1) 本事業の達成目標

内航カーボンニュートラルに向けた新技術の基準緩和の同等安全証明（安全評価）では、国際海事機関が定める代替設計承認ガイドラインに準じた同等安全の証明が必要になる。証明には、リスク解析に基づく定性評価に加え、シミュレーション等による定量評価の実施が必要になる。しかしながら、内航の新技術の有効な対策の一つとして検討される水素燃料化（燃料電池・水素エンジン）については、船舶分野での使用実績が少なく火災爆発等のリスクを特定するのが難しく、漏洩拡散、爆発可燃限界をシミュレーション等で定量的に解明することは、内航船を建造する小型造船所には技術的にハードルが高い。特に新コンセプト船の場合は、前例がないために高度な証明が必要でさらに困難となる。

このため、内航の新技術の普及の環境整備の一つとして、水素燃料・新コンセプト船の標準的な安全評価手法を構築する。

(2) 期待される効果

内航海運の CO2 排出量は約 1,038 万 t-CO2（2019 年度）で運輸部門の 4.9%・日本全体の 0.91%を占める。近年の排出量は微減傾向にあるが、「2050 年のカーボンニュートラル実現」を達成するには、内航カーボンニュートラルの実現に向けた新技術の普及が不可欠である。本事業で標準安全評価手法を構築することにより、水素燃料等の内航への本格普及が進むことで、国内の脱炭素化の進展が期待されるだけでなく、内航の新技術の社会実装化は、我が国が船舶産業の発展を促すこととなる。

1.3 事業内容

(1) 水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築

- ・その他水素燃料使用の水素燃料電池船の標準安全評価手法の開発・検証（陸機の圧縮水素機器の船舶活用の同等安全）

(2) 新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築

- ・トリプル連結バージの標準安全評価手法の開発・検証（水槽実験、連結強度等の安全評価）
- ・船内省力化システムの標準安全評価手法の開発・検証（概念設計・安全評価）

1.4 委員会の設置

本事業を円滑に遂行するために、外部有識者及び関係者等からなる「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検討委員会」を設置し、標準安全評価手法等の検討を実施した。

添付資料1に委員会の名簿を示す。

図1.1に背景・目的、事業概要、事業計画（実施内容とスケジュール）等の本事業の概要を示す。

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



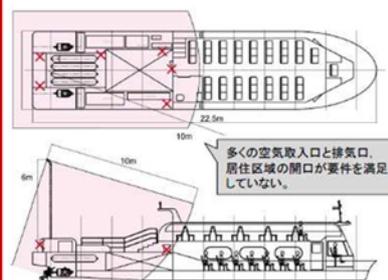
□ 背景・目的

- 世界的な脱炭素化が進む中、国内も2050年のカーボンニュートラル実現に向け官民をあげた取組みが進行。外航海運は既に国際海事機関で検討されているが、国内物流を支える内航海運は検討がはじまったばかり。国交省の検討会・日本財団のZERO EMISSION 2050を受け、内航カーボンニュートラル実現の環境整備が今後進められる予定。
- 環境整備の一つである安全基準は、外航大型船の条約基準をベースに内航船基準（小型船）の整備を進めているが、21年8月公表の燃料電池船安全ガイドラインなど大型船前提の基準適用が困難なことを踏まえリスク評価、シミュレーション等により同等安全証明（安全評価）した場合は適用基準の緩和が可能。しかしながら、カーボンニュートラル実現に向けた技術の導入実績が少ない中、内航船建造の小型造船所が安全評価を行うのは困難な状況にあり、499GT級等の内航太宗船の代替燃料化のための新コンセプト船に必要な代替設計承認のための安全評価の実施はさらに困難。
- 内航カーボンニュートラルの実現に向けた新技術の安全評価手法を構築するための研究開発を実施。

□ 事業概要

- 実施期間：2022年度～2023年度（2年間）
- 実施内容

- 水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築
 - タンク配置、ベント位置等の要件緩和の同等安全証明を衝突・漏洩シミュレーション等の詳細計算なしに対応できる安全評価手法を構築（定式化等）。
 - 新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築
 - コンテナ電源ハイブリッド船（LNG・水素燃料による将来のゼロエミッション化）、トリプル連結バージ輸送船（連結バージの効率輸送によるGHG排出削減）など新コンセプト船の代替設計に必要な安全評価手法を構築（概念設計＋安全評価）。
- 予算：7,975万円（100%助成）
2022年度2,987万円、2023年度4,988万円



水素燃料電池船安全ガイドの要件緩和の例（ベント高さ・開口部からの隔離距離）

内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全性評価手法の構築 2022～2023年度・事業計画（実施内容とスケジュール）



□ 事業内容

- 水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築
 - 圧縮水素燃料使用の水素燃料電池船の標準安全評価（タンク配置・ベント位置の同等安全証明）
 - その他水素燃料使用の水素燃料電池船の標準安全評価（液化水素等のリスク評価）
- 新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築
 - コンテナ電源ハイブリッド船の標準安全評価（概念設計＋安全評価）
 - トリプル連結バージ輸送船の標準安全評価（概念設計＋安全評価）
 - 船内電化・省力化システムの検討（マテリアルハンドリング機搭載ガット船等）

2022年度				2023年度			
1/4半期	2/4半期	3/4半期	4/4半期	1/4半期	2/4半期	3/4半期	4/4半期
①水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築							
a.圧縮水素燃料FC船							
		b.その他水素燃料FC船		b.その他水素燃料FC船			
②新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築							
a.コンテナ電源ハイブリッド船							
b.トリプル連結バージ輸送船				水槽実験・連結強度			
				船内省力化システム(マテリアルハンドリング機搭載ガット船)			

図 1.1 本事業の概要

2. 水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築

2.1 概要

水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築を目的とし、衝突・漏洩シミュレーション等の詳細計算なしに対応できる安全評価手法の構築を検討した。

図 2.1 に実施内容の概要を示す。

2024年度の調査内容



- 水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築を目的とし、衝突・漏洩シミュレーション等の詳細計算なしに対応できる安全評価手法の構築を検討する。
- 国交省が作成した「水素燃料電池船の安全ガイドライン」に基づき水素燃料電池船の代替設計を行う際に、危険区域の設定についてIEC 60079-10-1「爆発性雰囲気で使用する電気機械器具—第10部：危険区域の分類」を活用することの妥当性を検証する。

報告内容

- ① IEC 60079-10-1の概要
- ② 本IEC規格を活用したケーススタディ
- ③ 拡散シミュレーションとIEC規格の適用

- ✓ IEC規格により示されている危険区域の詳細な設定方法を活用することによって、事業者による詳細なリスク評価を容易にでき、保安レベルを低下させることなく、精緻な危険区域の設定が可能となる。
- ✓ 水素燃料電池船を対象とした検討が可能である。
- ✓ 国際海事機関（IMO）が定める燃料電池発電設備を利用する船舶の安全ガイドライン（Interim guidelines for the safety of ships using fuel cell power installations）において、ガイドラインの危険区域の分類を適用することが適当でない場合には、主管庁が認める場合に、IEC60079-10-1(2020)による危険場所の分類を適用することができることとされている。

図 2.1 2024 年度事業の実施内容概要

2.2 水素燃料電池船ガイドラインにおける IEC 規格活用の妥当性検証

「水素燃料電池船の安全ガイドライン」（2021年8月改訂）に基づき水素燃料電池船の代替設計を行う際に、危険区域の設定について IEC 60079-10-1 「爆発性雰囲気で使用する電気機械器具—第10部：危険区域の分類」を活用することの妥当性の検証を行った。

検証結果の概要を次に示す。また、調査結果を添付資料 2 に示す。

(1) 規格の構成

- 2020年に改訂された本IEC規格の構成と概要は下表の通りである（約110ページ）。

箇条	タイトル	概要
1	適用範囲	大気条件の基準値
2	引用規格	
3	用語及び定義	
4	一般事項	本規格の一般事項が記載されており、本規格を適用する場合は十分に理解しておく必要がある。
5	危険区域の分類の方法論	危険区域を分類する方法論であり、本規格を適用する場合は一読しておく必要がある。
6	可燃性物質の放出	危険区域を評価する際に重要となる放出率や放出源について記載されている。
7	換気（または空気の移動）及び希釈	本規格を用いて危険区域を評価する場合に必要となる換気及び希釈について記載されている。
8	ゾーンの種類	各ゾーンや放出源の等級についての説明がある。
9	ゾーンの範囲	ゾーンの範囲を評価する際の要点が記載されている。
10	文書化	評価結果を報告する際の要点が記載されている。
附属書A	危険区域の提示提案	推奨される記号やデータシートが例示されている。
附属書B	放出源の推定	危険区域を評価する際に必要となる放出率や放出源の計算方法について記載されている。
附属書C	換気指針	危険区域を評価する際に必要となる換気及び希釈の計算・評価方法について記載されている。
附属書D	危険区域の推定	ゾーンの決定方法や危険区域の距離を推定するための方法が記載されている。
附属書E	危険区域の分類の事例	いくつかの具体的な評価事例が紹介されている。
附属書F	危険区域の分類の概略的なアプローチ	評価手法がフローチャート形式で紹介されている。
附属書G	可燃性ミスト	本事業は水素ガスを対象としているため該当しない。
附属書H	水素	水素の基本特性が解説されている。
附属書I	ハイブリッド混合気体	本事業は水素ガスを対象としているため該当しない。
附属書J	危険区域の分類を支持する有用な式	希釈するための換気量や時間推定の数式が紹介されている。
附属書K	産業規則及び国家規格	主に欧米の規格がリスト化されている。

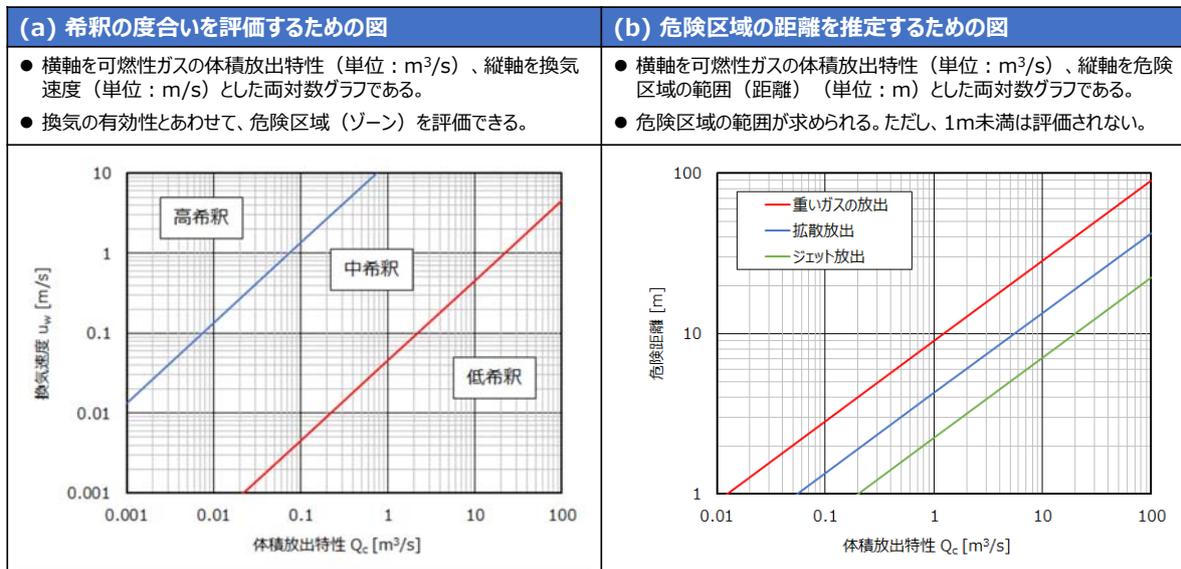
(2) 用語及び定義

- 下表に本IEC規格の英和対訳版及びJIS C 60079-10を参考として、本事業に関係する用語及び定義をまとめた。

No.	用語	定義
1	危険区域	機器の施工、設置及び使用に関する特別な予防措置が必要とされるような量のガス状の爆発性雰囲気が存在するか又は存在することが予想される区域
2	非危険区域	機器の施工、設置及び使用に関する特別な予防措置が必要とされるような量のガス状の爆発性雰囲気が存在することが予想されない区域
3	ゾーン	爆発性雰囲気の発生頻度及び継続時間に基づく危険区域の分類
4	ゾーン0	ガス状の爆発性雰囲気が連続的に、長期間、又は頻繁に存在する区域
5	ゾーン1	通常運転では、ときどきガス状の爆発性雰囲気が生じやすい区域
6	ゾーン2	通常運転では、ガス状の爆発性雰囲気が生じにくい、生じた場合、短時間だけ存在する区域
7	ゾーンの範囲	放出源からガス/空気混合気体が空気中で希釈される燃焼下限未満の濃度までの任意の方向の距離
8	ゾーンNE	着火が起こった場合、無視できる程度の結果をもたらすような無視できる範囲の可能なゾーン
9	放出源	可燃性ガス、蒸気、噴霧又は液体が大気中に放出され、ガス状の爆発性雰囲気が形成される箇所又は位置
10	放出の連続等級	連続的、頻繁に、又は長期間生じると予想される放出
11	放出の第1等級	通常運転中に周期的又はときどき生じることが予想される放出
12	放出の第2等級	通常運転では発生が予想されない放出、及び生じた場合、まれに短時間だけ生じる可能性がある放出
13	放出率	放出源からの単位時間当たりに放出される可燃性ガス、液、蒸気又はミストの量
14	換気	風、温度勾配又は人工的な手段（例えば、ファン又は抽出装置）の影響による空気の移動及び新鮮な空気への入れ換え
15	希釈	可燃性蒸気またはガスと空気との混合によって、時間とともに可燃性濃度を減少させること
16	バックグラウンド濃度	放出雲（ブルーム）またはジェットの外側で検討中の容積内の可燃性物質の平均濃度
17	自然着火温度(AIT)	指定された試験条件下で、空気又は空気-不活性ガスと混合した可燃性ガス又は蒸気の着火が生じる(表面)の最低温度
18	燃焼下限界(LFL)	下回るとガス状の爆発性雰囲気が形成されない大気中の可燃性ガス又は蒸気の濃度（防爆分野において“爆発下限界（LEL）”という用語は、同じ意味で使用される。）
19	危険区域の範囲	ガスと空気との混合ガスが空気によって希釈され燃焼下限界を下回る値になる箇所までの、放出源からあらゆる方向への距離（JIS C 60079）

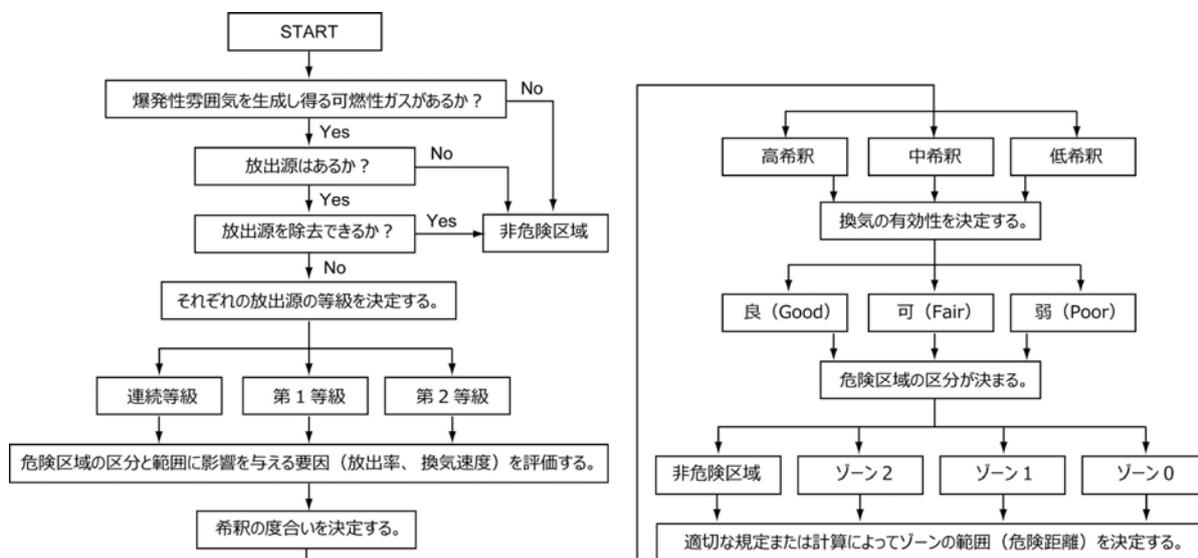
(3) 危険区域を評価・推定するための図表

- 本IEC規格の附属書D及び附属書Eには、危険区域を評価・推定するための図表が提示されている。



(4) 危険区域の分類の手順

- 放出源の等級や希釈の度合い、換気の有効性を判断して、危険区域を評価する。



危険区域の分類の手順

(1) 放出の特性

- 放出率（単位時間あたりに放出される可燃性ガス）は放出する圧力に依存する。
- 放出するガスの速度の算出式（音速、亜音速）が例示されている。
- 危険区域の評価に用いる体積放出特性 Q_c [m^3/s]は、ガスの体積流量 Q_g [m^3/s]を燃焼下限界LFL（水素の場合は4%=0.04）で除した値として定義される。

以下、本 IEC 規格に例示されているガスの放出率の算出方法を示す。臨界圧力 p_c は式(4.1)により求められる。

$$p_c = p_a \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\gamma / (\gamma - 1)} \quad (4.1)$$

ここで、 p_a は大気圧 (=101.3 kPa=101325 Pa)、 γ は断熱変化におけるポルトロープ指数であり、理想ガスの場合、次式を用いることができる。

$$\gamma = \frac{M c_p}{M c_p - R} \quad (4.2)$$

ここで、 M はガスのモル質量、 c_p はガスの定圧比熱、 R はガス定数 (=8.314 kJ/K·kmol) である。水素の場合、 $M=2$ kg/kmol、 $c_p=14.31$ kJ/kg·K (大気圧、20℃) であり、ポルトロープ指数は $\gamma=1.4$ となる。これらの数値を代入すると $p_c=192.4$ kPaが導かれる。

ガス容器内部（放出源）の圧力 p が臨界圧力 p_c より高い場合、放出するガスの速度 W_g [kg/s]は、理論上の最大放出速度である音速に等しくなり、式(4.3)により求められる。また、ガス容器内部（放出源）の圧力 p が臨界圧力 p_c より低い場合、放出するガスの速度として亜音速の近似式(4.4)が例示されている。

$$W_g = C_d S p \sqrt{\gamma \frac{M}{ZRT} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma + 1) / (\gamma - 1)}} \quad (4.3)$$

ここで、 C_d は放出開口部の特性を表す無次元の係数である。通常、鋭いオリフィスの場合は0.50~0.75、丸いオリフィスの場合は0.95~0.99となる。 S はガスが漏れる開口部（穴）の断面積 [m^2]であり、放出の第2等級における推奨値が表4.1に例示されている。 Z は無次元の圧縮率係数であり、理想的なガスでは1.0である。 p はガスの圧力 [Pa]、 T はガスの温度 [K]である。

$$W_g = C_d S p \sqrt{\frac{M}{ZRT} \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_c}{p} \right)^{(\gamma - 1) / \gamma} \right] \left(\frac{p_a}{p} \right)^{1 / \gamma}} \quad (4.4)$$

ガスの体積流量 Q_g [m^3/s]は式(4.5)より算出される。

$$Q_g = \frac{W_g}{\rho_g} \quad (4.5)$$

ここで ρ_g はガスの密度 [kg/m³]であり、周囲温度 T_a を用いて次式で求まる。

$$\rho_g = \frac{p_a M}{RT_a} \quad (4.6)$$

発生源の体積放出特性 Q_c [m^3/s]は、燃焼下限界 LFL を用いて、式(4.7)により求められる。なお、水素の場合、可燃範囲が4~77%であり、 LFL は4% (=0.04)である。

$$Q_c = \frac{W_g}{\rho_g \times LFL} = \frac{Q_g}{LFL} \quad (4.7)$$

放出の第2等級のための推奨穴断面積

項目の種類	項目	漏れに対する検討事項		
		放出開口部が拡大しない条件の代表値	放出開口部が拡大可能な条件の代表値 (例：浸食)	放出開口部が深刻な故障まで拡大可能な条件の代表値 (例：吹き出し)
		S [mm ²]	S [mm ²]	S [mm ²]
固定部分のシール要素	圧縮されたファイバガスケットまたは類似のフランジ	0.025以上 0.25以下	0.25を超え 2.5未満	2本のボルトの間の扇形面積×ガスケット厚さ 通常1mm以上
	らせん状に巻かれたガスケットまたは類似のフランジ	0.025	0.25	2本のボルトの間の扇形面積×ガスケット厚さ 通常0.5mm以上
	リングタイプ接合の接続部	0.1	0.25	0.5
	最大50mmの小口径の接続部※2	0.025以上 0.1以下	0.1を超え 0.25未満	1.0
低速度で動く部分のシール要素	バルブステムパッキン	0.25	2.5	機器製造業者のデータに従って定義する、ただし2.5mm ² 以上※4
	圧力逃がし弁※3	0.1×オリフィス断面積	NA	NA
高速度で動く部分のシール要素	ポンプ及びコンプレッサ	NA	1以上、5以下	機器製造業者のデータ等に従って定義する、ただし5mm ² 以上※4

※1：連続等級及び第1等級の場合、相当する穴の大きさは、放出オリフィスの大きさ及び形状によって定義される。

※2：リング接合部、ねじ接合部、圧縮接合部（金属製コンプレッションフィッティングなど）及び小口径配管の急速接合部（rapid joints）に推奨される。

※3：バルブの全開ではなく、バルブ部品の誤作動による様々な漏れを指す。

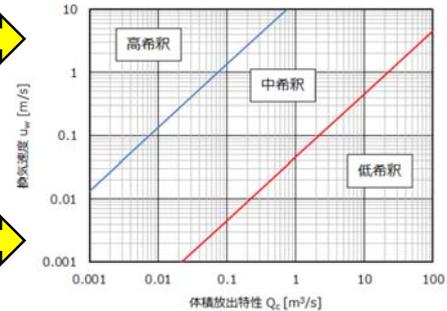
※4：予想される故障時の評価をするため、機器製造事業者の協力が必要となる。

(2) 換気速度と希釈の度合い

- 下表の屋外での換気速度の指標が例示されており、統計データを入手できない場合に使用する。
- 本IEC規格では、希釈の度合いが3種類に分類されており、希釈の度合いを評価するための図より評価される。

屋外での換気速度（空気よりも軽いガス）

地表からの 標高	障害物のない区域			障害物のある区域		
	2m以下	2mを超え 5m以下	5mを超え	2m以下	2mを超え 5m以下	5mを超え
換気速度 u_w	0.5 m/s	1 m/s	2 m/s	0.5 m/s	0.5 m/s	1 m/s



希釈の度合い

高希釈	放出源付近の濃度は、急速に低下し、放出が停止した後、実質的に持続性はない。
中希釈	濃度は制御され、安定したゾーン境界となるが、放出が進行中であり、放出が停止した後、ガス状の爆発性雰囲気は過度に持続することはない。
低希釈	放湿が進行中、かなりの濃度があり、放出が停止した後もガス状の爆発性雰囲気が持続する。

希釈の度合いを評価するための図

危険区域の推定計算

(3) 閉鎖空間のバックグラウンド濃度

- 閉鎖空間の強制換気を考える場合、次式に示すバックグラウンド濃度 X_b [vol/vol]による評価方法が例示されている。

$$X_b = \frac{f \times Q_g}{Q_g + Q_1} = \frac{f \times Q_g}{Q_2}$$

f : 換気非効率性を表す無次元数（理想的に濃度が均一となる場合は $f=1$ 、少し非効率な場合は $f=1.5$ 、非常に非効率な場合は $f=5$ ）

Q_g : ガスの体積流量 [m³/s]

Q_1 : 開口部から閉鎖空間に流入する空気の体積流量 [m³/s]

Q_2 : 閉鎖空間から流出するガスの体積流量 [m³/s]

- 閉鎖空間の強制換気を評価する場合、バックグラウンド濃度 X_b と可燃ガスの臨界濃度 X_{crit} を比較する。
- X_{crit} はLFL未満の任意の値であり、例えばガス検知器の警報発令濃度に設定する。

$X_b \ll X_{crit}$ を満たす場合



非常によく換気された閉鎖空間と評価され、屋外への放出に着目した評価ができる。

$X_b \ll X_{crit}$ を満たさない場合



放出源は低希釈と見なされる。

※ X_b と X_{crit} との大小関係の目安は明記されていない。評価者が任意の X_{crit} を設定できるため、その設定値によって結果が異なる。

※ 放出源近傍は可燃範囲となり得ること、可燃ガスの放出開始から警報発令あるいは可燃ガスの供給遮断までに時間差があることなどの留意事項があり、これらを考慮した適切な評価が必要である。

(4) 危険区域の推定

- 下表は、本IEC規格に例示されている換気状態及び放出の等級によるゾーンの指標を示しており、屋内区域及び開放区域のゾーンの種類を推定するために使用できる。
- 同表に示す換気の有効性は、3つのレベルが考慮される。

換気状態、放出の等級によるゾーンの指標

放出の等級	換気の効果						
	高希釈			中希釈			低希釈
	換気の有効性						
	良 Good	可 Fair	弱 Poor	良 Good	可 Fair	弱 Poor	良、可または弱
連続等級	非危険ゾーン0 NE	ゾーン2ゾーン0 NE	ゾーン1ゾーン0 NE	ゾーン0	ゾーン0 + ゾーン2	ゾーン0 + ゾーン1	ゾーン0
第1等級	非危険ゾーン1 NE	ゾーン2ゾーン1 NE	ゾーン2ゾーン1 NE	ゾーン1	ゾーン1 + ゾーン2	ゾーン1 + ゾーン2	ゾーン1 または ゾーン0
第2等級	非危険ゾーン2 NE	非危険ゾーン2 NE	ゾーン2	ゾーン2	ゾーン2	ゾーン2	ゾーン1 ゾーン0と同等

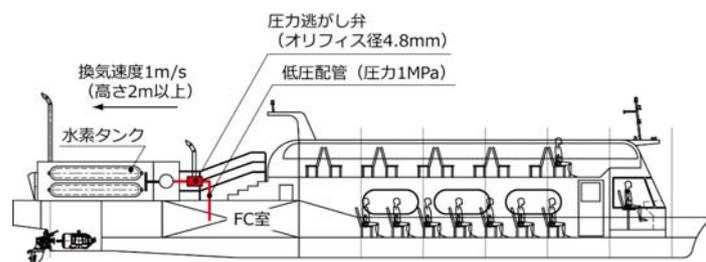
換気の有効性

良 Good	換気は、事実上、継続的に行われている。
可 Fair	通常運転中に換気が行われることが予想される。不連続性は、まれに短時間発生する場合に認められる。
弱 Poor	換気は、公正または良好な規定を満たさないが、不連続性は長期間生じることはない。

本IEC規格を活用したケーススタディ

(1) 暴露甲板上の低圧配管の圧力逃がし弁

- 簡単な検討例として、水素燃料電池船の暴露甲板に低圧水素配管が設置されることを想定し、低圧水素配管に取り付けた圧力逃がし弁のケーススタディを行う。



水素燃料電池船の暴露甲板に設置した低圧水素配管

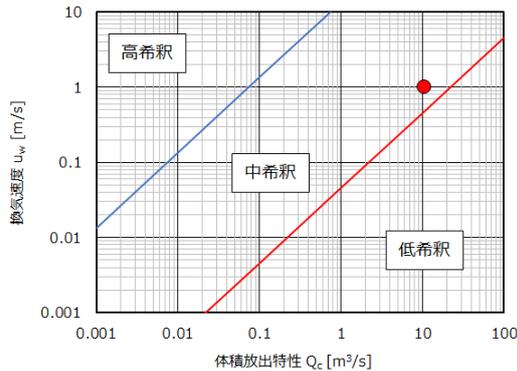
計算条件（一部抜粋）

項目	記号	条件・値	備考
オリフイス断面積		18.1 mm ²	オリフイス径4.8mmとして
開口部の断面積	S	1.81 mm ²	放出開口部が拡大しない条件として
放出源の圧力	p	1.0 MPa	
放出の等級		第2等級	バルブ破損による漏れ
放出開口部係数	C _d	0.99	丸いオリフイスとして
圧縮率係数	Z	1	理想的なガスとして
放出速度		音速	p > p _c のため式(4.3)を使用
ガスの放出率	W _g	0.0352 kg/s	式(4.1)～式(4.6)より算出
体積放出特性	Q _c	10.59 m ³ /s	式(4.7)より算出
位置		屋外	障害物がない区域
換気速度	u _w	1 m/s	標高2mを超えた障害物のない区域として
換気の有効性		良	

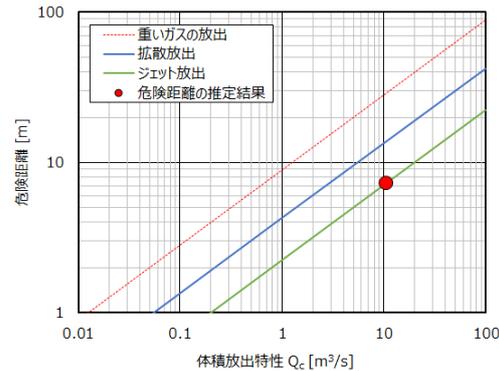
(1) 暴露甲板上の低圧配管の圧力逃がし弁

- 換気の有効性が良、放出の第2等級であることから、本ケーススタディはゾーン2と判断される。
- 危険距離は7.3 mとなる。一概に比較することは難しいが、本IEC規格を適用したケーススタディにおける危険区域の範囲は、水素燃料電池のガイドラインの要件（3m + 1.5m）と比べてやや拡大している。

項目	推定結果
希釈の度合い	中希釈
ゾーンの種類	ゾーン2
危険距離	7.3 m
機器グループ	IICまたはIIB+H ₂
温度分類	T1



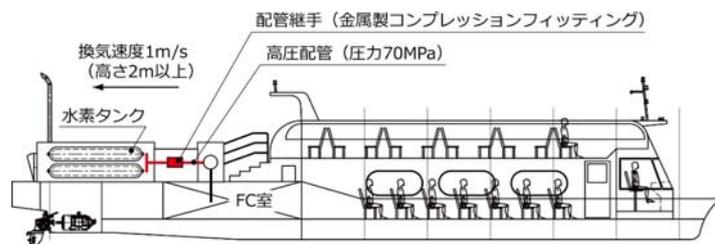
希釈の度合いの評価結果



危険距離の推定結果

(2) 暴露甲板上に設置した高圧燃料タンクの配管継手

- 水素燃料電池船の暴露甲板に高圧の水素燃料タンクが設置されることを想定し、燃料タンクに取り付けた配管継手（金属製コンプレッションフィッティング）のケーススタディを行う。



水素燃料電池船の暴露甲板に設置した高圧燃料タンク

計算条件（一部抜粋）

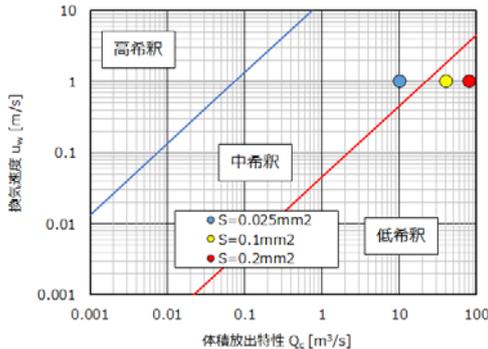
項目	記号	条件・値	備考
開口部の断面積	S	0.025~0.2 mm ²	表を参考にした計算パラメータ
放出源の圧力	p	70 MPa	
放出の等級		第2等級	バルブ破損による漏れ
放出開口部係数	C _d	0.99	丸いオリフィスとして
圧縮率係数	Z	1	理想的なガスとして
放出速度		音速	p > p _c のため式(4.3)を使用
位置		屋外	障害物がない区域
換気速度	u _w	1 m/s	標高2mを超えた障害物のない区域として
換気の有効性		良	

(2) 暴露甲板上に設置した高圧燃料タンクの配管継手

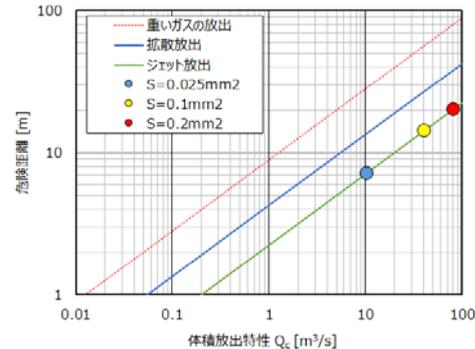
- 本IEC規格には、可燃性ガスの漏れを評価するための推奨穴断面積が明記されているため、評価が容易である。
- しかし、計算条件によって評価結果が大きく異なるので注意する必要がある。

推定結果のまとめ

開口部の断面積S	0.025 mm ²	0.1 mm ²	0.2 mm ²
ガスの放出率	0.0341 kg/s	0.1363 kg/s	0.2726 kg/s
体積放出特性	10.24 m ³ /s	40.96 m ³ /s	81.91 m ³ /s
希釈の度合い	中希釈	低希釈	低希釈
ゾーンの種類	ゾーン2	ゾーン1 (ゾーン0と同等)	ゾーン1 (ゾーン0と同等)
危険距離	7.2 m	14.3 m	20.2 m



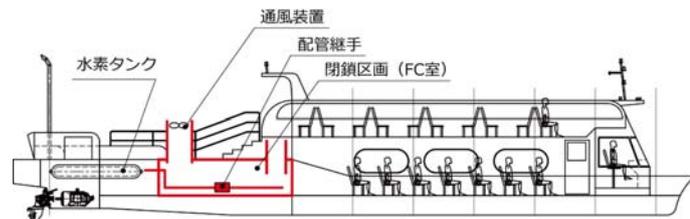
希釈の度合いの評価結果



危険距離の推定結果

(3) 通風装置を設置した閉鎖区画の検討例

- 通風装置を設置した閉鎖区画を想定し、閉鎖区画内の放出源を対象としたケーススタディを行う。
- バックグラウンド濃度 X_b と臨界濃度 X_{crit} の大小関係进行评估する。



通風装置を設置した閉鎖区画

計算条件 (一部抜粋)

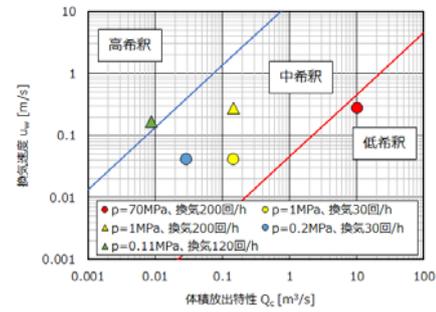
項目	記号	条件・値	備考
開口部の断面積	S	0.025mm ²	高性能配管継手の最小条件
放出源の圧力	p	0.11~70 MPa	計算結果を確認しながら適宜設定した計算パラメータ
放出の等級		第2等級	バルブ破損による漏れ
放出開口部係数	C _d	0.99	丸いオリフィスとして
圧縮率係数	Z	1	理想的なガスとして
放出速度		音速	p>p _c のため式(4.3)を使用
閉鎖空間の容積		32m ³	L×B×H=4×4×2 mを想定
換気回数		30~200回/h	計算結果を確認しながら適宜設定した計算パラメータ
換気の有効性		良	
臨界濃度	X _{crit}	0.008	LFL×20%として設定

(3) 通風装置を設置した閉鎖区画の検討例

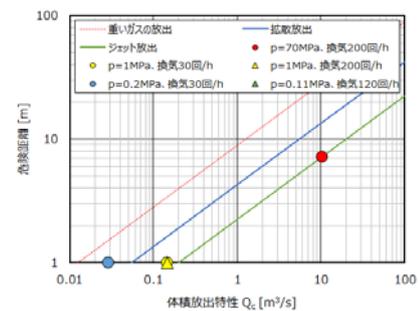
- この評価方法の適切性については判断が難しいが、閉鎖区画内の安全性は換気空気量の影響を大きく受け、ゾーンを引き下げる場合には通常的设计よりもかなり多くの換気を必要とすることがわかる。

推定結果のまとめ

ガス圧力p	70 MPa	1 MPa	1 MPa	0.2 MPa	0.11 MPa
換気回数	200回/h	30回/h	200回/h	30回/h	120回/h
ガスの放出率 W_g	0.0341 kg/s	0.0005 kg/s	0.0005 kg/s	0.0001 kg/s	0.0001 kg/s
体積放出特性 Q_g	10.239 m ³ /s	0.146 m ³ /s	0.146 m ³ /s	0.029 m ³ /s	0.009 m ³ /s
バックグラウンド濃度 X_b	0.164	0.018	0.0028	0.0037	0.0003
$X_b < X_{crit}$	NG	NG	OK	OK	OK
希釈の度合い (閉鎖空間)	低希釈	低希釈	中希釈	中希釈	高希釈
ゾーンの種類 (閉鎖空間)	ゾーン1 ゾーン0と同等	ゾーン1 ゾーン0と同等	ゾーン2	ゾーン2	非危険区域 ゾーン2NE
危険距離 (閉鎖空間)	7.2 m	1 m (計算値は0.9 m)	1 m (計算値は0.9 m)	1 m (計算値は0.4 m)	なし (計算値は0.4 m)



希釈の度合いの評価結果

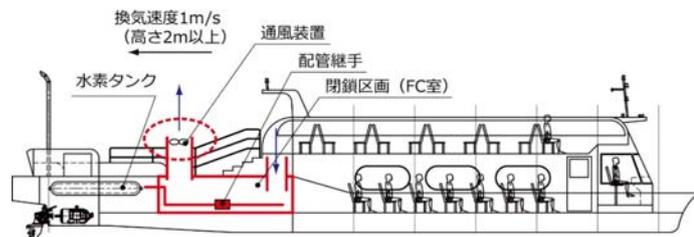


危険距離の推定結果

本IEC規格を活用したケーススタディ

(4) 閉鎖区画からの放出の検討例【参考】

- 通風装置を設置した閉鎖区画を想定し、閉鎖区画を強制換気している場合の大気放出を対象としたケーススタディを行う。
- 本検討は、本IEC規格に例示された解析ではない。



通風装置を設置した閉鎖区画と大気放出

計算条件 (一部抜粋)

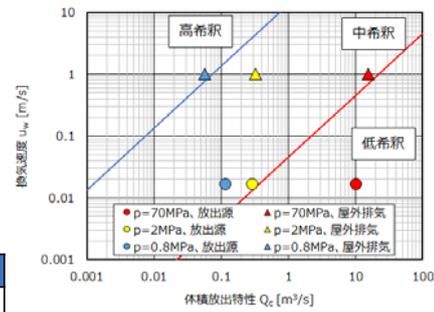
項目	記号	条件・値	備考
開口部の断面積	S	0.025mm ²	高性能配管継手の最小条件
放出源の圧力	p	0.8~70MPa	計算結果を確認しながら適宜設定した計算パラメータ
放出の等級		第2等級	バルブ破損による漏れ
閉鎖空間の容積		10m ³	L×B×H=2×2×2.5 mを想定
換気回数		30回/h	
換気の有効性		良	
換気速度 (閉鎖区画内)	u_w	0.0167m/s	換気の空気流量と閉鎖区画の断面積B×Hより算出
換気速度 (大気放出)	u_w	1m/s	標高2 mを超えた障害物のない区域
換気非効率性係数	f	1.5	少し非効率な場合を想定
臨界濃度	X_{crit}	0.008	LFL×20%として設定

(4) 閉鎖区画からの放出の検討例【参考】

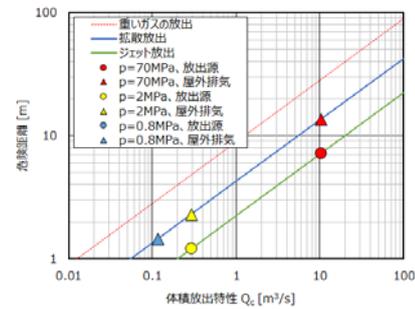
- 例えば、ガス圧力を0.8 MPaとした場合の大气放出は高希釈となり、非危険区域となる。
- 評価の妥当性については安全ガイドラインとの整合を含めて、より詳細な検討が必要である。

推定結果のまとめ

		ガス圧力p	70 MPa	2 MPa	0.8 MPa
閉鎖空間	ガスの放出率 W_g		0.03407 kg/s	0.00097 kg/s	0.00039 kg/s
	体積放出特性 Q_c		10.24 m ³ /s	0.293 m ³ /s	0.117 m ³ /s
	バックグラウンド濃度 X_b		1.246	0.185	0.080
	$X_b << X_{crit}$		NG	NG	NG
	希釈の度合い		低希釈	低希釈	低希釈
	ゾーンの種類		ゾーン1 ゾーン0と同等	ゾーン1 ゾーン0と同等	ゾーン1 ゾーン0と同等
大气放出	危険距離		7.2 m	1.2 m	1 m (計算値は0.8 m)
	体積放出特性 Q_c		15.64 m ³ /s	0.327 m ³ /s	0.057 m ³ /s
	希釈の度合い		中希釈	中希釈	高希釈
	ゾーンの種類		ゾーン2	ゾーン2	非危険区域 ゾーン2NE
	危険距離		13.6 m	2.3 m	なし (計算値は1.5 m)



希釈の度合いの評価結果

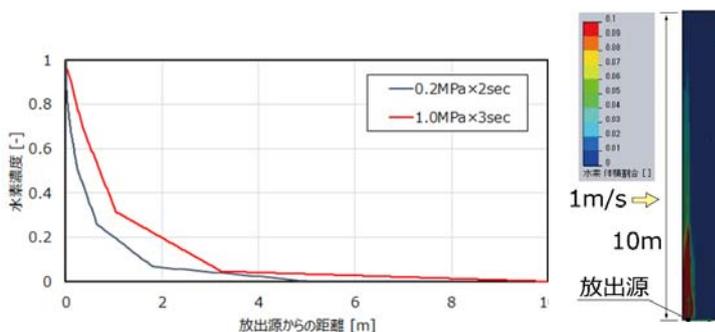


危険距離の推定結果

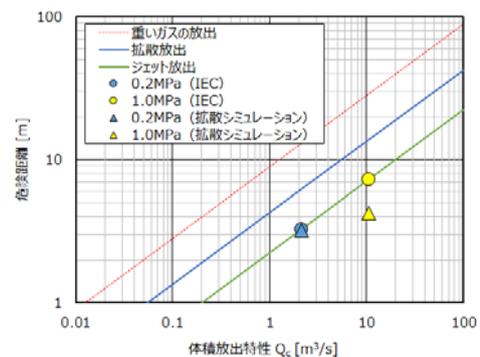
拡散シミュレーションとIEC規格の適用

(1) 拡散シミュレーションによる危険区域の範囲の計算

- 本IEC規格には、「危険区域の範囲を推定するための図に記載された基準の線は、様々な換気速度におけるCFD計算の結果に基づいており、信頼できる産業規則で規定された距離と比較されている」との記載がある。
- 市販のCFDソフトウェアでいくつかの計算を実施し、拡散シミュレーションの妥当性を確認する。



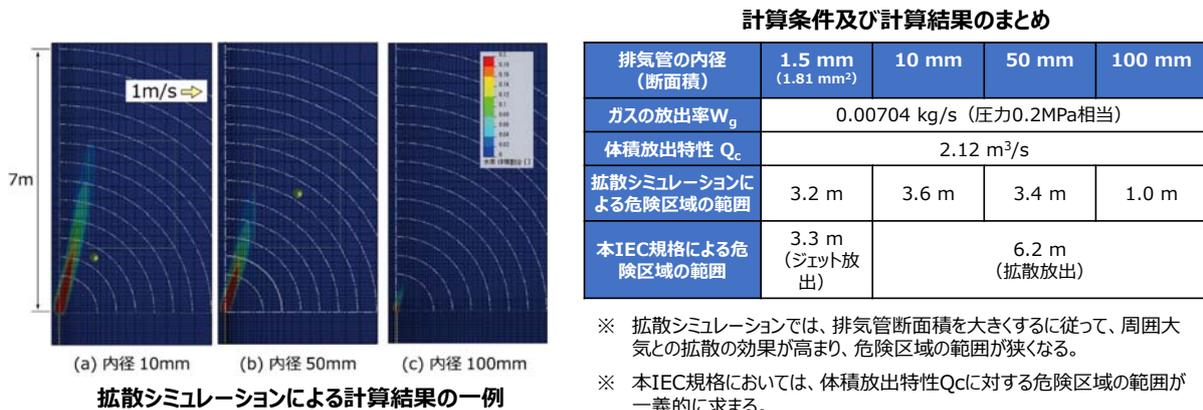
拡散シミュレーションの計算結果
(上記ケーススタディ(1)の条件)



危険距離の推定結果

(2) 拡散シミュレーションによるケーススタディ

- 通常運航時、高濃度の水素を大気に放出することは認められていない。しかし、不慮の事態が生じた場合、事故の影響を最小化するために水素を大気に放出することがあり得る。
- その際、水素の放出率を制御することや排気管の形状を任意に決めることができ、水素流出時の流速が変化する。
- 下図表は、そのような状況を想定して、拡散シミュレーションを行った結果である。



まとめ

- ① 本IEC規格を活用することによって、水素燃料電池船の設計やリスク評価を容易にすることができる。一方、本規格は規制緩和ではなく、評価によっては従来の規則よりも厳しくなることがある。これらの特徴を踏まえた上で、本IEC規格を活用することが重要である。
- ② 本IEC規格には、可燃性ガスの漏れを評価するための推奨穴断面積等が明記されているため、評価が容易になる。しかし、実際に使われる機器やシール要素との整合は明確ではなく、計算条件として与える推奨穴断面積によって評価結果が大きく異なるので注意する必要がある。
- ③ 設定条件の妥当性について、いくつかの曖昧な推定が含まれている。例えば、放出の等級や換気非効率係数は数値で決められていないため、評価者によって設定が異なることが起こり得る。
- ④ 本IEC規格に例示されている希釈の度合いを評価するための図並びに危険区域の距離を推定するための図には安全係数が含まれていないことに留意する必要がある。
- ⑤ 水素が漏れる可能性があっても、ガスの放出率を低下させる、あるいは換気速度を高めることなどによって、非危険区域となることがある。評価指標となることは間違いないが、水素燃料電池船の安全ガイドラインとの整合は不明確であり、引き続き検討が必要である。
- ⑥ CFDを用いた拡散シミュレーションは、危険区域を設定する際の有効なツールとなる。一方、拡散シミュレーションは、計算パラメータを適切に設定しないと誤った計算結果となるといった課題があり、評価者には、経験に基づく健全な工学的判断が要求される。
- ⑦ 本IEC規格には多くの注記が示されており、より詳細な情報が含まれている。また、評価者には、経験に基づく健全な工学的判断が要求される。本規格を十分に理解することが重要であり、本資料の計算例だけで評価するのは適切ではない。

3. 新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築

3.1 概要

トリプル連結バージ輸送船及び船内省力化システム（マテリアルハンドリング機導入ガット船の導入検討、ケミカルタンカー等の船内作業の電化・自動化のための課題整理）の検討を行った。

図 3.1 に実施内容の概要を示す。

内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全性評価手法の構築 新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築



①トリプル連結バージ輸送船

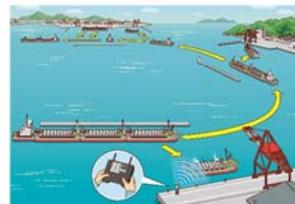
- ゼロエミ技術適用の制約ある199GT内航船について、トラック無人隊列走行を参考に連結バージの効率輸送によるGHG排出削減と自律バージの港内着岸をコンセプトとする「トリプル連結バージ輸送船」の実現に必要な安全評価を実施。



トリプル連結バージの水槽試験



欧州の自動運航バージ
(河川内の往復運航)



運航形態イメージ

②船内省力化システム

- マテリアルハンドリング機搭載ガット船の導入検討併せて、ケミカルタンカー等の船内作業の電化・自動化のための課題整理を実施。



内航船で主流のガット船



陸機で普及が進むマテリアル・ハンドリング機

図 3.1 新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築

3.2 トリプル連結バージ

3.2.1 トリプル連結バージの概要及びコンセプト

添付資料3にトリプル連結バージの概要及びコンセプトを示す。

3.2.2 水槽試験の実施

トリプル連結バージの次の性能を評価するため、水槽試験及びシミュレーション計算を実施した。その結果概要を添付資料4に示す。

- (1) 抵抗特性の評価
- (2) 規則波中の各運動性能及び連結部に作用する荷重の評価
- (3) 平水中の操縦運動性能の評価（シミュレーション計算）

3.2.3 船速及び必要馬力

トリプルバージについて、水槽試験結果に基づいて、バージの連結状態が異なる次の場合の船速及び必要馬力を推定した。

- (1) バージ3連結時の船速及び必要馬力
- (2) バージ2連結時の船速及び必要馬力
- (3) バージ1連結時の船速及び必要馬力

3.2.4 連結部の強度及び連結装置

水槽試験結果に基づいて、トリプル連結バージの連結部の必要強度を検討し、連結装置に関する提案を行った。その結果概要は、次のとおり。

複数のバージを長さ方向に機械連結装置で連結する場合、押し船に対してバージの長さが長くなるため、バージ間の連結荷重は大きくなってしまう。また、押し船と第1バージとの連結では、荷重は小さいため摩擦係止型も採用できるが、バージ間の連結では荷重が大きいため多段歯噛合型の採用となり、連結機の形式が変わることになるのでこれでは不都合である。したがって、押し船とバージ間、バージ間同士の連結でも、どちらでも連結できる多段歯噛合型連結装置とする必要がある。

3.2.5 一般配置図及び主要目

トリプル連結バージについて、2022年度に作成した概念設計図及び主要目表をベースに、水槽試験結果及びトリプル連結バージ勉強会等の議論を踏まえた事項（速力、馬力、バージ船尾形状、乾舷甲板高さ、舵面積等）を反映した完成一般配置図及び主要目表を作成した。

一般配置図のイメージを図3.2に示す。また、主要目を表3-1に示す。

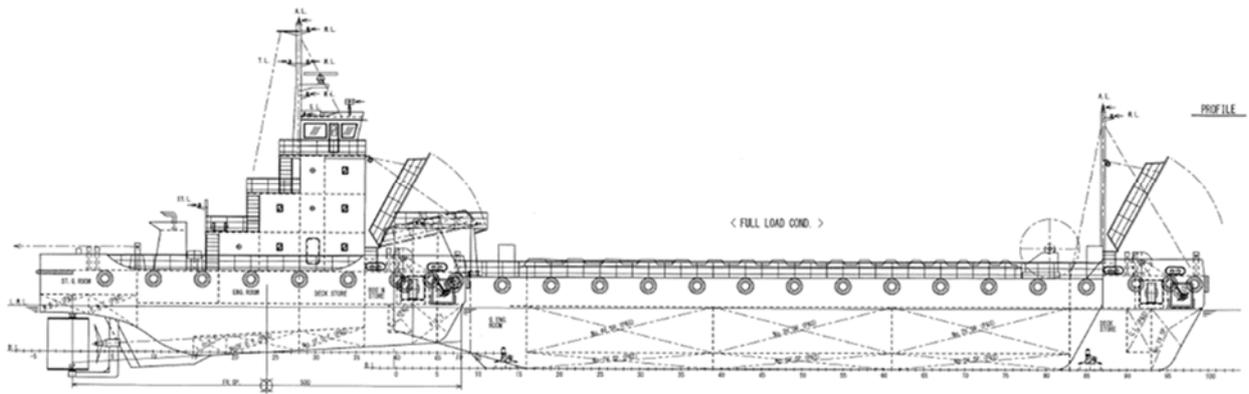


図 3.2 押船及びバージの一般配置図イメージ

	押船	バージ	押船+ バージ x1	押船+ バージ x2	押船+ バージ x3
全長	26.25m	49.90m	71.75m	117.20m	162.75m
垂線間長	24.00m	—	69.55m	115.00m	160.50m
幅	8.50m	10.00m	10.00m	10.00m	10.00m
深さ	5.00m	5.80m	5.80m	5.80m	5.80m
満載喫水	2.80m	3.75m	3.75m	3.75m	3.75m
総トン数	約 93 トン	約 198 トン	約 291 トン	約 489 トン	約 687 トン
載貨重量	—	約 850ton	約 850ton	約 1700ton	約 2550ton
航行区域	限定沿海	—	限定沿海	限定沿海	限定沿海
最大搭載人員	8人	—	—	—	—
主機	1330kW x 2	—	—	—	—
速力(15%SM)	—	—	10.61knots	10.06knots	9.31knots

表 3-1

3.2.6 自律運航バージの推進システム及び遠隔操縦システム

自律運航バージに適した推進器とその操船システム・構成機器を整理し、単独運航バージの操船方法並びに外部遠隔操船システムへの操縦権移行条件を検討した。

また、自律運航バージの遠隔操縦システムを試作し、模型実験及び実海域における簡易的な通信試験を実施した。

さらに、上記の模型実験及び実海域における簡易的な通信試験の結果を踏まえて、実証実験のための機器構成を詳細に検討し、自律運航バージの遠隔操縦システムに関する資料を作成した。本資料については、添付資料 5 に示す。

3.3 船内省力化システム

3.3.1 ガット船へのマテリアルハンドラー導入に関する技術資料の作成

陸上で普及が進むマテリアルハンドラーを導入するガット船（499トン又は749トン）をモデル船として、安全評価手法の構築に必要な次の検討を行った。これらの検討内容は、添付資料6に示す。

(1) マテリアルハンドラーの仕様

ガット船オーナーのニーズに基づいてマテリアルハンドラーに必要な条件を設定し、導入すべきマテリアルハンドラーの選定を進めた。検討の結果、海外で船舶に設置した実績あるゼネボーゲン社製マテリアルハンドラーを(2)以下の検討の対象とした。

(2) マテリアルハンドラー導入の課題と解決策

陸機として日本に導入された実績のあるゼネボーゲン社製実機の見学及び意見交換に基づいて、メンテナンスに関する事項（機関の換装期間、部品の供給体制など）、ガット操縦士から見たメリット等をまとめた。

(3) マテリアルハンドラーを導入したガット船の概念設計に関する資料

ゼネボーゲン社製マテリアルハンドラーを導入した499G/T、749G/T型ガット船の一般配置図及び主要目表を作成した。

(4) マテリアルハンドラーの遠隔操縦装置の概念設計に関する資料

将来のマテリアルハンドラーの遠隔化に資するため、建設機械の遠隔操縦装置をベースに、船舶での遠隔化に当たっての安全要件（逸脱防止、障害物検知、非常停止、操作停止など）を明確にするとともに、機器の構成及び通信方法を基本概念として示した。

3.3.2 ケミカルタンカー等の船内作業の電化・自動化

電化・自動化が困難とされる内航のケミカルタンカーなどの引火性液体をばら積み輸送する船舶（以下「ケミカルタンカー等」という。）をモデル船として、安全評価手法の構築に必要な次の検討を行った。これらの検討内容は、添付資料6に示す。

(1) ケミカルタンカー等の船内作業の作業分解

多くの工程が人の手で行われており、かつ船員の安全確保も急務であると判断する、バンカリング作業とタンククリーニング作業を作業分解した。

(2) ケミカルタンカー等の船内作業の合理化の検討

これらの課題の他、作業の合理化、安全性の確保を行う為に、電化・自動化などへの取り組みに対し、タンカー事業者を交えた勉強会にて作業の合理化、安全性の確保に関するアンケートを取りまとめた。船内作業において大きな課題、課題を解決する為に導入したいと思う機器、陸上で使われている機器や仕組みで導入したいものについて設問を設定した。それぞれ、労務負荷、作業簡素化などの意見があり、機器としてはタブレットの導入が求められていることがわかった。アンケート結果に基づき課題解決のアイデアについて検討し、タブレットの活用・荷役監視および操作モニターの活用・荷役作業における荷役ポンプの自動化による省力化について、資料をまとめた。

(3) ケミカルタンカー等の船内作業の電化・自動化の課題と解決策

各種機器の導入において、ケミカルタンカー等の場合、電子機器の導入には、防爆機器が必須となる為、防爆レベルについて調査し、耐圧防爆構造本質安全防爆構造、内圧防爆構造、安全増防爆構造の種類があり、荷役作業場所で必要な電気機器の設備要件について調査した。

荷役作業におけるタブレットの活用とタンククリーニング作業におけるタブレットと自動化設備の活用は、乗組員の安全、健康確保にも寄与されると想定する。

4. まとめ

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として、本年度、次を実施した。

(1) 水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築

- ・水素燃料電池船ガイドラインにおける IEC 規格活用の妥当性検証

(2) 新コンセプト船の代替設計のための安全評価手法の構築

① トリプル連結バージ

- ・トリプル連結バージの概要及びコンセプト
- ・トリプル連結バージの抵抗特性、運動性能、連結部に作用する荷重及び操縦運動性能の評価等
- ・トリプル連結バージの推進システム及び遠隔操縦システムの模型実験及び実海域における簡易通信試験

② 船内省力化システム

- ・ガット船へのマテリアルハンドラー導入の課題整理
- ・マテリアルハンドラーを導入したガット船の概念設計
- ・マテリアルハンドラーの遠隔操縦装置の概念設計
- ・ケミカルタンカー等の船内作業の電化・自動化の課題整理

本事業は、2022年度からの2箇年事業で実施したものである。安全評価手法の構築により、内航カーボンニュートラルの実現に向けた環境整備の一助となれば幸いである。

添付資料 1

内航カーボンニュートラルに向けた新技術の

安全評価手法の検討委員会 名簿

2023年度 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検討委員会 委員名簿

2024/3/14現在

	氏名	勤務先	
委員長	1 平田 宏一	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 特別研究主幹	
委員	2 井原 智則	国立大学法人東京海洋大学 学術研究院 海洋電子機械工学部門 助教	
	3 佐野 将昭	国立大学法人広島大学 大学院先進理工系科学研究科 輸送・環境システムプログラム 海上輸送システム研究室 准教授	
	4 伊崎 朋康	独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構 共有船舶建造支援部長	
	5 迫 洋輔	日本小型船舶検査機構 業務部 検査検定課 課長	
	6 宮下 和哉	一般財団法人日本海事協会 技術部 主任	
	7 三好 良	川崎汽船株式会社 GHG削減戦略グループ GHG削減戦略チーム長	
	8 土澤 基直	株式会社商船三井 技術部 プロジェクトリーダー	
	9 小林 裕史	株式会社商船三井内航 環境安全管理部 アシスタントマネージャー	
	10 相澤 祐輔	日本郵船株式会社 工務グループ グリーン技術チーム	
	11 志水 栄一	一般社団法人日本造船工業会 技術・労務部長	
	12 山本 哲也	川崎重工株式会社 エネルギーソリューション&マリンカンパニー 船舶海洋ディビジョン 技術総括部 新事業推進部 部長	
	13 山元 康博	株式会社名村造船所 船舶海洋事業部 設計本部 技術開発センター長	
	14 中田 崇	三井E&S造船株式会社 設計部 開発グループ 主管	
	15 森本 晋介	三菱造船株式会社 マリンエンジニアリングセンター船舶技術部 計画1グループ ガス船計画チーム チーム統括	
	16 洲之内 満彦	一般社団法人日本中小型造船工業会 技術部長 兼 企画調査室長	
	17 日高 豊	佐伯重工業株式会社 取締役 設計部 部長 兼 装置開発事業部 部長	
	18 本瓦 誠	本瓦造船株式会社 代表取締役 社長	
	19 鈴木 隆男	一般社団法人日本船用工業会 技術部長	
	20 藤田 勝也	株式会社赤阪鐵工所 事業企画室 顧問	
	21 戸松 憲治	商船三井テクノトレード株式会社 新規ビジネス推進室 テクニカル・アドバイザー	
	22 徳本 学	ダイハツディーゼル株式会社 技術統括本部 技術知財企画室 主査	
	23 竹ノ子 祐二	ナカシマプロペラ株式会社 東京支店 営業グループ 次長	
	24 清河 勝美	ヤンマーパワーテクノロジー株式会社 特機事業部 システムエンジニアリング部 部長	
	25 藏本 由紀夫	吉祥海運株式会社 代表取締役	
	26 鈴木 英二郎	鈴与海運株式会社 代表取締役社長	
	27 大西 祥太郎	一般社団法人内航ミライ研究会 IoTグループ デジタルチーム長	
	28 西村 洋佑	一般財団法人日本造船技術センター 海洋技術部 技術課長	
	関係者	29 木村 新太	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 海洋リスク評価系 リスク解析研究グループ
30 工藤 潤一		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 海洋リスク評価系 リスク解析研究グループ	
関係 官庁	31 松本 友宏	国土交通省 海事局 海洋・環境政策課 技術企画室長	
	32 森吉 直樹	国土交通省 海事局 安全政策課 船舶安全基準室 補佐	
	33 岡井 功	国土交通省 海事局 検査測度課 統括船舶検査官	
	34 小田原 勝教	国土交通省 海事局 検査測度課 船舶検査官	
	35 児玉 敦文	国土交通省 中国運輸局海上安全環境部 首席海事技術専門官 (船舶検査官)	
	36 今岡 宏治	国土交通省 中国運輸局尾道海事事務所 次席海事技術専門官 (船舶検査官)	
	事務局	37 平原 祐	一般財団法人日本船舶技術研究協会 参与
		38 前田 崇徳	一般財団法人日本船舶技術研究協会 研究開発グループ長
39 井下 聡		一般財団法人日本船舶技術研究協会 研究開発グループ ユニット長	
40 長崎 智幸		一般財団法人日本船舶技術研究協会 研究開発グループ研究開発ユニット	

添付資料 2

水素燃料電池船の同等安全証明のための標準安全評価手法の構築
—水素燃料電池船ガイドラインにおける IEC 規格活用の妥当性検証—

「内航カーボンニュートラルの実現に向けた
新技術の安全評価手法の構築」事業

－水素燃料電池船ガイドラインにおける IEC 規格
活用のための資料－

2024 年 2 月

(国研)海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所

目次

1. まえがき	3
2. IEC 60079-10-1 の概要	4
2.1 規格活用の経緯	4
2.2 規格の構成	4
2.3 用語及び定義	6
2.4 危険区域を評価・推定するための図表	8
2.5 危険区域の分類の概略的なアプローチ	9
3. 水素燃料電池船の安全ガイドラインへの適用と課題	11
3.1 水素燃料電池船の安全ガイドラインにおける危険区域	11
3.2 安全ガイドラインに IEC 規格を適用する際の課題	14
4. 水素燃料電池船における危険区域の推定計算とケーススタディ	15
4.1 放出の特性	15
4.2 換気及び希釈の度合い	17
4.2.1 屋外換気速度	17
4.2.2 希釈の度合い	17
4.2.3 閉鎖空間のバックグラウンド濃度	18
4.3 危険区域の推定	19
4.4 危険区域の範囲の推定	19
4.5 ケーススタディ① ー暴露甲板上の低圧配管の圧力逃がし弁ー	21
4.6 ケーススタディ② ー暴露甲板上に設置した高圧燃料タンクの配管継手ー	24
4.7 ケーススタディ③ ー通風装置を設置した閉鎖区画の検討例ー	27
4.8 ケーススタディ④ ー閉鎖区画からの放出の検討例ー	31
4.8.1 強制換気を伴う場合の体積放出特性	31
4.8.2 計算条件	32
4.8.3 検討結果	33
5. 水素燃料電池船の拡散シミュレーションと IEC 規格の適用	36
5.1 拡散シミュレーションの概要	36
5.2 拡散シミュレーションによる危険区域の範囲の計算	36
5.3 拡散シミュレーションによるケーススタディ	38
5.3.1 水素の放出率の影響	38
5.3.2 排気管断面積の影響	40
5.4 まとめと課題	42
6. まとめ	43
参考文献	44

1. まえがき

世界的な脱炭素化が進む中、国内も 2050 年のカーボンニュートラル実現に向け官民をあげた取組みが進められている。外航海運については、既に国際海事機関で検討されているが、国内物流を支える内航海運については、検討がはじまったばかりであり、国土交通省の検討会・日本財団の ZERO EMISSION 2050 を受け、内航カーボンニュートラル実現の環境整備が今後進められる予定である。

環境整備の一つである安全基準は、外航大型船の条約基準をベースに内航船基準（小型船）の整備を進めているが、大型船前提の基準適用が困難なことを踏まえリスク評価、シミュレーション等により同等安全証明（安全評価）した場合は代替設計が可能となっている。しかしながら、カーボンニュートラル実現に向けた技術の導入実績が少ない中、内航船建造の小型造船所が安全評価を行うことは困難な状況にあり、499GT 級等の内航太宗船の代替燃料化のための新コンセプト船に必要な代替設計承認のための安全評価の実施はさらに困難な状況にある。

このため、（一財）日本船舶技術研究協会が実施する「内航カーボンニュートラルの実現に向けた新技術の安全評価手法の構築」事業においては、新コンセプト船である水素燃料電池船及びトリプル連結バージに関する技術資料の作成を行うことで、新技術の安全評価手法を構築し、もって内航カーボンニュートラルの実現に向けた環境整備の一助とすることを目的とする。

本報告書は、同事業における水素燃料電池船ガイドラインにおける IEC 60079-10-1 活用のための資料である。

国土交通省海事局が作成した「水素燃料電池船の安全ガイドライン」に基づき水素燃料電池船の代替設計を行う際に、危険区域の設定について IEC 60079-10-1 を活用することの妥当性を検証するため、以下の①～③を行う。

- ① 水素燃料電池船の安全ガイドラインに基づく安全対策を講じるにあたって、IEC 60079-10-1 を利用する場合の課題等を整理した資料の作成（第 3 章参照）
- ② IEC 60079-10-1 を利用する際に収集すべきデータ等を整理した資料の作成（第 4 章参照）
- ③ 拡散シミュレーション等によって危険区域を設定した事例に IEC 60079-10-1 を適用して危険区域を設定した場合の評価資料の作成（第 5 章参照）

2. IEC 60079-10-1 の概要

国際規格である IEC 60079-10-1 Edition 3.0 「Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres」(爆発性雰囲気－第 10-1 部：区域の分類－ガス状の爆発性雰囲気、以下本報告書では本 IEC 規格と称す) は、可燃性ガスまたは蒸気による危険が生じる可能性のある区域の分類に関する規格である。危険区域で使用する機器の適切な設計、構築、運用及び保守を補助するための基礎として使用することができる。

2.1 規格活用の経緯

本 IEC 規格は、2020 年に最新バージョンである Edition 3.0 に改訂された¹⁾。対応する国内規格としては JIS C 60079-10 : 2008 「爆発性雰囲気で使用使用する電気機械器具－第 10 部：危険区域の分類」²⁾が発行されているが、現時点では IEC 規格の最終バージョンに対応した改訂は行われていない。陸上分野においては、これらの規格を参照することによって、事業者によるリスク評価を支援し、安全レベルを低下させることなく、精緻な危険区域の設定を可能にするための検討がなされている^{3),4)}。

一方、船舶分野においては、IMO における燃料電池船ガイドライン策定作業において、最新バージョンである IEC 60079-10:2020 を適用した危険区域の分類が議論されている⁵⁾。

2.2 規格の構成

表 2.1 及び表 2.2 に本 IEC 規格の構成（目次）及び本事業に関連する概要を示す。

表 2.1 IEC 60079-10-1:2020（本文）の構成と概要

箇条	タイトル	概要
1	適用範囲	大気条件の基準値
2	引用規格	
3	用語及び定義	本報告書 2.3 節参照
4	一般事項	本規格の一般事項が記載されており、本規格を適用する場合は十分に理解しておく必要がある。
4.1	安全の原理	
4.2	危険区域の分類の目的	
4.3	可燃性物質を含む機器の内部	
4.4	爆発のリスクアセスメント	
4.5	壊滅的な故障	
4.6	要員の力量	
5	危険区域の分類の方法論	危険区域を分類する際の方法論であり、本規格を適用する場合は一読しておく
5.1	一般事項	

5.2	放出源法による分類	必要がある。
5.3	産業規則及び国家規格の使用	
5.4	簡易法	
6	可燃性物質の放出	危険区域を評価する際に重要となる放出率や放出源について記載されている。
6.1	一般事項	
6.2	放出源	
6.3	放出の形態	
7	換気（または空気の移動）及び希釈	本規格を用いて危険区域を評価する場合に必要となる換気及び希釈について記載されている。
7.1	一般事項	
7.2	換気的主要な種類	
8	ゾーンの種類	各ゾーンや放出源の等級についての説明がある。
8.1	一般事項	
8.2	放出源の等級の影響	
8.3	希釈の影響	
8.4	換気の有効性の影響	
9	ゾーンの範囲	ゾーンの範囲を評価する際の要点
10	文書化	評価結果を報告する際の要点が記載されている。
10.1	一般事項	
10.2	図面・データシート及び表	

表 2.2 IEC 60079-10-1:2020（付属書）の構成と概要

箇条	タイトル	概要
付属書 A	危険区域の提示提案	推奨される記号やデータシートが例示されている。
A.1	危険区域—ゾーンの望ましい記号	
A.2	危険区域の提案形状	
付属書 B	放出源の推定	危険区域を評価する際に必要となる放出率や放出源の計算方法について記載されている。一部を本報告書第 4 章で引用している。
B.1	記号	
B.2	放出の等級の例	
B.3	放出の等級の評価	
B.4	放出の集計	
B.5	穴の大きさ及び発生源の半径	
B.6	放出の形態	
B.7	放出率	
B.8	建物の開口部からの放出	

附属書 C	換気指針	危険区域を評価する際に必要となる換気及び希釈の計算・評価方法について記載されている。一部を本報告書第 4 章で引用している。
C.1	記号	
C.2	一般事項	
C.3	換気及び希釈の評価、並びに危険区域への影響	
C.4	換気配置及びアセスメントの例	
C.5	建物内での自然換気	
附属書 D	危険区域の推定	ゾーンの決定方法や危険区域の距離を推定するための方法が記載されている。一部を本報告書第 4 章で引用している。
D.1	一般事項	
D.2	ゾーンの種類の推定	
D.3	危険区域の範囲の推定	
附属書 E	危険区域の分類の事例	いくつかの具体的な評価事例が紹介されている。
E.1	一般事項	
E.2	事例	
E.3	危険区域の分類のケーススタディ事例	
附属書 F	危険区域の分類の概略的なアプローチ	評価手法がフローチャート形式で紹介されている。
附属書 G	可燃性ミスト	本事業は水素ガスを対象としているため該当しない。
附属書 H	水素	水素の基本特性が解説されている。
附属書 I	ハイブリッド混合気体	本事業は水素ガスを対象としているため該当しない。
附属書 J	危険区域の分類を支持する有用な式	希釈するための換気量や時間推定の数式が紹介されている。
附属書 K	産業規則及び国家規格	主に欧米の規格がリスト化されている。

2.3 用語及び定義

表 2.3 は、本 IEC 規格の英和对訳版の第 3 章及び JIS C 60079-10 : 2008 を参考とし、本事業に関係する用語及び定義をまとめたものである。

表 2.3 用語及び定義

No.	用語	定義
1	危険区域	機器の施工、設置及び使用に関する特別な予防措置が必要とされるような量のガス状の爆発性雰囲気が存在するか又は存

		在ることが予想される区域
2	非危険区域	機器の施工，設置及び使用に関する特別な予防措置が必要とされるような量のガス状の爆発性雰囲気が存在することが予想されない区域
3	ゾーン	爆発性雰囲気の発生頻度及び継続時間に基づく危険区域の分類
4	ゾーン 0	ガス状の爆発性雰囲気が連続的に，長期間，又は頻繁に存在する区域
5	ゾーン 1	通常運転では，ときどきガス状の爆発性雰囲気が生じやすい区域
6	ゾーン 2	通常運転では，ガス状の爆発性雰囲気が生じにくい，生じた場合，短期間だけ存在する区域
7	ゾーンの範囲	放出源からガス/空気混合気体が空気中で希釈される燃焼下限界未満の濃度までの任意の方向の距離
8	ゾーン NE	着火が起こった場合，無視できる程度の結果をもたらすような無視できる範囲の可能なゾーン
9	放出源	可燃性ガス，蒸気，噴霧又は液体が大気中に放出され，ガス状の爆発性雰囲気が形成される箇所又は位置
10	放出の連続等級	連続的，頻繁に，又は長期間生じると予想される放出
11	放出の第 1 等級	通常運転中に周期的又はときどき生じることが予想される放出
12	放出の第 2 等級	通常運転では発生が予想されない放出，及び生じた場合，まれに短時間だけ生じる可能性がある放出
13	放出率	放出源からの単位時間あたりに放出される可燃性ガス，液，蒸気又はミストの量
14	換気	風，温度勾配又は人工的な手段（例えば，ファン又は抽出装置）の影響による空気の移動及び新鮮な空気への入れ換え
15	希釈	可燃性蒸気またはガスと空気との混合によって，時間とともに可燃性濃度を減少させること
16	バックグラウンド濃度	放出雲（プルーム）またはジェットの外側で検討中の容積内の可燃性物質の平均濃度
17	自然着火温度 (AIT)	指定された試験条件下で，空気又は空気-不活性ガスと混合した可燃性ガス又は蒸気の着火が生じる(表面の)最低温度
18	燃焼下限界 (LFL)	下回るとガス状の爆発性雰囲気が形成されない大気中の可燃性ガス又は蒸気の濃度（防爆の分野において“爆発下限界 (LEL)” という用語は，同じ意味で使用される。）

19	危険区域の範囲	ガスと空気との混合ガスが空気によって希釈され燃焼下限界を下回る値になる箇所までの、放出源からあらゆる方向への距離（JIS C 60079）
----	---------	---

2.4 危険区域を評価・推定するための図表

本 IEC 規格の附属書 D 及び附属書 E には、危険区域を評価・推定するための図表が提示されている。図 2.1 は、希釈（換気）の度合いを表す図の例であり、横軸を可燃性ガスの体積放出特性（単位： m^3/s ）、縦軸を換気速度（単位： m/s ）とした両対数グラフである。図 2.2 は、危険区域の距離を推定する図の例であり、横軸を可燃性ガスの体積放出特性（単位： m^3/s ）、縦軸を危険区域の範囲（距離）（単位： m ）とした両対数グラフである。これらのグラフを作図することで、危険区域を評価・推定することとなる。

これらのグラフを作成するための前提条件や計算方法については、本報告書第 4 章「水素燃料電池船における危険区域の推定計算とケーススタディ」で詳細に述べる。

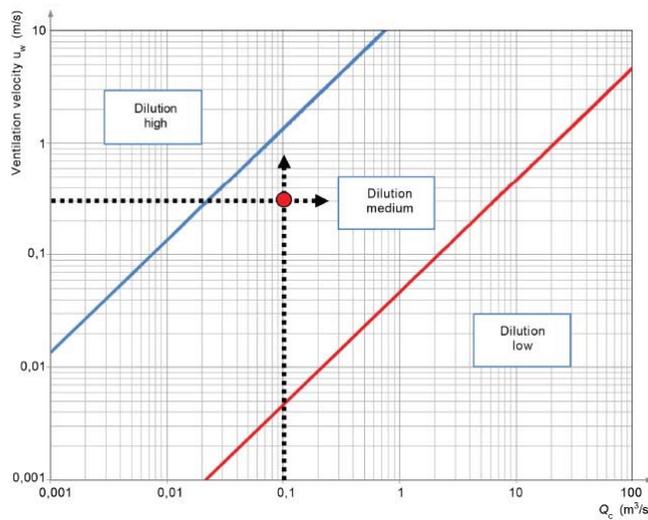


図 2.1 希釈（換気）の度合いを表す図の一例（IEC 60079-10-1 Edition 3.0）

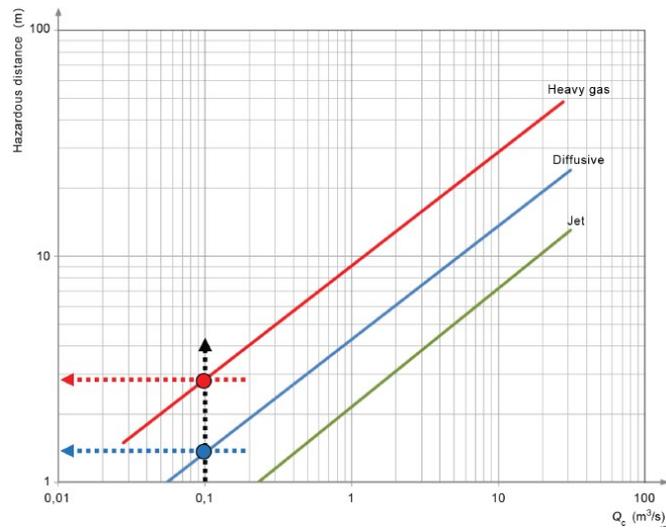


図 2.2 危険区域の範囲を推定する図の一例 (IEC 60079-10-1 Edition 3.0)

2.5 危険区域の分類の概略的なアプローチ

本 IEC 規格の附属書 F 及び JIS C 60079-10 の附属書 C 「危険区域分類の例」には危険区域を分類する際のフローチャートが示されている。図 2.3 は、それらを参照した危険区域の分類の手順を示している。

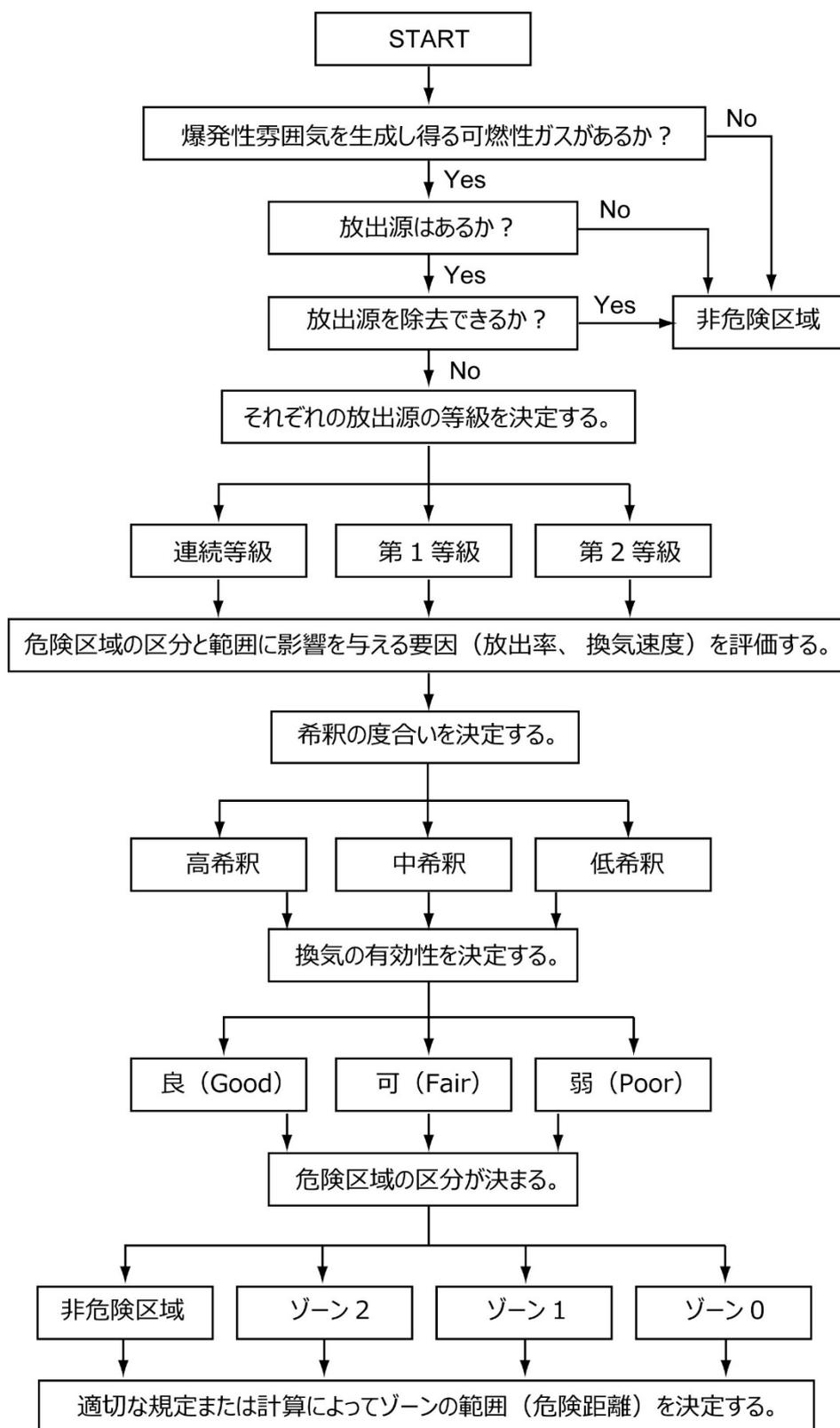


図 2.3 危険区域の分類の手順

3. 水素燃料電池船の安全ガイドラインへの適用と課題

本章は、水素燃料電池船の安全ガイドラインに基づく安全対策を講じるにあたって、IEC 60079-10-1 を利用する場合の課題等を整理した資料である。

3.1 水素燃料電池船の安全ガイドラインにおける危険区域

国土交通省が策定した「水素燃料電池船の安全ガイドライン」の第 12 章「防爆」や第 13 章「通風装置」には、危険区域（危険場所）についての要件が記載されている。表 3.1 及び表 3.2 に同ガイドラインにおける危険区域並びに通風装置に関連する記載をまとめておく。

表 3.1 水素燃料電池船の安全ガイドラインの関連要件
(第 12 章「防爆」より一部抜粋)

箇条	内容
12.4	危険場所
	12.4.1 一般 危険場所の分類は、爆発性ガス雰囲気形成される可能性のある場所を分析し分類する手段である。分類の目的は、これらの場所で安全に使用することができる電気機器を選択できるようにすることにある。水素漏洩が想定される周辺（燃料タンクが設置される区画及び燃料電池設置区画の排気口、安全弁開口部、未反応ガスの排出口等）には、発火源を設けてはならない。ただし、水素防爆機器は、発火源とみなされない。
	12.4.2 危険場所の分類 適切な電気機器の選択と適切な電気設備の設計を可能にするため、危険場所は、12.5 の規定に従って 0 種危険場所、1 種危険場所及び 2 種危険場所に分類される。なお、以下に規定される危険場所の範囲は、適切な数値シミュレーション、又は再現試験により得られた結果によって、緩和されることがある。
	12.4.3 通風用ダクト 通風用ダクトは、通風される場所と同一の危険場所に分類しなければならない。
12.5	危険場所の分類
	12.5.1 0 種危険場所 0 種危険場所には、燃料タンク、燃料タンクの圧力逃し装置又はその他のベント装置の配管、燃料管及び機器の内部を含む。
	12.5.2 1 種危険場所 1 種危険場所には次の区画又は区域等を含む。 (a) タンクコネクションスペース及び燃料タンクが設置される区画 (b) 燃料タンク排気口、ガスの排気口、バンカーマニホールド弁、その他の燃料弁、燃料管フランジの通風排気口及び少量のガスを放出する燃料タンク排気開口から 3m 以内の球形の開放甲板上の区域又は半閉鎖場所 (c) 燃料電池の排気空気及び排気ガス出口 (d) 1 種危険場所に通じるその他の開口から 1.5 m 以内の球形の開放甲板上の区域又は甲板上の半閉鎖場所 (e) 燃料電池設置区画 (f) 燃料管が取り付けられる閉鎖又は半閉鎖場所（例えば、燃料管を囲うダクト、半閉鎖バンカリングステーション） (g) ESD 保護機関区域は、正常運転中は非危険場所とみなせるが、ガス漏れ検知

	時は1種危険場所での使用が認定又は証明された機器が要求される。 (h) エアロックにより保護される区画は、正常運転中は非危険場所とみなせるが、保護された区画と危険場所との差圧が喪失した場合に使用される機器は、1種危険場所での使用が認定又は証明された機器が要求される。
	12.5.3 2種危険場所 2種危険場所には次の区画又は区域等を含む。 (a) 1種危険場所の外側1.5m以内の暴露甲板上の区域又は半閉鎖場所 (b) タンクコネクションスペースに通じるボルト締めハッチを有する区域 (c) エアロック
	12.5.4 通風用ダクトは、通風区域と同じ危険場所の分類とする。

表 3.2 水素燃料電池船の安全ガイドラインの関連要件
(第13章「通風装置」より一部抜粋)

箇条	内容
13.3	一般要件
13.3.1	危険場所における通風 通風装置は他の区画の通風装置から独立していなければならない。ただし、同一の目的であり、かつすべての区画から必要十分な流量が確保できる場合、通風装置を共通で使用することが認められる。
13.3.2	通風用ファンの電動機 電動機が通風される区画と同一の危険場所に対して承認されている場合を除いて、危険場所の通風用ダクトの内部に通風用ファンの電動機を設けてはならない。
13.3.4	通風装置の排出口 通風装置の排出口は、排出されたガスが発火する危険性がない場所に配置しなければならない。また、当該排出口には、13mmメッシュを超えない保護金網を備えなければならない。
13.3.5	閉鎖された危険場所の空気取入口 区画の給気口は、当該区画の排気口から可能な限り離れた場所に設け、区画内を十分に換気できるように考慮されていなければならない。 危険閉鎖場所の空気取入口は、当該空気取入口がない場合に非危険場所となる区域に設置しなければならない。閉鎖非危険場所の空気取入口は、危険場所の境界から少なくとも1.5m離れた非危険場所に設置しなければならない。空気取入ダクトがより危険性の高い危険場所を通過する場合、ダクトはガス密とし、通過する区画に対して加圧されなければならない。ただし、小型船舶にあつては、危険閉鎖場所の空気取入口は、危険度が当該危険場所と同一又はより低いと考えられる開放甲板に設けることができる。また、当該空気取入口から取り入れる空気中の水素ガス濃度が十分に低いことを確認する措置及び高濃度な水素ガスが検知された場合に当該区画内の通風装置や非防爆電気機器を停止する措置を講じ、かつ、当該空気取入口がない場合に当該空気取入口を設置する場所を危険場所に分類する要因となっている開口を可能な限り当該空気取入口より上方に配置する場合、危険度が当該危険場所より高い危険場所に空気取入口を設けることができる。なお、検査機関は、同等な安全性を確保することができる他の手段を認めることができる。
13.3.6	非危険場所からの排気口 非危険場所からの排気口は、非危険場所に設けなければならない。
13.3.7	閉鎖された危険場所の排気口 閉鎖された危険場所からの排気口は、その排気口が無い場合において、危険度がその場所と同一又はより低いと考えられる開放甲板に設けなければならない。ただし、小型船舶にあつては、当該排気口から空気が逆流した場合の空気中の水素濃度が十分に低いことを確認する措置及び高濃度な水素ガスが検知された場合に

	<p>当該場所の通風装置や非防爆電気機器を停止する措置を講じ、かつ、当該排気口がない場合に当該場所の危険度を上昇させる要因となっている開口を可能な限り当該排気口より上方に配置する場合、危険度が当該危険場所より高い危険場所に排気口を設けることができる。なお、検査機関は、同等な安全性を確保することができる他の手段を認めることができる。</p>
	<p>13.3.9 危険場所に通じる開口がある非危険場所 危険場所に通じる開口がある非危険場所には、エアロックを設けなければならない。また、危険場所よりも高い圧力を維持しなければならない。加圧のための通風装置は以下の要件に従い設備しなければならない。ただし、小型船舶にあっては、非危険場所を危険場所よりも高い圧力に維持することに加えて、当該開口から当該非危険場所に逆流する空気中の水素濃度が十分に低いことを確認する措置及び高濃度な水素ガスが検知された場合に当該危険場所の機器への水素供給を遮断する措置を講じ、かつ、当該非危険場所の他の開口や非防爆電気機器を当該開口より可能な限り下方に配置する場合、エアロックの設置を省略することができる。</p>
	<p>13.3.10 閉囲された危険場所に通じる開口がある非危険場所 閉囲された危険場所に通じる開口がある非危険場所は、エアロックを設けなければならない。かつ、危険場所は非危険場所に対して負圧状態を保持しなければならない。危険場所の排気式通風装置の運転状態は監視されなければならない。通風装置が故障した場合には、次の(a)及び(b)による。ただし、小型船舶にあっては、危険場所を非危険場所に対して負圧状態を保持することに加えて、当該開口から当該非危険場所に逆流する空気中の水素濃度が十分に低いことを確認する措置及び高濃度な水素ガスが検知された場合に当該危険場所の機器への水素供給を遮断する措置を講じ、かつ、当該非危険場所の他の開口や非防爆電気機器を当該開口より可能な限り下方に配置する場合、エアロックの設置を省略することができる。 (a) 常時人がいる場所に可視可聴警報を発しなければならない。 (b) 直ちに負圧状態を復元できない場合、非危険場所の電気設備は、検査機関が適当と認める規格に基づいて自動的に又はプログラムにより遮断されなければならない。</p>
13.4	タンクコネクションスペース
	<p>13.4.1 機械式強制通風装置 タンクコネクションスペースには、排気式の有効な機械式強制通風装置を設けなければならない。ただし、小型船舶にあっては、起動時に当該通風装置の周囲に水素ガス濃度が十分に低いことを確認する措置並びに高濃度な水素ガスが検知された場合に区画内の通風装置や非防爆電気機器を停止する措置又は区画内の機器への水素供給を区画内の水素濃度が爆発下限界濃度に達することのないように遮断する措置を講じている場合、非防爆型の給気式機械通風装置の使用が認められる。 この通風装置は、毎時 30 回以上の換気ができる容量をもたなければならない。爆発を保護するための他の適当な措置が講じられている場合には、換気能力を減らしても差し支えない。この場合、リスク評価によって同等性を検証しなければならない。</p>
13.5	機関区域
	<p>13.5.1 ガス燃料使用機器が設置される機関区域の通風装置 ガス燃料使用機器が設置される機関区域の通風装置は、原則として、その他のすべての通風装置から独立させなければならない。</p>
	<p>13.5.2 ESD 保護機関区域の通風装置 ESD 保護機関区域には、少なくとも毎時 30 回の換気容量を有する通風装置を設置しなければならない。通風装置は、区画全体を良好に空気循環できるものでなければならない。特に区画内における、いかなるガスポケットの形成も検知できるようにしなければならない。また、燃料電池及び区画内の水素防爆型の電気設備以外</p>

	の機器を起動する前に区画内を 5 回以上の換気をするように、インターロック機能により保護しなければならない。
13.6	二重管及びダクト
	<p>13.6.1 燃料配管を含む二重管及びダクト</p> <p>燃料配管を含む二重管及びダクトは、少なくとも毎時 30 回の換気容量を有する有効な排気式の機械通風装置を備えなければならない。ただし、9.6(a)の規定を満たす機関室の二重管には適用されない。ただし、小型船舶にあつては、起動時に当該通風装置の周囲に水素ガス濃度が十分に低いことを確認する措置並びに高濃度な水素ガスが検知された場合にダクトに備えられた通風装置や非防爆電気機器を停止する措置又は燃料配管への水素供給をダクト内の水素濃度が爆発下限界濃度に達することのないように遮断する措置を講じている場合、非防爆型の給気式機械通風装置の使用が認められる。</p>
	<p>13.6.3 通風装置の吸気口</p> <p>二重管又はダクトの通風装置の吸気口は、発火源から離れた非危険場所に配置しなければならない。開口部には、適当なワイヤメッシュの保護具を取り付けるとともに、水の浸入に対して保護されなければならない。</p>
	<p>13.6.4 通風装置の容量</p> <p>二重管又はダクトの通風装置は、流速 3m/s が確保される場合、毎時 30 回以下の容量として差し支えない。その流速は、燃料管及びその他の構成部品が取り付けられたダクトに対して、計算されなければならない。</p>

3.2 安全ガイドラインに IEC 規格を適用する際の課題

実際に水素燃料電池船の設計・建造を進める際、甲板上の危険区域が課題となることがある。特に小型の船舶においては、甲板上の広い範囲が危険区域となり、通風装置やハッチなどの開口部の配置が難しくなる。本 IEC 規格を適用することによって、甲板上の危険区域が拡大または縮小することがある。その際、本安全ガイドラインの要件と比べて、安全レベルの低下がないことを確認する必要がある。

本安全ガイドラインにおいては、通風装置の換気容量の要件が決められている。2.4 節で述べたように、本 IEC 規格は、換気速度に基づく評価を行うことができ、本安全ガイドラインの要件を満たさない通風装置の換気容量であっても搭載可能と判断されることがあり得る。そのような場合、本 IEC 規格を適用することによる評価結果が代替設計として成立するのかは、関係機関を含めて、しっかりと議論する必要がある。

以上を踏まえた上で、精緻な危険区域の設定を可能にする評価手法を検討することが重要である。

4. 水素燃料電池船における危険区域の推定計算とケーススタディ

本章は、IEC 60079-10-1 を利用する際に収集すべきデータ等を整理した資料であり、計算方法について概説した後、水素燃料電池船における危険区域の分類のケーススタディを行う。

4.1 放出の特性

放出の性質は、接合部の構成やシール要素など、放出源の物理的な特性に関連する。また、放出率（単位時間あたりに放出される可燃性ガス）は放出する圧力に依存し、可燃性ガス雲の大きさは、可燃性ガスの放出率及び希釈率によって決められる。以下、本 IEC 規格に例示されているガスの放出率の算出方法を示す。

臨界圧力 p_c は式(4.1)により求められる。

$$p_c = p_a \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\gamma/\gamma-1} \quad (4.1)$$

ここで、 p_a は大気圧 (=101.3 kPa=101325 Pa)、 γ は断熱変化におけるポルトローブ指数であり、理想ガスの場合、次式を用いることができる。

$$\gamma = \frac{M c_p}{M c_p - R} \quad (4.2)$$

ここで、 M はガスのモル質量、 c_p はガスの定圧比熱、 R はガス定数 (=8.314 kJ/K・kmol) である。水素の場合、 $M=2$ kg/kmol、 $c_p=14.31$ kJ/kg・K (大気圧、20°C¹) であり、ポルトローブ指数は $\gamma=1.4$ となる。これらの数値を代入すると $p_c=192.4$ kPa が導かれる。

ガス容器内部（放出源）の圧力 p が臨界圧力 p_c より高い場合、放出するガスの速度 W_g [kg/s] は、理論上の最大放出速度である音速に等しくなり、式(4.3)により求められる。また、ガス容器内部（放出源）の圧力 p が臨界圧力 p_c より低い場合、放出するガスの速度として亜音速の近似式(4.4)が例示されている。

$$W_g = C_d S p \sqrt{\gamma \frac{M}{ZRT} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (4.3)$$

ここで、 C_d は放出開口部の特性を表す無次元の係数である。通常、鋭いオリフィスの場合は 0.50~0.75、丸いオリフィスの場合は 0.95~0.99 となる。 S はガスが漏れる開口部（穴）の断面積 [m²] であり、放出の第 2 等級における推奨値が表 4.1 に例示されている。 Z は無次元の圧縮率係数であり、理想的なガスでは 1.0 である。 p はガスの圧力 [Pa]、 T はガスの温度 [K] である。

¹ 本 IEC 規格の「1 適用範囲」において、大気条件に 101.3 kPa (1013 mbar) 及び 20°C を基準とすることが記されている。

$$W_g = C_d S p \sqrt{\frac{M}{ZRT} \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \left(\frac{p_a}{p} \right)^{1/\gamma}} \quad (4.4)$$

ガスの体積流量 Q_g [m³/s] は式(4.5)より算出される。

$$Q_g = \frac{W_g}{\rho_g} \quad (4.5)$$

ここで ρ_g はガスの密度 [kg/m³] であり、周囲温度 T_a を用いて次式で求まる。

$$\rho_g = \frac{p_a M}{RT_a} \quad (4.6)$$

発生源の体積放出特性 Q_c [m³/s] は、燃焼下限界 LFL を用いて、式(4.7)により求められる。
なお、水素の場合、可燃範囲が 4~77% であり、 LFL は 4% (=0.04) である。

$$Q_c = \frac{W_g}{\rho_g \times LFL} = \frac{Q_g}{LFL} \quad (4.7)$$

表 4.1 放出の第 2 等級^{*1}のための推奨穴断面積²

項目の種類	項目	漏れに対する検討事項		
		放出開口部が拡大しない条件の代表値	放出開口部が拡大可能な条件の代表値 (例: 浸食)	放出開口部が深刻な故障まで拡大可能な条件の代表値 (例: 吹き出し)
		S [mm ²]	S [mm ²]	S [mm ²]
固定部分のシール要素	圧縮されたファイバガスケットまたは類似のフランジ	0.025 以上 0.25 以下	0.25 を超え 2.5 未満	2本のボルトの間 の扇形面積 ³ × ガスケット厚さ 通常 1mm 以上
	らせん状に巻かれたガスケットまたは類似のフランジ	0.025	0.25	2本のボルトの間 の扇形面積 ⁴ × ガスケット厚さ 通常 0.5mm 以上
	リングタイプ接合の接続部	0.1	0.25	0.5
	最大 50mm の小口径の接続部 ^{*2}	0.025 以上 0.1 以下	0.1 を超え 0.25 未満	1.0
低速度で動く部分のシール要素	バルブステムパッキン	0.25	2.5	機器製造業者のデータに従って定義する、ただし 2.5mm ² 以上 ^{*4}
	圧力逃がし弁 ^{*3}	0.1 × オリフィス断面積	NA	NA

² 本 IEC 規格の付属書 B における Table B.1 を引用している。

³ 原文の "sector between two bolts" を扇形面積と訳した。

⁴ 同上

高速度で動く部分のシール要素	ポンプ及びコンプレッサ	NA	1以上、5以下	機器製造業者のデータ等に従って定義する、ただし5mm ² 以上 ^{※4}
<p>※1：連続等級及び第1等級の場合、相当する穴の大きさは、放出オリフィスの大きさ及び形状によって定義される。</p> <p>※2：リング接合部、ねじ接合部、圧縮接合部（金属製コンプレッションフィッティングなど）及び小口径配管の急速接合部（rapid joints）に推奨される。</p> <p>※3：バルブの全開ではなく、バルブ部品の誤作動による様々な漏れを指す。</p> <p>※4：予想される故障時の評価をするため、機器製造事業者の協力が必要となる。</p>				

4.2 換気及び希釈の度合い

換気指針については本 IEC 規格の付属書 C に記載されている。同規格では、閉鎖空間から空気が入り出る「換気」と可燃ガス雲が希薄になるメカニズムである「拡散」の概念を区別することが重要とされている。屋内状況（閉鎖空間）では換気の影響が大きく、屋外状況では周囲の空気流による拡散の影響が大きい。

4.2.1 屋外換気速度

表 4.2 は屋外での換気速度の指標であり、統計データを入手できない場合に使用する。

表 4.2 屋外での換気速度（空気よりも軽いガス）⁵

	障害物のない区域			障害物のある区域		
	2m 以下	2m を超え 5m 以下	5m 超え	2m 以下	2m を超え 5m 以下	5m 超え
換気速度 u_w	0.5 m/s	1 m/s	2 m/s	0.5 m/s	0.5 m/s	1 m/s

4.2.2 希釈の度合い

本 IEC 規格では、表 4.3 に示すように希釈の度合いを 3 種類に分類し、図 4.1 によって評価される⁶。同図の横軸は式(4.7)により求まる発生源の体積放出特性 Q_c [m³/s]、縦軸は換気速度 u_w [m/s] である。

表 4.3 希釈の度合い

高希釈	放出源付近の濃度は、急速に低下し、放出が停止した後、実質的に持続性はない。
中希釈	濃度は制御され、安定したゾーン境界となるが、放出が進行中であり、放出が停止した後、ガス状の爆発性雰囲気は過度に持続することはない。
低希釈	放湿が進行中、かなりの濃度があり、放出が停止した後もガス状の爆発性

⁵ 本 IEC 規格の付属書 C における Table C.1 の一部を引用している。

⁶ JIS C 60079-10 では、高換気度、中換気度、低換気度と記載されている。

雰囲気を持続する。

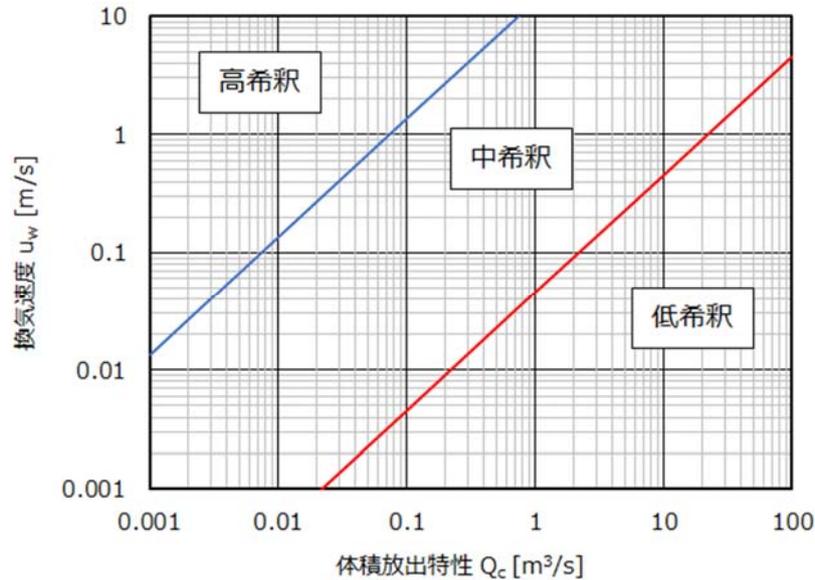


図 4.1 希釈の度合いを評価するための図⁷

4.2.3 閉鎖空間のバックグラウンド濃度

閉鎖空間の強制換気を考える場合、式(4.8)に示すバックグラウンド濃度 X_b [vol/vol] による評価方法が例示されている。

$$X_b = \frac{f \times Q_g}{Q_g + Q_1} = \frac{f \times Q_g}{Q_2} \quad (4.8)$$

ここで、 f は換気の実効性を表す無次元数であり、理想的に濃度が均一となる場合は $f=1$ 、少し非効率な場合は $f=1.5$ 、非常に非効率な場合は $f=5$ となる。 Q_1 は開口部から閉鎖空間に流入する空気の体積流量 [m³/s]、 Q_2 は閉鎖空間から流出するガスの体積流量 [m³/s]である。

閉鎖空間の強制換気を評価する場合、バックグラウンド濃度 X_b と可燃ガスの臨界濃度 X_{crit} を比較する。 X_{crit} は *LFL* 未満の任意の値であり、例えばガス検知器の警報発令濃度に設定する（水素の場合、*LFL* の 20%で警報発令する場合、 $X_{crit}=0.04 \times 0.02=0.008$ ）。

$X_b \ll X_{crit}$ を満たす場合、非常によく換気された閉鎖空間と評価され、屋外への放出に着目した評価ができる。この条件を満たさない場合、図 4.1 による評価は適切ではなく、放出源は低希釈と見なされる。

なお、 X_b と X_{crit} との大小関係の目安は明記されていない。評価者が任意の X_{crit} を設定できるため、その設定値によって結果が異なる。例えば、 X_{crit} を *LFL* の 20%とし、警報発令と同時に可燃ガスの供給を遮断することによって閉鎖空間から流出する可燃ガスの濃度が

⁷ 本 IEC 規格の付属書 C における Figure C.1 を参照し、作図している。

LFL を上回らない場合、条件を満たしていると判断できる。ただし、放出源近傍は可燃範囲となり得ること、可燃ガスの放出開始から警報発令あるいは可燃ガスの供給遮断までに時間差があることなどの留意事項があり、これらを考慮した適切な評価が必要である。

4.3 危険区域の推定

表 4.4 は、本 IEC 規格に例示されている換気状態及び放出の等級によるゾーンの指標を示しており、屋内区域及び開放区域のゾーンの種類を推定するために使用できるとされている。同表に示す換気の有効性は、表 4.5 に示す 3 つのレベルが考慮される。

すなわち、図 4.1 において、4.1 節の計算式と式(4.7)から発生源の体積放出特性 Q_c [m³/s] を横軸に、換気速度 u_w [m/s] を縦軸にプロットすることで希釈の度合いがわかる。そして、表 4.4 から危険区域のゾーンを導くことができる。

表 4.4 換気状態、放出の等級によるゾーンの指標⁸

放出の等級	換気の効果						
	高希釈			中希釈			低希釈
	換気の有効性						
	良 Good	可 Fair	弱 Poor	良 Good	可 Fair	弱 Poor	良、可または弱
連続等級	非危険 ゾーン 0 NE	ゾーン 2 ゾーン 0 NE	ゾーン 1 ゾーン 0 NE	ゾーン 0	ゾーン 0 + ゾーン 2	ゾーン 0 + ゾーン 1	ゾーン 0
第 1 等級	非危険 ゾーン 1 NE	ゾーン 2 ゾーン 1 NE	ゾーン 2 ゾーン 1 NE	ゾーン 1	ゾーン 1 + ゾーン 2	ゾーン 1 + ゾーン 2	ゾーン 1 または ゾーン 0
第 2 等級	非危険 ゾーン 2 NE	非危険 ゾーン 2 NE	ゾーン 2	ゾーン 2	ゾーン 2	ゾーン 2	ゾーン 1 ゾーン 0 と同等 ⁹

表 4.5 換気の有効性

良 Good	換気は、事実上、継続的に行われている。
可 Fair	通常運転中に換気が行われることが予想される。不連続性は、まれに短時間発生する場合に認められる。
弱 Poor	換気は、公正または良好な規定を満たさないが、不連続性は長期間生じることはない。

4.4 危険区域の範囲の推定

危険区域の範囲は図 4.2 によって評価できる。同図は様々な放出形態の危険区域の範囲を

⁸ 本 IEC 規格の付属書 D における Table D.1 を引用している。

⁹ 原文は” even Zone 0”

決定するための指針を表しており、3本の線が図示されている。それぞれの意味は表 4.6 に示す通りであり、適切な線を選択する。発生源の体積放出特性 Q_c [m³/s]を求めることによって、本図から危険区域の範囲（危険距離）を求めることができる。なお、同図の線の外挿は推奨されておらず、1 m 未満の危険距離は評価されない。

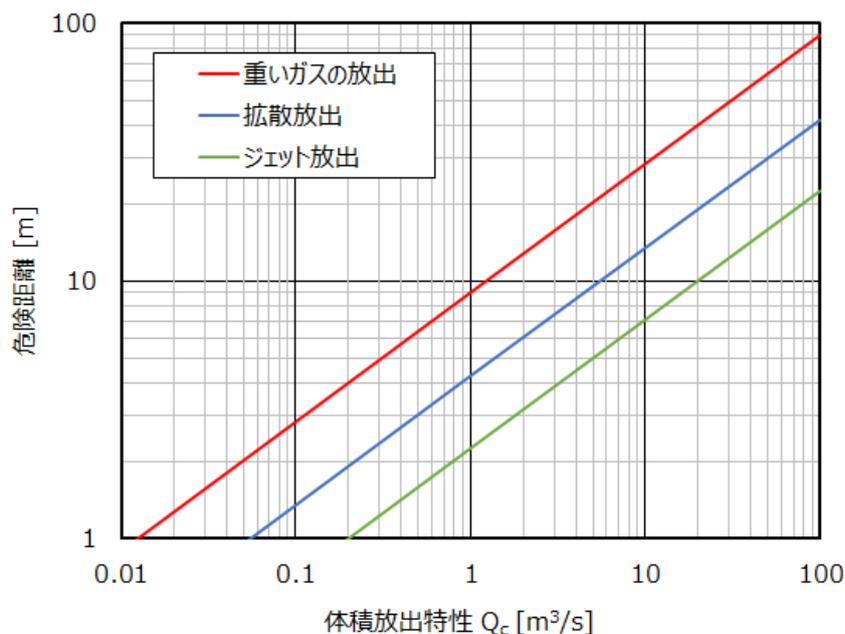


図 4.2 危険区域の距離を推定するための図¹⁰

表 4.6 放出形態

ジェット放出	妨げがない高速度のジェット放出（チョーク放出）
拡散放出	低速で拡散性ジェット放出（亜音速放出）、または放出近くのジェットの衝突によって運動量を失うジェット放出
重いガスの放出	地表などに沿って広がる重いガス

¹⁰ 本 IEC 規格の付属書 D における Figure D.1 を参照し、作図している。

4.5 ケーススタディ① –暴露甲板上の低圧配管の圧力逃がし弁–

簡単な検討例として、水素燃料電池船の暴露甲板に低圧水素配管が設置されることを想定し、低圧水素配管に取り付けた圧力逃がし弁のケーススタディを行う（図 4.3）。

表 4.7 に計算条件及び上記の計算式より求めたガスの放出率、体積放出特性をまとめている。図 4.4 及び図 4.5 は、これらの計算結果を希釈の度合いを評価するための図並びに危険区域の範囲を推定するための図にプロットしたものである。これより、本ケーススタディの希釈の度合いは中希釈と判断される。

また、換気の有効性が良、放出の第 2 等級であることから、表 4.4 より、本ケーススタディはゾーン 2 と判断される。さらに、図 4.5 より、危険距離は 7.3 m となる。これらの推定結果を表 4.8 にまとめている。

なお、水素燃料電池のガイドライン 12.5.2 項において、圧力逃がし弁は「その他の燃料弁」に相当すると考えられ、そこから 3 m 以内の球形の開放甲板上の区域がゾーン 1（1 種危険場所）となる。さらに、12.5.3 項より、1 種危険場所の外側 1.5 m 以内の暴露甲板上の区域がゾーン 2（2 種危険場所）となる。一概に比較することは難しいが、本 IEC 規格を適用したケーススタディにおける危険区域の範囲は、水素燃料電池のガイドラインの要件と比べてやや拡大している。すなわち、本 IEC 規格を活用することによって水素燃料電池船の設計やリスク評価を容易にすることができるものの、本規格は規制緩和にはならず、評価によっては従来の規則よりも安全サイドになることがある。

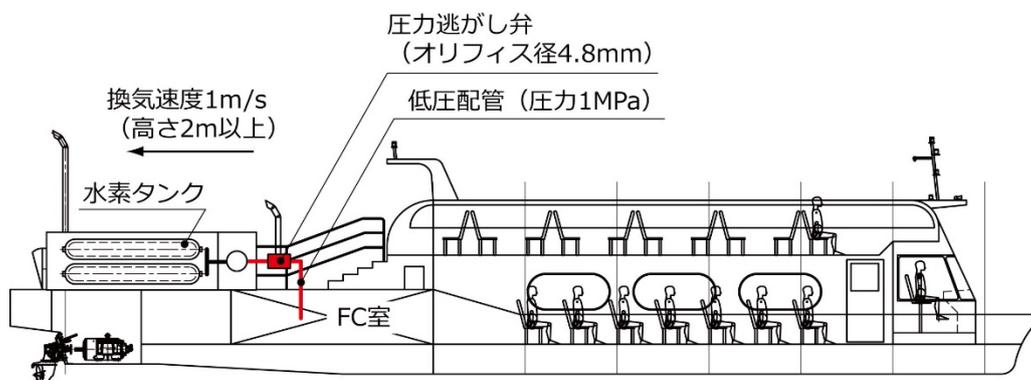


図 4.3 水素燃料電池船の暴露甲板に設置した低圧水素配管

表 4.7 計算条件（ケーススタディ①）

種別	項目	記号	条件・値	備考
放出の特性	可燃性物質		水素	
	モル質量	M	2 kg/kmol	水素の物性値
	燃焼下限界	LFL	4 vol%	水素の物性値
	自然着火温度	AIT	560°C	水素の物性値
	ガス密度	ρ_g	0.083 kg/m ³	大気条件、式(4.6)より

	臨界圧力	p_c	192.4 kPa	式(4.1)～式(4.2)より算出
	放出源		圧力逃がし弁	
	オリフィス断面積		18.1 mm ²	オリフィス径 4.8mm とし て
	開口部の断面積	S	1.81 mm ²	表 4.1 より、放出開口部が 拡大しない条件として
	放出源の圧力	p	1.0 MPa	
	放出の等級		第 2 等級	バルブ破損による漏れ
	放出開口部係数	C_d	0.99	丸いオリフィスとして
	圧縮率係数	Z	1	理想的なガスとして
	放出速度		音速	$p > p_c$ のため式(4.3)を使用
	ガスの放出率	W_g	0.0352 kg/s	式(4.1)～式(4.6)より算出
	体積放出特性	Q_c	10.59 m ³ /s	式(4.7)より算出
位置 の 特 性	位置		屋外	障害物がない区域
	周囲圧力	p_a	101.3 kPa	基準値
	周囲温度	T_a	20°C (293 K)	基準値
	換気速度	u_w	1 m/s	表 4.2 より、標高 2m を超 えた障害物のない区域とし て
	換気の有効性		良	表 4.5 参照

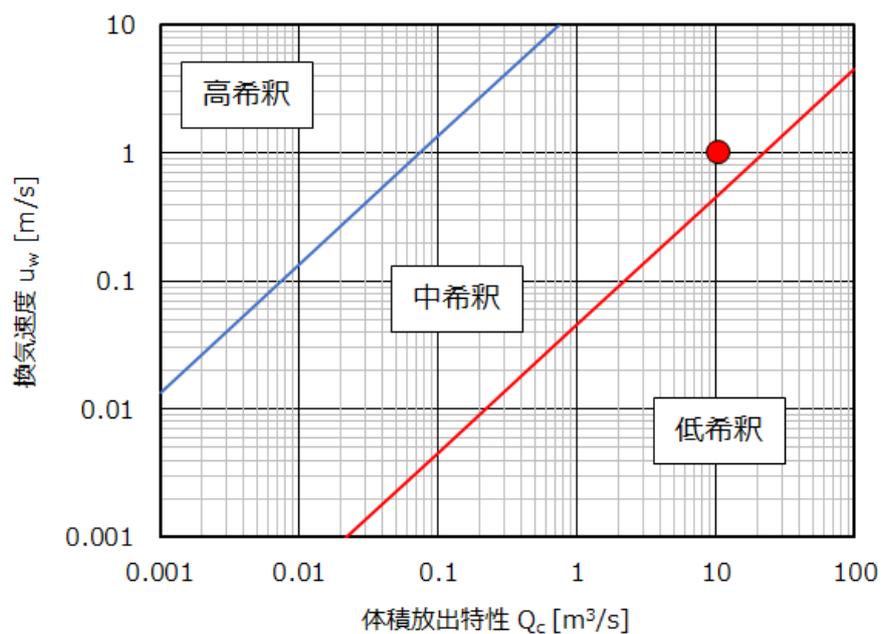


図 4.4 希釈の度合いの評価結果

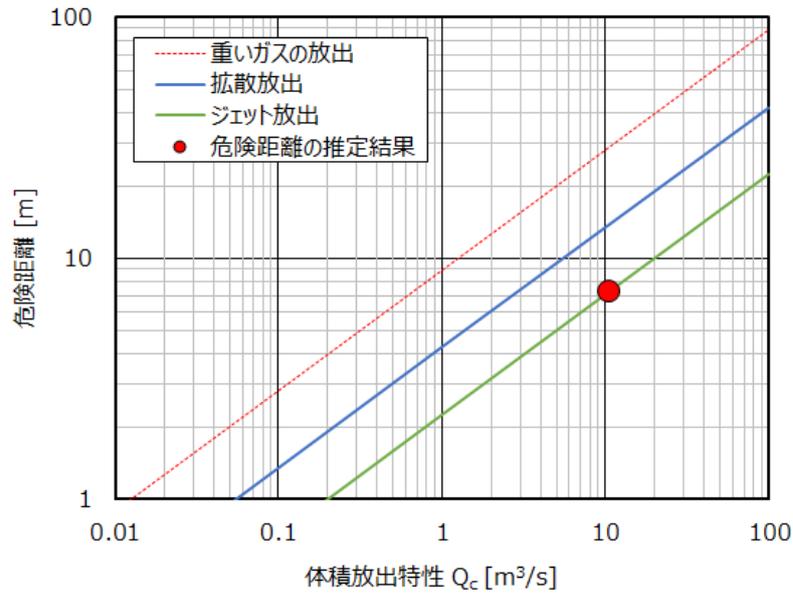


図 4.5 危険距離の推定結果

表 4.8 推定結果のまとめ (ケーススタディ①)

種別	項目	推定結果	備考
放出の 効果	希釈の度合い	中希釈	図 4.4 より
	ゾーンの種類	ゾーン 2	表 4.4 より
	危険距離	7.3 m	図 4.5 より、ジェット放出 として
	機器グループ	IIC または IIB+H ₂	
	温度分類	T1	

4.6 ケーススタディ② –暴露甲板上に設置した高圧燃料タンクの配管継手–

図 4.6 に示すように、水素燃料電池船の暴露甲板に高圧の水素燃料タンクが設置されることを想定し、燃料タンクに取り付けた配管継手（金属製コンプレッションフィッティング）のケーススタディを行う。

表 4.9 に計算条件をまとめている。金属製コンプレッションフィッティングは、表 4.1 において最大 50 mm の小口径の接続部に相当し、その開口部の断面積 S は、放出開口部が拡大しない条件では 0.025~0.1 mm²、浸食などによって放出開口部が拡大可能な条件では 0.1~0.25 mm² となる。以下、開口部の断面積 S を 0.025 mm²、0.1 mm²、0.2 mm² の 3 条件として計算する。

図 4.7 及び図 4.8 は、これらの計算結果を希釈の度合いを評価するための図並びに危険区域の範囲を推定するための図にプロットしたものである。これより、本ケーススタディにおいて、開口部の断面積 S を 0.025 mm² としたときの希釈の度合いは中希釈、開口部の断面積 S を 0.1 mm² 及び 0.2 mm² としたときの希釈の度合いは低希釈と判断される。これら 3 条件の推定結果を表 4.8 にまとめている。

本 IEC 規格には、可燃性ガスの漏れを評価するための推奨穴断面積が明記されているため、評価が容易である。しかし、実際の水素燃料電池船に使われる機器やシール要素との整合は必ずしも明確ではなく、計算条件として与える推奨穴断面積によって評価結果が大きく異なるので注意する必要がある。

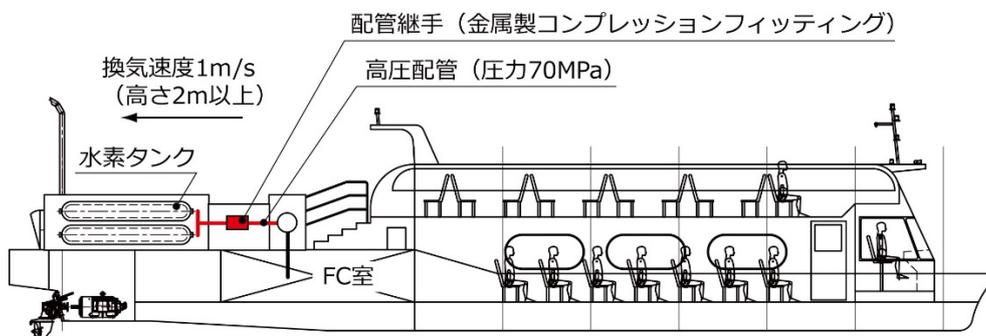


図 4.6 水素燃料電池船の暴露甲板に設置した高圧燃料タンク

表 4.9 計算条件（ケーススタディ②）

種別	項目	記号	条件・値	備考
放出の特性	可燃性物質		水素	
	モル質量	M	2 kg/kmol	水素の物性値
	燃焼下限界	LFL	4 vol%	水素の物性値
	自然着火温度	AIT	560°C	水素の物性値
	ガス密度	ρ_g	0.083 kg/m ³	大気条件、式(4.6)より
	臨界圧力	p_c	192.4 kPa	式(4.1)~式(4.2)より算出

	放出源		金属製コンプレッションフィッティング	
	開口部の断面積	S	(a) 0.025 mm ² (b) 0.1 mm ² (c) 0.2 mm ²	表 4.1 より
	放出源の圧力	p	70 MPa	
	放出の等級		第 2 等級	破損による漏れ
	放出開口部係数	C_d	0.99	丸いオリフィスとして
	圧縮率係数	Z	1	理想的なガスとして
	放出速度		音速	$p > p_c$ のため式(4.3)を使用
位置の特性	位置		屋外	障害物がない区域
	周囲圧力	p_a	101.3 kPa	基準値
	周囲温度	T_a	20°C (293 K)	基準値
	換気速度	u_w	1 m/s	表 4.2 より、標高 2m を超えた障害物のない区域として
	換気の有効性		良好	表 4.5 参照

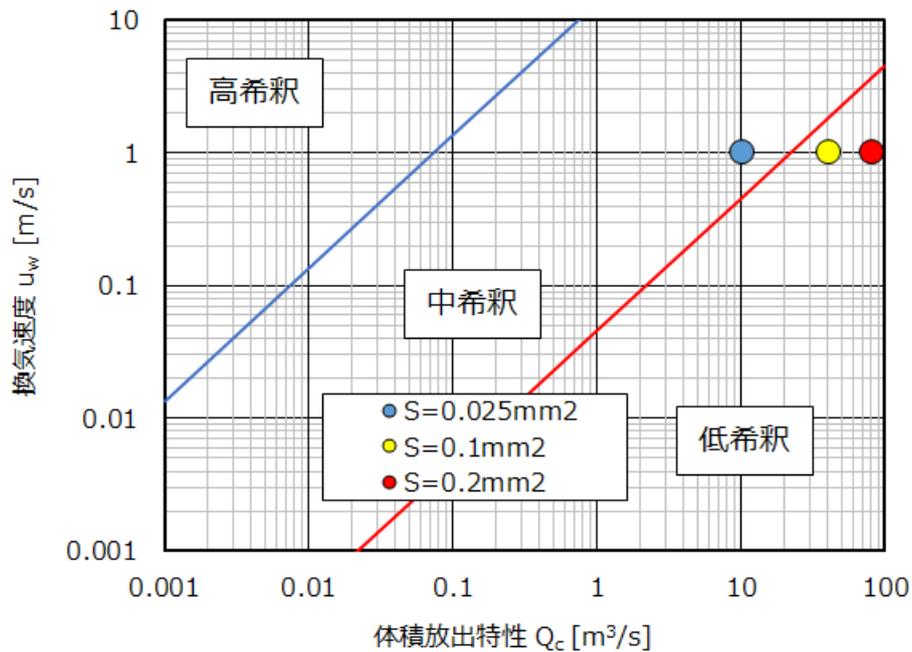


図 4.7 希釈の度合いの評価結果

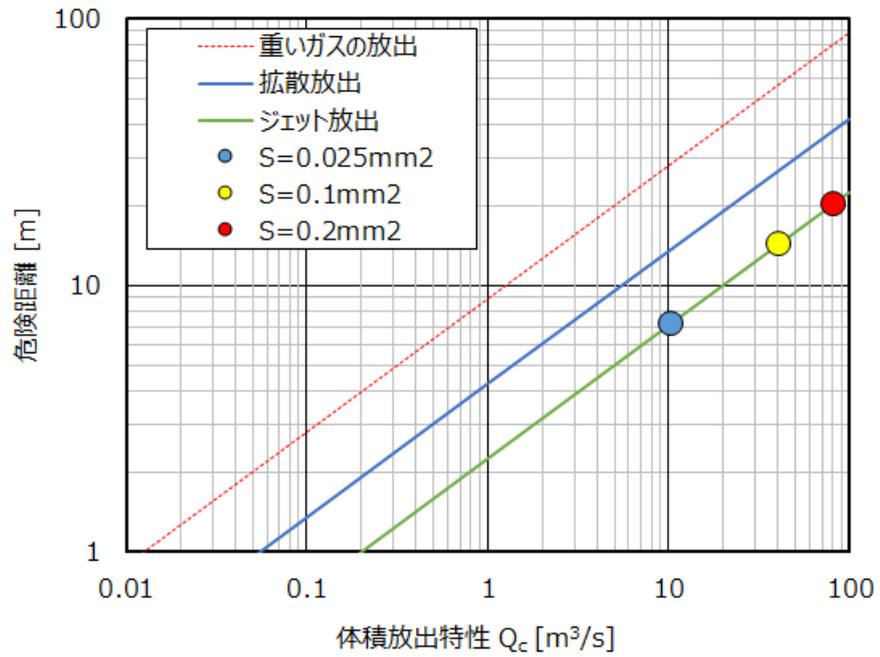


図 4.8 危険距離の推定結果

表 4.10 推定結果のまとめ (ケーススタディ②)

開口部の断面積 S	0.025 mm ²	0.1 mm ²	0.2 mm ²
ガスの放出率	0.0341 kg/s	0.1363 kg/s	0.2726 kg/s
体積放出特性	10.24 m ³ /s	40.96 m ³ /s	81.91 m ³ /s
希釈の度合い	中希釈	低希釈	低希釈
ゾーンの種類	ゾーン 2	ゾーン 1 (ゾーン 0 と同等)	ゾーン 1 (ゾーン 0 と同等)
危険距離	7.2 m	14.3 m	20.2 m
機器グループ	IIC または IIB+H ₂	IIC または IIB+H ₂	IIC または IIB+H ₂
温度分類	T1	T1	T1

4.7 ケーススタディ③ ー通風装置を設置した閉鎖区画の検討例ー

図 4.9 に示すように、通風装置を設置した閉鎖区画を想定し、閉鎖区画内の放出源を対象としたケーススタディを行う。

表 4.11 に計算条件をまとめている。放出源は高性能な配管継手とし、開口部の断面積 S を 0.025 mm^2 とする。また、ガス圧力 p と閉鎖区画の換気条件をパラメータとして様々な条件で計算する。

図 4.10 及び図 4.11 は、これらの計算結果を希釈の度合いを評価するための図並びに危険区域の範囲を推定するための図にプロットしたものである。また、5 条件の推定結果を表 4.12 にまとめている。なお、ガス圧力 p を 1 MPa 以下とした条件では危険距離が 1 m 未満と計算された。その場合、危険距離は最低限度の 1 m であると評価されるため、グラフのプロットも 1 m の位置となる。

ガス圧力を 70 MPa 、閉鎖空間を 200 回/h で換気した場合及びガス圧力を 1 MPa 、閉鎖空間を 30 回/h で換気した場合、バックグラウンド濃度 X_b と臨界濃度 X_{crit} の大小関係は $X_b \ll X_{crit}$ を満たさない。したがって、図 4.10 による評価は適切ではなく、放出源は低希釈と判断される。

ガス圧力を 1 MPa 、閉鎖空間を 200 回/h の換気とした場合及びガス圧力を 0.2 MPa 、閉鎖空間を 30 回/h の換気とした場合、バックグラウンド濃度 X_b と臨界濃度 X_{crit} の大小関係は $X_b \ll X_{crit}$ を満足する。これらの希釈の度合いは中希釈となり、ゾーン 2 となる。

ガス圧力を 0.11 MPa 、閉鎖空間を 120 回/h の換気とした場合、バックグラウンド濃度 X_b と臨界濃度 X_{crit} の大小関係は $X_b \ll X_{crit}$ を満足し、希釈の度合いは高希釈となり、非危険区域（ゾーン 2 NE）となる。

この評価方法の適切性については判断が難しいが、閉鎖区画内の安全性は換気空気量の影響を大きく受け、ゾーンを引き下げる場合には通常的设计よりもかなり多くの換気を必要とすることがわかる。

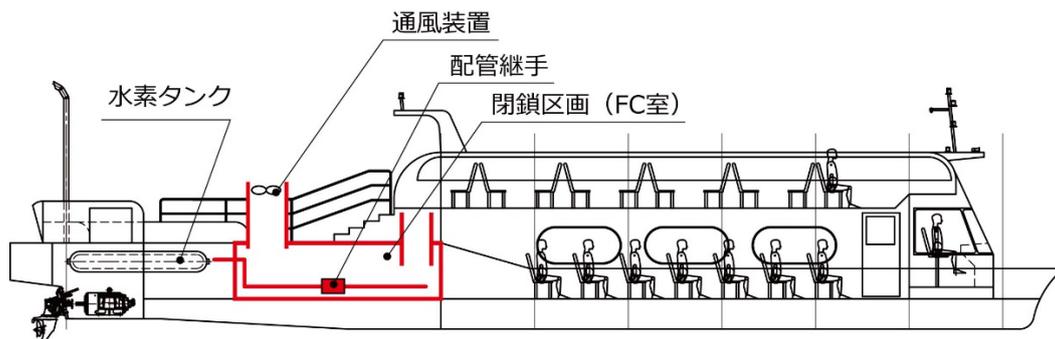


図 4.9 通風装置を設置した閉鎖区画

表 4.11 計算条件 (ケーススタディ③)

種別	項目	記号	条件・値	備考
放出の特性	可燃性物質		水素	
	モル質量	M	2 kg/kmol	水素の物性値
	燃焼下限界	LFL	4 vol%	水素の物性値
	自然着火温度	AIT	560°C	水素の物性値
	ガス密度	ρ_g	0.083 kg/m ³	大気条件、式(4.6)より
	臨界圧力	p_c	192.4 kPa	式(4.1)～式(4.2)より算出
	放出源		高性能配管継手	
	開口部の断面積	S	0.025 mm ²	表 4.1 より最小条件を設定
	放出源の圧力	p	0.11～70 MPa	計算結果を確認しながら適宜設定
	放出の等級		第 2 等級	破損による漏れ
	放出開口部係数	C_d	0.99	丸いオリフィスとして
	圧縮率係数	Z	1	理想的なガスとして
	放出速度		音速	$p > p_c$ のため式(4.3)を使用
閉鎖空間	閉鎖空間の容積		32 m ³	$L \times B \times H = 4 \times 4 \times 2$ m を想定
	換気回数		30～200 回/h	計算結果を確認しながら適宜設定
位置の特性	位置		閉鎖空間	障害物がない区域
	周囲圧力	p_a	101.3 kPa	基準値
	周囲温度	T_a	20°C (293 K)	基準値
	換気速度	u_w	—	換気の空気流量と閉鎖区画の断面積 $B \times H$ より換気速度を算出
	換気の有効性		良好	表 4.5 参照
	換気非効率性係数	f	1	理想的に濃度が均一となる場合を想定
	臨界濃度	X_{crit}	0.008	$LFL \times 20\%$ として設定

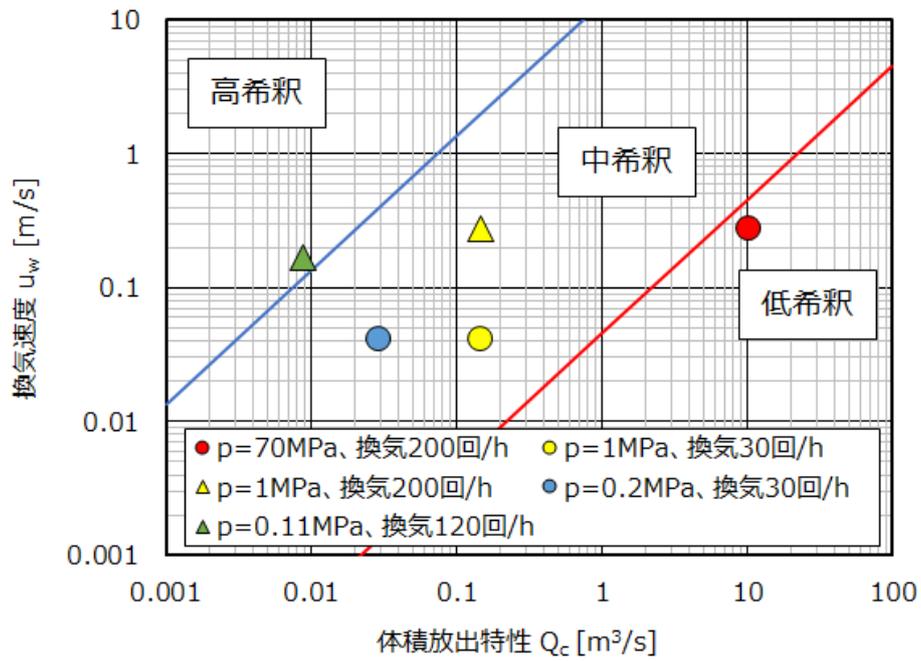


図 4.10 希積の度合いの評価結果

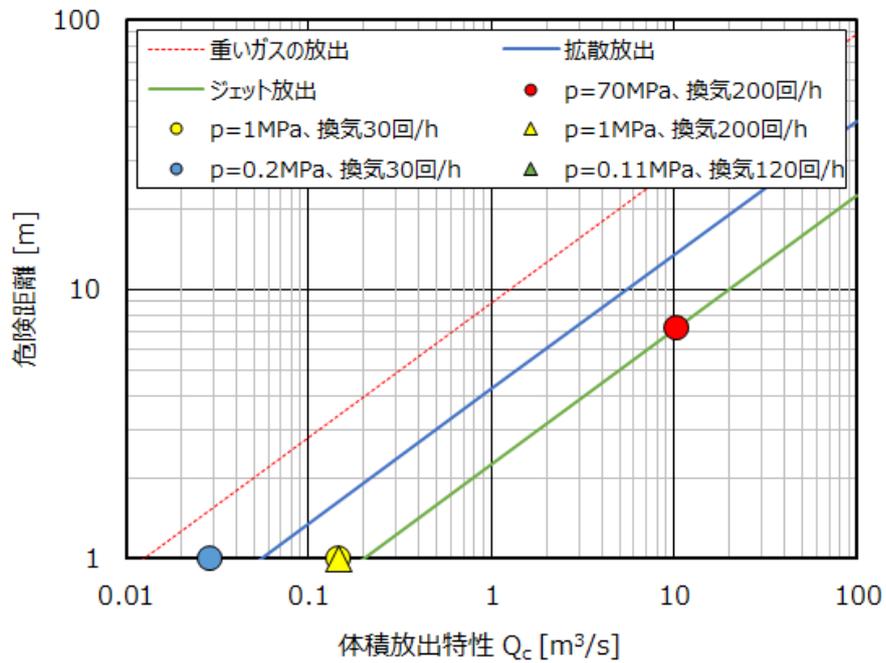


図 4.11 危険距離の推定結果

表 4.12 推定結果のまとめ (ケーススタディ③)

ガス圧力 p	70 MPa	1 MPa	1 MPa	0.2 MPa	0.11 MPa
換気回数	200 回/h	30 回/h	200 回/h	30 回/h	120 回/h
ガスの放出率 W_g	0.0341 kg/s	0.0005 kg/s	0.0005 kg/s	0.0001 kg/s	0.0001 kg/s
体積放出特性 Q_g	10.239 m ³ /s	0.146 m ³ /s	0.146 m ³ /s	0.029 m ³ /s	0.009 m ³ /s
バックグラウンド濃度 X_b	0.164	0.018	0.0028	0.0037	0.0003
$X_b \ll X_{crit}$	NG	NG	OK	OK	OK
希釈の度合い (閉鎖空間)	低希釈	低希釈	中希釈	中希釈	高希釈
ゾーンの種類 (閉鎖空間)	ゾーン 1 ゾーン 0 と 同等	ゾーン 1 ゾーン 0 と 同等	ゾーン 2	ゾーン 2	非危険区域 ゾーン 2NE
危険距離 (閉鎖空間)	7.2 m	1 m (計算値は 0.9 m)	1 m (計算値は 0.9 m)	1 m (計算値は 0.4 m)	なし (計算値は 0.4 m)

4.8 ケーススタディ④ –閉鎖区画からの放出の検討例–

図 4.13 に示すように、通風装置を設置した閉鎖区画を想定し、閉鎖区画を強制換気している場合の大気放出を対象としたケーススタディを行う。なお、以下に記す検討は、本 IEC 規格に例示された解析ではなく、本事業において独自に検討した内容である。

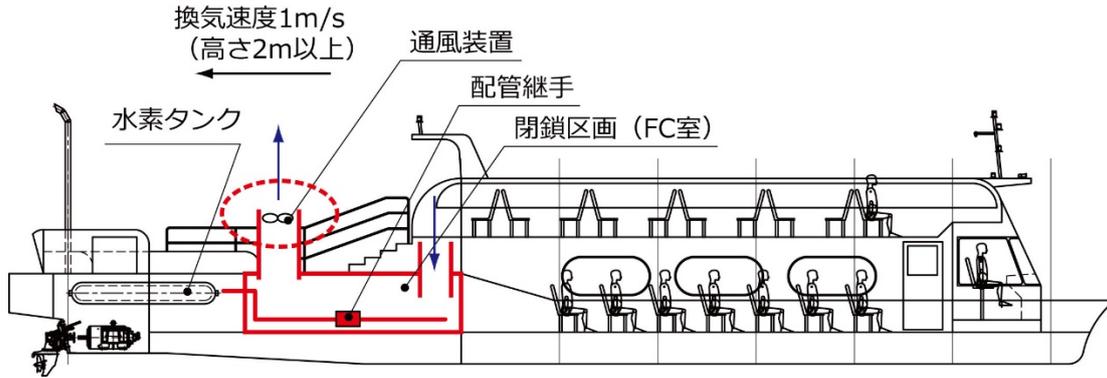


図 4.13 通風装置を設置した閉鎖区画と大気放出

4.8.1 強制換気を伴う場合の体積放出特性

強制換気を伴う場合の体積放出特性について検討する。式(4.7)に示したように、発生源の体積放出特性 Q_c [m³/s] は、ガスの体積流量 Q_g [m³/s] を燃焼下限界 LFL で除した値として定義されている。燃焼下限界 LFL は、ガスが燃焼しなくなるまで空気希釈したときの混合ガスの濃度であり、そのときの希釈空気の体積流量を $Q_{air.LFL}$ [m³/s] とすると、 LFL は次式で表される。

$$LFL = \frac{Q_g}{Q_{air.LFL} + Q_g} \quad (4.9)$$

燃焼下限界時の希釈空気の体積流量 $Q_{air.LFL}$ を、開口部から閉鎖空間に流入する空気の体積流量 Q_1 とさらに追加が必要となる空気の体積流量 Q_{add} に分割する。さらに式(4.8)に示した換気の非効率性を表す無次元数 f を導入すると次式で表される。

$$LFL = \frac{fQ_g}{Q_{add} + Q_1 + Q_g} \quad (4.10)$$

式(4.10)より次式が得られる。

$$Q_{add} = \frac{fQ_g}{LFL} - Q_1 - Q_g \quad (4.11)$$

一方、式(4.7)に示した希釈の度合いや危険距離の評価に用いるガスの体積流量 Q_c [m³/s] は、式(4.9)を代入することで次式のように表される

$$Q_c = \frac{Q_g}{LFL} = Q_{air.LFL} + Q_g \quad (4.12)$$

この式は、希釈の度合いや危険距離の評価において、燃焼下限界に達するまでの周辺の空

気との希釈が重要であることを示している。すなわち、強制換気を伴う場合の体積放出特性 Q'_d [m³/s] は、既に強制換気により濃度が低下していることを踏まえて、新たに追加する空気の体積流量 Q_{add} に着目した希釈を考慮した次式となる。

$$Q'_c = Q_{add} + Q_g \quad (4.13)$$

式(4.13)と式(4.11)を用いることで、換気効率性を踏まえて、閉鎖区画を強制換気している場合の大気放出を評価できる。

4.8.2 計算条件

表 4.13 に、大気放出を対象としたケーススタディの計算条件をまとめている。大気放出を推定するには、閉鎖空間内のガスの放出率や体積放出特性を求める必要がある。表 4.11 に示した前節のケーススタディ③を参照しつつ、閉鎖空間内の換気条件やガス圧力 p を変更している。

表 4.13 計算条件 (ケーススタディ④)

種別	項目	記号	条件・値	備考
放出の特性	可燃性物質		水素	
	モル質量	M	2 kg/kmol	水素の物性値
	燃焼下限界	LFL	4 vol%	水素の物性値
	自然着火温度	AIT	560°C	水素の物性値
	ガス密度	ρ_g	0.083 kg/m ³	大気条件、式(4.6)より
	臨界圧力	p_c	192.4 kPa	式(4.1)～式(4.2)より算出
	放出源		高性能配管継手	
	開口部の断面積	S	0.025 mm ²	表 4.1 より最小条件を設定
	放出源の圧力	p	0.8～70 MPa	計算結果を確認しながら適宜設定
	放出の等級		第 2 等級	破損による漏れ
	放出開口部係数	C_d	0.99	丸いオリフィスとして
	圧縮率係数	Z	1	理想的なガスとして
	放出速度		音速	$p > p_c$ のため式(4.3)を使用
閉鎖空間	閉鎖空間の容積		10 m ³	$L \times B \times H = 2 \times 2 \times 2.5$ m を想定
	換気回数		30 回/h	
	換気空気量		300 m ³ /h	
の位置	位置		閉鎖空間・屋外	障害物がない区域
	周囲圧力	p_a	101.3 kPa	基準値

周囲温度	T_a	20°C (293 K)	基準値
換気速度 (閉鎖区画内)	u_w	0.0167 m/s	換気の空気流量と閉鎖区画の断面積 $B \times H$ より換気速度を算出
換気速度 (大気放出)	u_w	1 m/s	表 4.2 より、標高 2 m を超えた障害物のない区域として設定
換気の有効性		良好	表 4.5 参照
換気非効率性係数	f	1.5	少し非効率な場合を想定
臨界濃度	X_{crit}	0.008	LFL×20%として設定

4.8.3 検討結果

図 4.14 及び図 4.15 は、これらの計算結果を希釈の度合いを評価するための図並びに危険区域の範囲を推定するための図にプロットしたものである。同図には閉鎖空間内の計算結果（放出源）と大気放出の計算結果をプロットしている。また、推定結果を表 4.14 にまとめている。

表 4.14 より、ガス圧力 p を 70 MPa、2 MPa、0.8 MPa とした 3 つの条件ともに、バックグラウンド濃度 X_b と臨界濃度 X_{crit} の大小関係は $X_b \ll X_{crit}$ を満たさないことがわかる。これは、閉鎖空間の容積を小さく設定したため、30 回/h の換気では想定される水素の漏洩に対して換気量が不足しているためである。したがって、図 4.14 による評価は適切ではなく、放出源は低希釈であると判断される。

ガス圧力を 70 MPa 及び 2 MPa とした場合、大気放出の体積放出特性 Q'_c は閉鎖空間内の体積放出特性 Q_c よりも増加している。これは、換気非効率性係数 f を 1.5（少し非効率な場合を想定）としたため、十分に希釈するための空気量が増加したためである。この計算の妥当性は不明であるが、ガス圧力を 70 MPa 及び 2 MPa とした場合の大気放出は中希釈となり、ゾーン 2 となる。また、ガス圧力を 0.8 MPa とした場合の大気放出は高希釈となり、非危険区域（ゾーン 2 NE）となる。

上記の通り、以上に記した検討は、本 IEC 規格に例示された解析方法ではなく、本事業において独自に検討した内容であり、評価の妥当性については水素燃料電池船の安全ガイドラインとの整合を含めて、より詳細な検討が必要である。

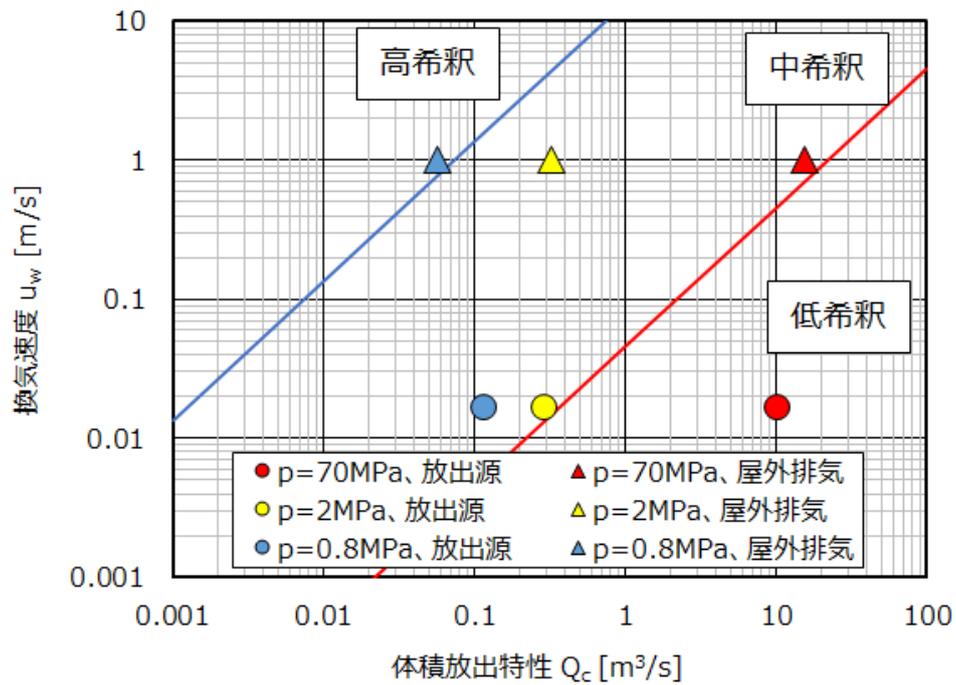


図 4.14 希釈の度合いの評価結果

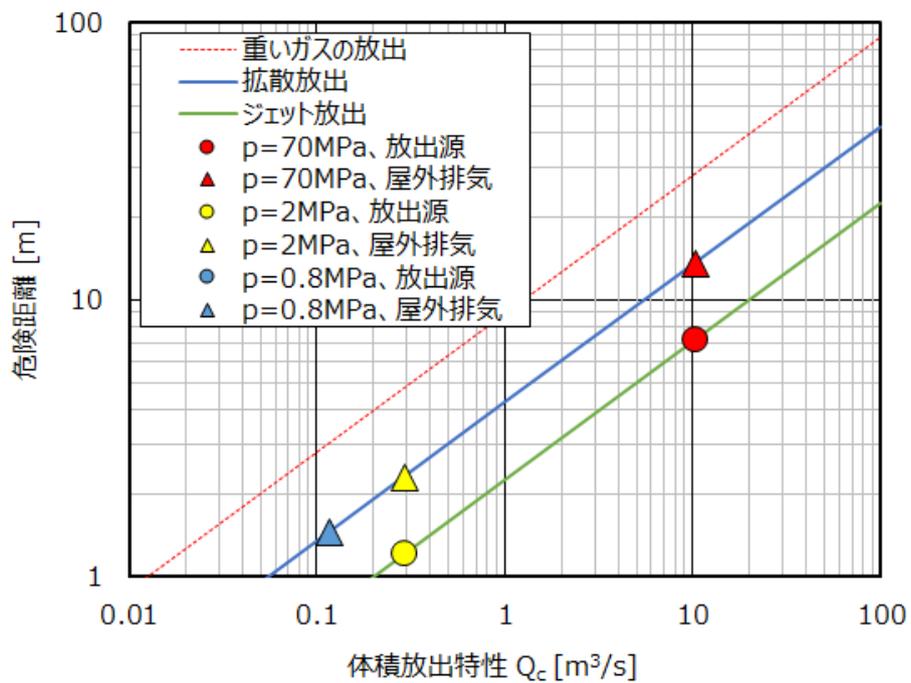


図 4.15 危険距離の推定結果

表 4.14 推定結果のまとめ (ケーススタディ④)

	ガス圧力 p	70 MPa	2 MPa	0.8 MPa
閉鎖空間	ガスの放出率 W_g	0.03407 kg/s	0.00097 kg/s	0.00039 kg/s
	体積放出特性 Q_e	10.24 m ³ /s	0.293 m ³ /s	0.117 m ³ /s
	バックグラウンド 濃度 X_b	1.246	0.185	0.080
	$X_b \ll X_{crit}$	NG	NG	NG
	希釈の度合い	低希釈	低希釈	低希釈
	ゾーンの種類	ゾーン 1 ゾーン 0 と同等	ゾーン 1 ゾーン 0 と同等	ゾーン 1 ゾーン 0 と同等
	危険距離	7.2 m	1.2 m	1 m (計算値は 0.8 m)
大気放出	体積放出特性 Q_e	15.64 m ³ /s	0.327 m ³ /s	0.057 m ³ /s
	希釈の度合い	中希釈	中希釈	高希釈
	ゾーンの種類	ゾーン 2	ゾーン 2	非危険区域 ゾーン 2NE
	危険距離	13.6 m	2.3 m	なし (計算値は 1.5 m)

5. 水素燃料電池船の拡散シミュレーションと IEC 規格の適用

本章は、拡散シミュレーション等によって危険区域を設定した事例に IEC 60079-10-1 を適用して危険区域を設定した場合の評価資料である。以下、市販の CFD ソフトウェアでいくつかの計算を実施し、本 IEC 規格と拡散シミュレーションの整合や妥当性を検討する。

5.1 拡散シミュレーションの概要

以下の計算に用いる拡散シミュレーションでは、市販の機械設計用 3D-CAD「Solid Works」に組み込まれる熱流体解析ソフトウェア「Flow Simulation」を用いる。CFD 計算に特化したソフトウェアではないが、作図と熱流体解析が連動しているため、複雑な形状であっても比較的簡便に計算できるといった特徴がある。

以下の計算では、流体の物性である比熱比、分子質量、粘度、比熱、熱伝導率（以下の計算では空気と水素が対象）は、本ソフトウェアに定義されているデフォルト値を使用する。また、拡散に関連するパラメータとして乱流強度と乱流長さがあり、これらを任意に設定できる。計算結果と試験結果との整合を確認しながら、これらの値を設定するのが理想であるが、以下の計算においては本ソフトウェアのデフォルト値を使用する。

5.2 拡散シミュレーションによる危険区域の範囲の計算

本 IEC 規格には、危険区域の範囲を推定するための図に記載された基準の線は、様々な換気速度における CFD 計算の結果に基づいており、信頼できる産業規則で規定された距離と比較されているとの記載がある。すなわち、危険区域の範囲を推定するための図において、横軸の体積放出特性 Q_v に応じて、危険区域の範囲（希釈によって燃焼下限界 LFL を下回る値になるまでの距離）を求めることができる。

本拡散シミュレーションの妥当性を確認するため、4.5 節に述べたケーススタディ①を参考として、計算結果と本 IEC 規格を比較する。表 5.1 に計算条件及び本 IEC 規格により求まるガスの放出率 W_g 並びに体積放出特性 Q_v を示す。なお、記載がない係数等の数値は 4.5 節に述べたケーススタディ①と同じである。

図 5.1 に拡散シミュレーションにより求められた放出源からの距離に対する水素濃度の計算結果を示している。計算のメッシュが粗いため段階的な変化となっているものの、放出源からの距離に応じて、周囲の空気により希釈されて水素濃度が低下していること、ガス圧力の違いが水素濃度の計算結果に大きく影響を及ぼしていることなどがわかる。

表 5.2 は、拡散シミュレーション及び本 IEC 規格により求められた危険区域の範囲（希釈によって燃焼下限界 LFL を下回る値になるまでの距離）をまとめたものである。また、図 5.2 は、危険区域の範囲を推定するための図に拡散シミュレーションの計算結果をプロットしたものである。これより、圧力が 0.2 MPa の場合、拡散シミュレーション及び本 IEC 規格による結果はよく一致していることがわかる。一方、圧力が 1.0 MPa の場合、拡散シ

ミュレーションにおける危険区域の範囲は、本 IEC 規格による推定結果と比べてやや狭いことがわかる。

計算結果同士の比較であり、実測との比較ではないため一概には言えないが、本 IEC 規格による推定結果を真の値とした場合、拡散シミュレーションの計算パラメータを見直す必要があると考えられる。このように、本 IEC 規格を利用することによって、拡散シミュレーションの妥当性を確認できる。

表 5.1 拡散シミュレーションの計算条件 (本 IEC 規格による推定結果を含む)

種別	項目	記号	条件・値		備考
放出の特性	可燃性物質		水素		
	放出源		圧力逃がし弁		
	オリフィス断面積		18.1 mm ²		オリフィス径 4.8mm
	開口部の断面積	S	1.81 mm ²		表 4.1 より、放出開口部が拡大しない条件
	放出源の圧力	p	0.2 MPa	1.0 MPa	
	放出開口部係数	C_d	0.99		丸いオリフィスとして
	圧縮率係数	Z	1		理想的なガスとして
	放出速度		音速	音速	式(4.3)
	ガスの放出率	W_g	0.00704 kg/s	0.0352 kg/s	式(4.1)~式(4.6)
	体積放出特性	Q_e	2.12 m ³ /s	10.59 m ³ /s	式(4.7)

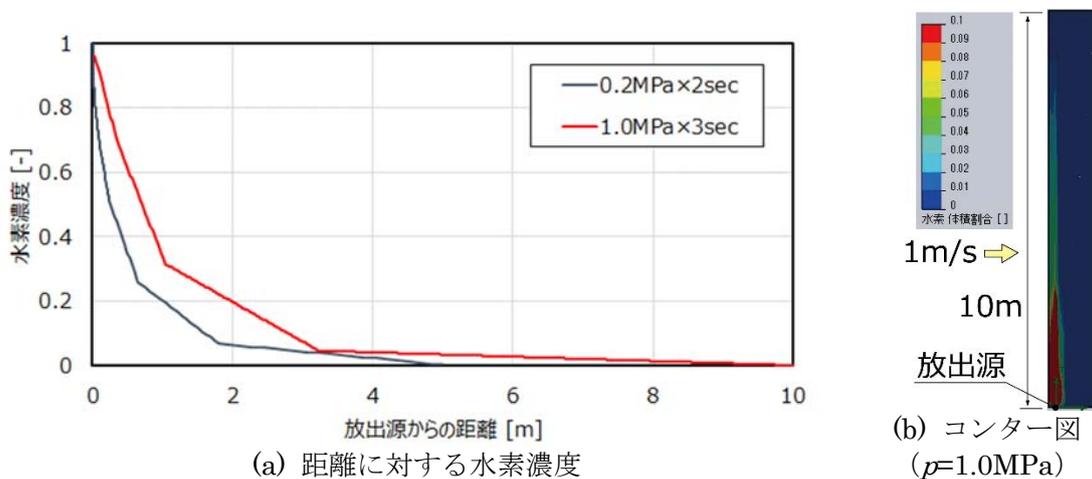


図 5.1 拡散シミュレーションの計算結果

表 5.2 拡散シミュレーション及び本 IEC 規格の計算結果

種別	項目	記号	条件・結果		備考
位置の特性	放出源の圧力	p	0.2 MPa	1.0 MPa	
	ガスの放出率	W_g	0.00704 kg/s	0.0352 kg/s	式(4.1)~式(4.6)
	体積放出特性	Q_e	2.12 m ³ /s	10.59 m ³ /s	式(4.7)
	拡散シミュレーション		3.2 m	4.2 m	図 5.1 より水素濃

	による危険区域の範囲				度が 0.04 となる 距離
	本 IEC 規格による危険 区域の範囲		3.3 m	7.3 m	図 5.2 参照

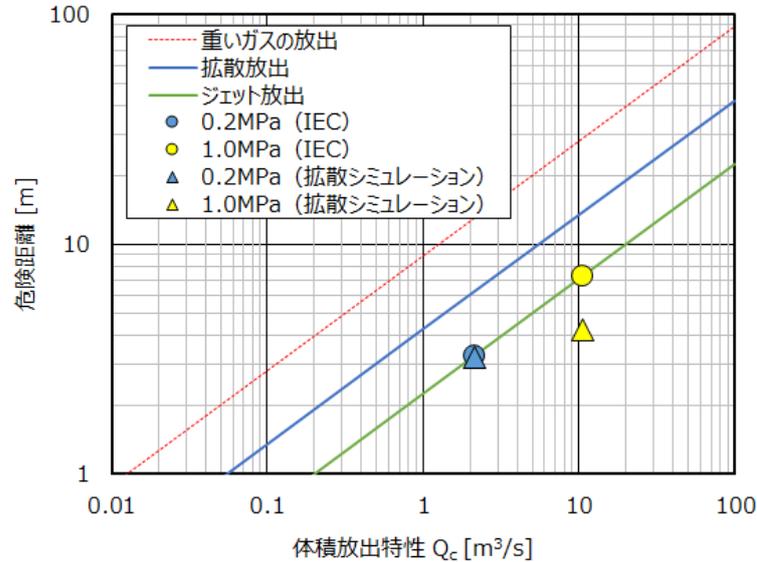


図 5.2 危険距離の推定結果

5.3 拡散シミュレーションによるケーススタディ

通常運航時、高濃度の水素を大気に放出することは認められていない。しかし、不慮の事態が生じた場合、事故の影響を最小化するために水素を大気に放出することがあり得る。その際、水素の放出率を制御することが可能である。また、実際の水素燃料電池船では、排気管の形状を任意に決めることができ、水素流出時の流速が変化する。そのような状況を想定して、船上の排気管から水素を放出する際の拡散シミュレーションを行い、本 IEC 規格を参照しつつ、危険区域の範囲について検討する。

5.3.1 水素の放出率の影響

水素の放出率の影響を検討した結果を紹介する。表 5.3 に計算条件及び計算結果、図 5.3 に拡散シミュレーションによる計算結果を示す。内径 50 mm の排気管から濃度 100 % の水素を放出し、周囲の風速は 1 m/s としている。水素の放出率を 0.01 kg/s、0.05 kg/s、0.1 kg/s としており、体積放出特性 Q_c [m³/s] は式(4.7)より求められる。なお、拡散シミュレーションにおいて排気管から放出される際の水素の流速は、水素の放出率と排気管の断面積から求められる。したがって、上記の条件においては音速には至らず拡散放出となる。図 5.4 及び図 5.5 は、本 IEC 規格に基づき、これらの計算結果を希釈の度合いを評価するための図並びに危険区域の範囲を推定するための図にプロットしたものである。図 5.5 には、拡散

シミュレーションにより求められた危険区域に範囲もプロットしている。

これより、拡散シミュレーションによる危険区域の範囲は、本 IEC 規格による危険区域の範囲と比べて、かなり狭いことがわかる。式(4.7)より求められる体積放出特性 Q_c [m³/s]は排気管出口における流速ではない。すなわち、本 IEC 規格においては、体積放出特性 Q_c [m³/s]に対する危険区域の範囲は一義的に求まるため、排気管の形状の影響を受けない。この計算結果だけから拡散シミュレーションの妥当性を評価することはできないが、拡散シミュレーションによる結果と本 IEC 規格による結果とが大きく異なることがあるので、評価する際にはより詳細な検討が必要である。

表 5.3 計算条件及び計算結果のまとめ

水素の放出率 W_g	0.01 kg/s	0.05 kg/s	0.1 kg/s
体積放出特性 Q_c	3.0 m ³ /s	15.0 m ³ /s	60.1 m ³ /s
拡散シミュレーションによる危険区域の範囲	4.3 m	5.4 m	4.9 m
本 IEC 規格による危険区域の範囲	7.4 m	16.4 m	23.2 m

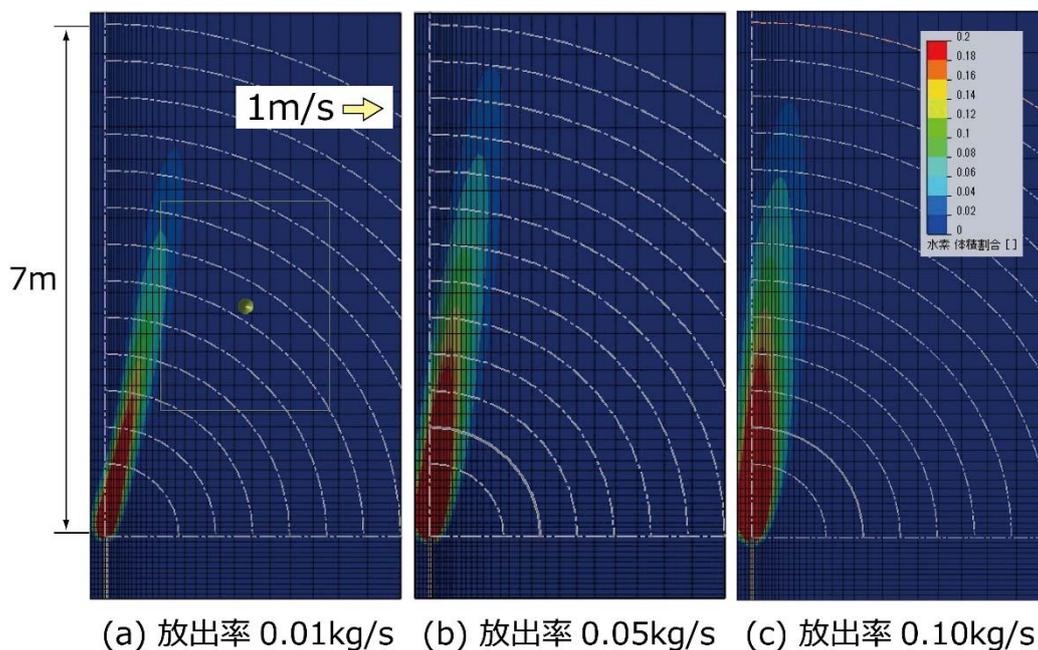


図 5.3 拡散シミュレーションによる計算結果

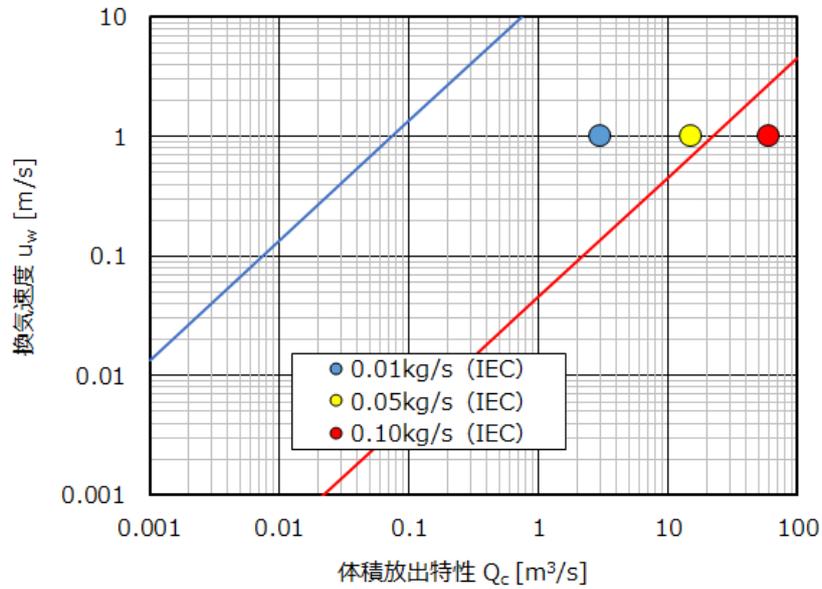


図 5.4 希釈の度合いの評価結果

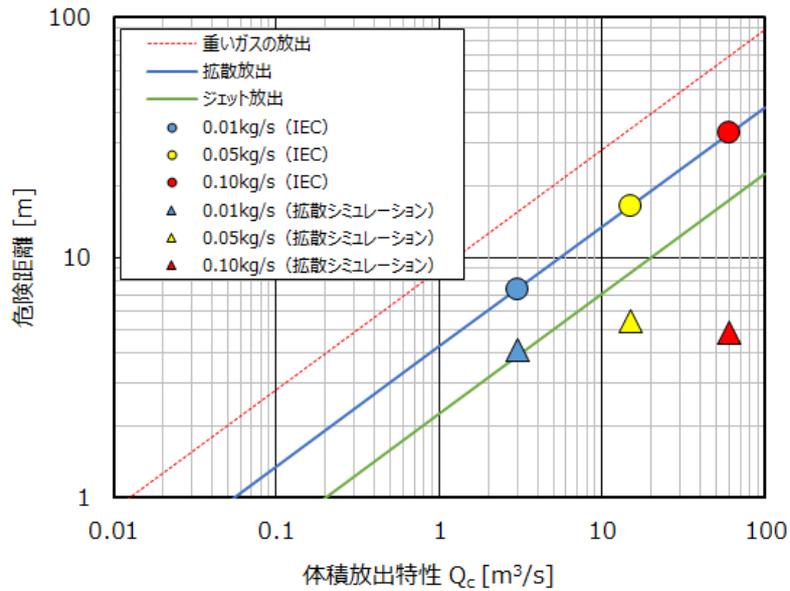


図 5.5 危険距離の推定結果

5.3.2 排気管断面積の影響

排気管断面積の影響を検討した結果を紹介する。表 5.4 に計算条件及び計算結果、図 5.6 に拡散シミュレーションによる計算結果の一例を示す。水素の放出率は 0.00704 kg/s としている。これは、前節に述べた圧力を 0.2 MPa とした際の漏洩量である (表 5.2 参照)。排気管の内径は 10 mm 、 50 mm 、 100 mm とし、排気管から放出される水素の濃度は 100% 、周囲の風速は 1 m/s としている。前項と同様、拡散シミュレーションにおいて排気管から放出される際の水素の流速は、水素の放出率と排気管の断面積から求められる。

これより、拡散シミュレーションによる危険区域の範囲は、排気管断面積を大きくするに従って狭くなることがわかる。これは、排気管断面積が大きくなるほど放出時の流速が低くなり、周囲大気との拡散の効果が高まるためであると考えられる。また、拡散シミュレーションによる危険区域の範囲は、本 IEC 規格による危険区域の範囲と比べて、かなり狭いことがわかる。これは本 IEC 規格においては、体積放出特性 Q_c [m³/s]に対する危険区域の範囲は一義的に求まり、排気管断面積の影響を受けないためである。前項と同様、この計算結果だけから拡散シミュレーションの妥当性を評価することはできないが、拡散シミュレーションによる結果と本 IEC 規格による結果とが大きく異なることがあるので、評価するにはより詳細な検討が必要である。

表 5.4 計算条件及び計算結果のまとめ

排気管の内径 (断面積)	1.5 mm (1.81 mm ²)	10 mm	50 mm	100 mm
ガスの放出率 W_g	0.00704 kg/s			
体積放出特性 Q_c	2.12 m ³ /s			
拡散シミュレーションによる危険区域の範囲	3.2 m	3.6 m	3.4 m	1.0 m
本 IEC 規格による危険区域の範囲	3.3 m (ジェット放出)	6.2 m (拡散放出)		

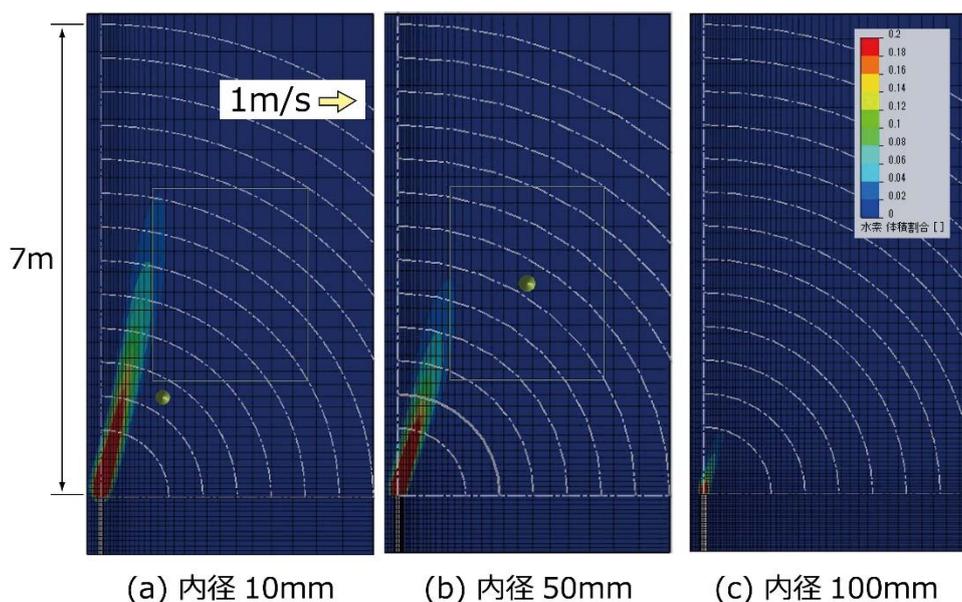


図 5.6 拡散シミュレーションによる計算結果の一例

5.4 まとめと課題

CFD を用いた拡散シミュレーションは、危険区域を設定する際の有効なツールとなることは間違いない。本 IEC 規格の危険区域の範囲を推定するための図に記載された基準線は、様々な CFD 計算の結果に基づいているとのことであり、本 IEC 規格を利用することによって、拡散シミュレーションの妥当性を確認できる。また、拡散シミュレーションは、放出部の形状ばかりでなく、放出部の周囲の状況を踏まえた計算ができること、閉鎖区画の水素漏洩を計算できることなどのメリットがあり、詳細な安全性評価が可能となる（図 5.7、図 5.8 参照）。

一方、拡散シミュレーションは、計算パラメータを適切に設定しないと誤った計算結果となる。また、拡散シミュレーションによる結果と本 IEC 規格による結果とが大きく異なることがある。すなわち、評価者には、経験に基づく健全な工学的判断が要求される。

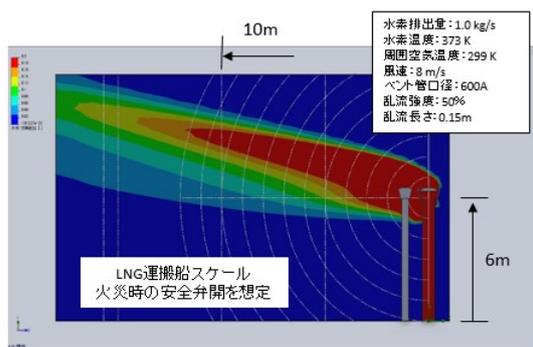


図 5.7 大型ベント管の計算例

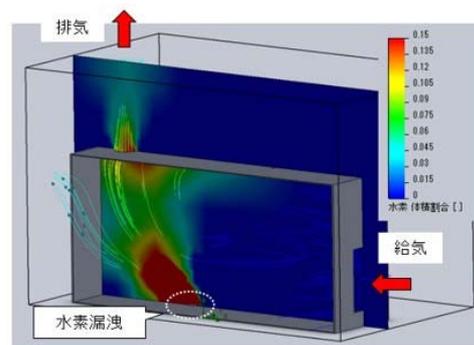


図 5.8 閉鎖区画の計算例

6. まとめ

本 IEC 規格には、可燃性ガスの漏れを評価するための推奨穴断面積や屋外の換気速度の基準値が明記されている。また、複雑な計算をすることなく体積放出特性を求めることができるため、本 IEC 規格を活用することによって、水素燃料電池船の設計やリスク評価を容易にすることができる。しかし、設定する条件によっては、リスクを過大または過小評価することになるので注意が必要である。以下、水素燃料電池船における危険区域の分類のケーススタディを行った結果より、課題をまとめる。

- ① 本 IEC 規格を活用することによって、水素燃料電池船の設計やリスク評価を容易にすることができる。一方、本規格は規制緩和ではなく、評価によっては従来の規則よりも厳しくなることがある。これらの特徴を踏まえた上で、本 IEC 規格を活用することが重要である。
- ② 本 IEC 規格には、可燃性ガスの漏れを評価するための推奨穴断面積が明記されているため、評価が容易になる。しかし、実際の水素燃料電池船に使われる機器やシール要素との整合は明確ではなく、計算条件として与える推奨穴断面積によって評価結果が大きく異なるので注意する必要がある。
- ③ 設定条件の妥当性について、いくつかの曖昧な推定が含まれている。例えば、放出の等級や換気非効率性係数は数値で決められていないため、評価者によって設定が異なることが起こり得る。
- ④ 本 IEC 規格に例示されている希釈の度合いを評価するための図並びに危険区域の距離を推定するための図には安全係数が含まれていないことに留意する必要がある。
- ⑤ 水素が漏れる可能性があっても、ガスの放出率（体積放出特性）を低下させる、あるいは換気速度を高めることなどによって、非危険区域となることがある。評価指標となることは間違いないが、水素燃料電池船の安全ガイドラインとの整合は不明確であり、同等の安全性を証明できるのか、あるいは代替設計として成立するのかは引き続き検討が必要である。
- ⑥ CFD を用いた拡散シミュレーションは、危険区域を設定する際の有効なツールとなる。一方、拡散シミュレーションは、計算パラメータを適切に設定しないと誤った計算結果となるといった課題があり、評価者には、経験に基づく健全な工学的判断が要求される。
- ⑦ 本 IEC 規格には多くの注記が示されており、より詳細な情報が含まれている。また、評価者には、経験に基づく健全な工学的判断が要求される。本規格を十分に理解することが重要であり、本報告書の計算例だけで評価するのは適切ではないと考えられる。

参考文献

- (1) IEC 60079-10-1 : Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres, Edition 3.0, 2020 (爆発性雰囲気－第 10-1 部：区域の分類－ガス状の爆発性雰囲気) .
- (2) JIS C 60079-10 : 2008 「爆発性雰囲気で使用する電気機械器具－第 10 部：危険区域の分類」.
- (3) 経済産業省：プラント内における危険区域の精緻な設定方法に関するガイドライン，2020.
- (4) 労働安全衛生総合研究所技術指針，ユーザーのための工場防爆設備ガイド，2020.
- (5) IMO, INTERIM GUIDELINES FOR THE SAFETY OF SHIPS USING FUEL CELL POWER INSTALLATIONS, MSC.1/Circ.1647, 2022.
- (6) 国土交通省：水素燃料電池船の安全ガイドライン，2021（改訂）.

添付資料 3

トリプル連結バース

- ・ 概要及びコンセプト

トリプル連結バージの概要及びコンセプト

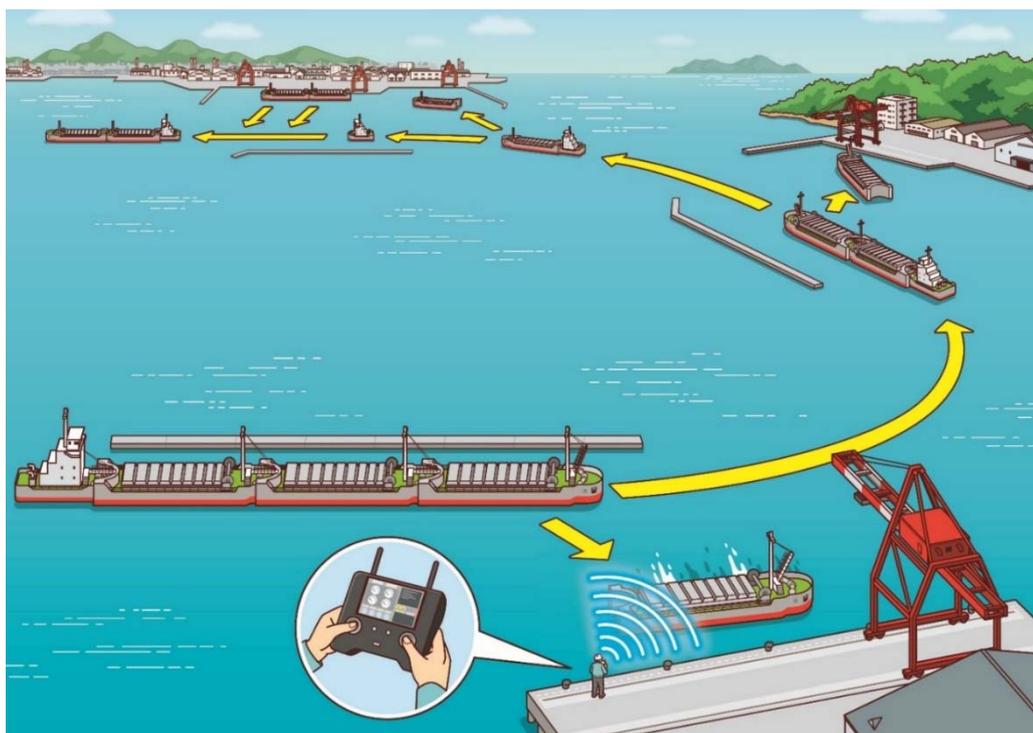
1. トリプル連結バージのイメージ

我が国内航海運からの温室効果ガス（GHG）削減及び船員不足への対応を目的として、日本財団の助成を受けて研究開発を実施中。



2. コンセプト

貨物の集配に対応して、港内でバージを切離し・連結。切り離されたバージは、遠隔操縦により、着岸・離岸。



添付資料 4

トリプル連結バージ

- ・ 運動性能評価

トリプル連結バージの 運動性能評価

広島大学

大学院 先進理工系科学研究科
輸送・環境システムプログラム

佐野 将昭



研究背景

◆ プッシャー・バージ(PB)という輸送手法

- 海外の河川輸送で発達(欧州の運河でも活躍)
- 縦横にロープ連結した複数のバージ(浮体)をプッシャーで押航。波による動揺の心配が無い為、大量のバージを一括輸送。
- バージは無人の浮体であり複雑な構造様式を有さず、一般に建造に要する初期投資を節約可。
- 到着後、プッシャーはバージを分離して直ちに次の輸送に取り掛かれる。適切な運航計画を組めれば、荷待ち時間が無く、無駄を省ける(Cyclic Operation)。

◆ PBを海で走らせる事の難しさ

- 波浪中の航行が避けられず、ロープ連結は不可。**機械式連結技術(2点 or 3点支持)**の採用が必須。
- 同じ理由から、これまでに、1台のバージを1隻のプッシャーが押航する**シングル連結バージ**のみが実現。

◆ 瀬戸内海への応用の可能性

- 瀬戸内海沿岸は、比較的波が穏やかであり、多連結バージを走らせるポテンシャルは高い。バージは幅広であり、喫水が浅い点も有利に作用。
- 様々な規模の工場・港湾が立地しており、混載も可能な多連結バージのCyclic Operationを展開出来る素地はある。



U.S. Wheat Associates

<https://www.uswheat.org/wheatletter/reliable-logistics-barges-move-u-s-wheat-efficiently/>



Taisei Engineering Consultants Ltd.

http://www.articouple.com/3-articouple_k.html

新コンセプト船：トリプル連結バージ

概念図と研究目的



研究目的：内航船のGHG削減と船員不足への対応

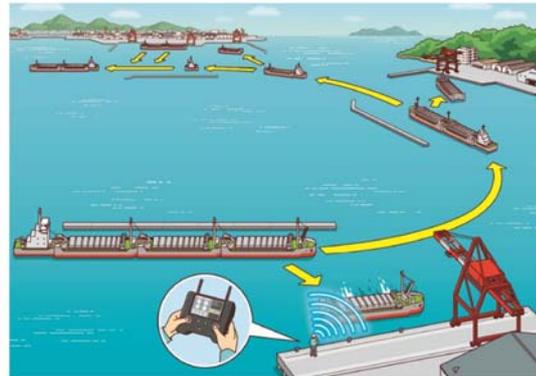


第3回 内航カーボンニュートラルに向けた新技術の安全評価手法の検討委員会

資料3-2-2-1「トリプル連結バージ(二本船 船技術研究協会)より抜粋.

- ◆ 最大3台のバージを縦列に連結
- ◆ 連結部には2点支持の機械式連結を採用 (支持点回りでピッチング運動を許容)
- ◆ バージを岸壁へ自動着棧、または岸壁から沖合まで自動離棧できるような自動操船システム(もしくは遠隔操船システム)を装備。(自律運航バージ構想)

コンセプト



2

事業計画

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 トリプル連結バージ事業計画

代替設計の安全評価・概念設計							
2022年度				2023年度			
1/4半期	2/4半期	3/4半期	4/4半期	1/4半期	2/4半期	3/4半期	4/4半期
全体							
◆コンセプト検討		◆適用規則整理		◆検査の方法			
トリプル連結バージ							
◆仕様検討・概念設計				◆完成要目・GA			
◆連結強度(試計算)				◆連結部詳細設計			
◆速力・馬力(試計算)				◆線図		◆速力・馬力	
◆水槽試験(連結部外力等)・操縦性評価							
自律バージ							
◆仕様検討・概念設計				◆遠隔操縦システム詳細設計			

3

内船 トリ	< FULL LOAD COND. > 船橋視界長 201.294m			
	全長 162.750m			
	< LIGHT COND. > 船橋視界長 275.560m			
	全長 162.750m			
代替	◆コ			
202				
1/4	◆コ			
全体				
◆コ	◆コ			
◆コ				
トリプル連結バージ	◆コ			
	◆仕様検討・概念設計		◆完成要目・GA	
	◆連結強度(試計算)		◆連結部詳細設計	
	◆速力・馬力(試計算)		◆線図	◆速力・馬力
			★	◆水槽試験(連結部外力等)・操縦性評価
自律バージ	◆コ			
	◆仕様検討・概念設計		◆遠隔操縦システム詳細設計	

4

本研究の目的と内容

◆ 抵抗性能の評価（水槽試験）

- ◆ 広島大学曳航水槽で平水中直進試験(抵抗試験)を実施.
- ◆ 全抵抗を計測し, 3次元外挿法により各抵抗成分(摩擦+粘性圧力+造波)を評価.
- ◆ 連結状態, 載荷状態毎に実船の有効馬力を推定.

◆ 規則波中の各船体運動および各連結部に作用する荷重の評価（水槽試験）

- ◆ 曳航水槽で規則波中直進試験を実施.
- ◆ プッシャーと各バージの縦運動(前後揺れ・上下揺れ・縦揺れ)及び連結部の荷重(前後方向および上下方向)を計測.
- ◆ 波長, 波高, 船速, 載荷状態の影響を系統的に評価.

◆ 平水中の操縦運動性能の評価（シミュレーション計算）

- ◆ 船体, プロペラ, 舵に作用する流体力をCFD計算により推定.
- ◆ 各種係数を同定し, プッシャー・バージの操縦運動数学モデルを構築
- ◆ 操縦運動シミュレーション計算(旋回運動・Zigzag運動)を通じて, 操縦性能を評価.

5

供試船(船体)の主要目

◆ **連結状態**： バージ3連結， 2連結， 1連結

◆ **載荷状態**： 満載(F)， 軽荷(L)， 混載

- ✓ 満載排水量の**71%**を本実験時の軽荷状態に設定
- ✓ 計算に基づく操縦性能の評価では，満載排水量の**42%**（仕様書の設定）も検討に追加
- ✓ 満載と軽荷(71%)の混載式トリプルバージも設定.

1/36.17模型



Item	Pusher	Barge (Full)	Barge (Light 71%)	Barge (Light 42%)	PFFF	PFFL (L: 71%)	PFLF (L: 71%)	PLLL (L: 71%)	PLLL (L: 42%)
L_{pp}	m	24	49.55	49.55	160.55	160.55	160.55	160.55	160.55
L_{wl}	m	26	49.7	48.57	162.55	161.99	162.55	161.99	161.42
B	m	8.5	10	10	10	10	10	10	10
d	m	2.8	3.75	1.65	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75
V	m ³	351	1575.28	655.95	5076.84	4612.87	4612.87	3684.93	2318.85
C_B	-	0.61	0.85	0.80	0.84	0.77	0.77	0.61	0.39
WSA	m ²	271.86	769.91	538.20	2581.58	2466.18	2466.18	2235.39	1886.45

※PB輸送船を構成するブッシャーと各バージの喫水は不揃いである為，満載バージの喫水を統一的に入力した。また方形係数はそれを用いて計算した。

6

計測システム

- ◆ 波高，流速，船体抵抗
- ◆ 各連結部の**前後荷重と上下荷重**
- ◆ 各船体の**上下揺れと縦揺れ**

✓ **画像解析システム**

- 船上に置いた画像解析キャリアレーションプレートビデオカメラで撮影し，専用ソフトで運動解析
- 多点の6自由度運動を同時計測可能。
- 3連結の場合，ブッシャーと3台の各バージにプレートを設置し，直上の計4台のカメラで撮影。

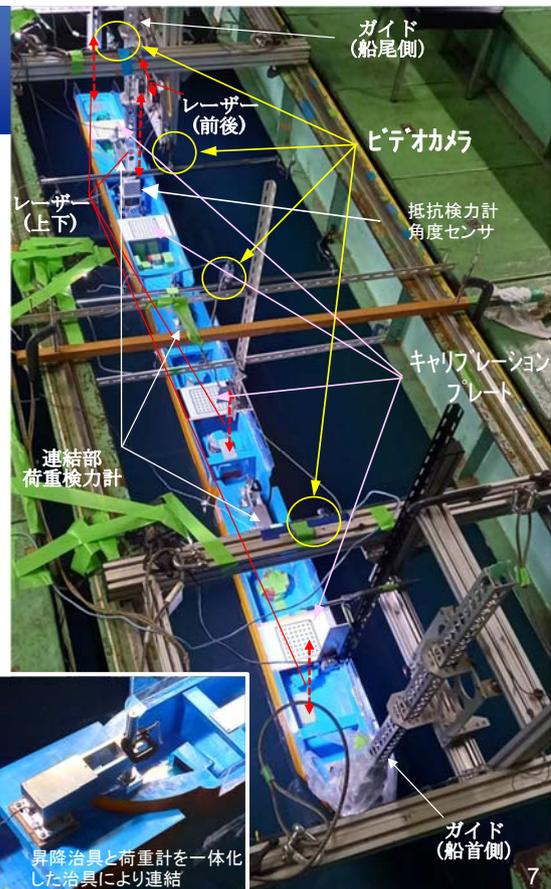
✓ **レーザー測距計**

- 各船体の上下運動および最後尾のバージの前後運動を計測。
- 3連結の場合，計5台のレーザー測距計を設置。

✓ **角度センサ**

- 最後尾のバージの縦揺れ角を計測。

各レーザーの照射位置における上下運動の情報に基づき，各船体の所定位置における上下揺れと縦揺れを推定可。



□ **2点支持・縦揺れ運動フリー**

本研究の目的

◆ 抵抗性能の評価（水槽試験）

- ◆ 広島大学曳航水槽で平水中直進試験（抵抗試験）を実施。
- ◆ 全抵抗を計測し、3次元外挿法により各抵抗成分（摩擦+粘性圧力+造波）を評価。
- ◆ 連結状態、載荷状態毎に実船の有効馬力を推定。

◆ 規則波中の各船体運動および各連結部に作用する荷重の評価（水槽試験）

- ◆ 曳航水槽で規則波中直進試験を実施。
- ◆ プッシャーと各バージの縦運動（前後揺れ・上下揺れ・縦揺れ）及び連結部の荷重（前後方向および上下方向）を計測。
- ◆ 波長、波高、船速、載荷状態の影響を系統的に評価。

◆ 平水中の操縦運動性能の評価（シミュレーション計算）

- ◆ 船体、プロペラ、舵に作用する流体力をCFD計算により推定。
- ◆ 各種係数を同定し、プッシャー・バージの操縦運動数学モデルを構築
- ◆ 操縦運動シミュレーション計算（旋回運動・Zigzag運動）を通じて、操縦性能を評価。

8

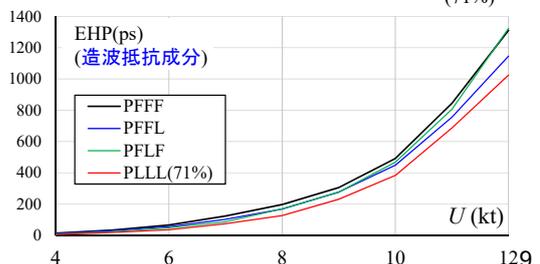
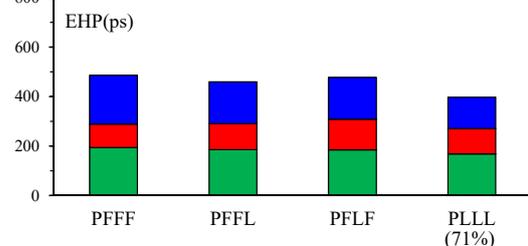
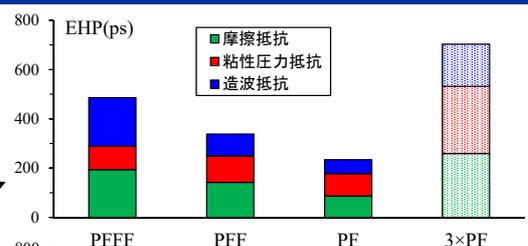
抵抗性能の評価（水槽試験結果）

◆ 実船の有効馬力を推定

- ・ 長水槽で模型船を曳航し、全抵抗を計測。
- ・ 3次元外挿法により、**摩擦抵抗**、**粘性圧力抵抗**、**造波抵抗**の各種抵抗成分を水底、摩擦、圧力抵抗を実船レイノルズ数を考慮して換算し、実船の有効馬力を推定。

◆ バージの連結台数による比較

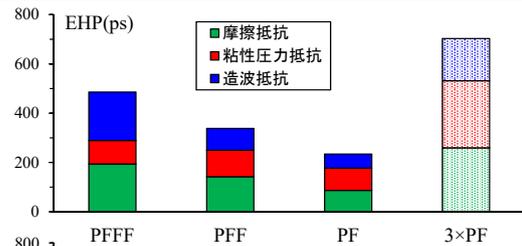
- ・ バージの連結台数を増やす程、単位輸送量当たりの有効馬力は低減する。
- ・ 多連結の場合は前方バージが流れ除けになる為、「PF」を3隻運航する場合と比較して、「PFFF」輸送では粘性圧力抵抗を低減できる。
- ・ 水線長を用いたフルード数が十分に低くても、1台あたりのバージ長を用いたフルード数は大きく、バージ連結部（圧力変動部）での造波現象が無視できない。連結台数が多い程、造波抵抗の顕著な増加が見られる。



抵抗性能の評価(水槽試験結果)

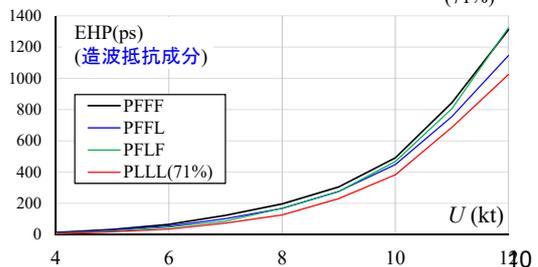
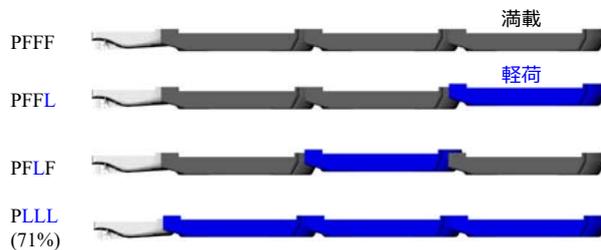
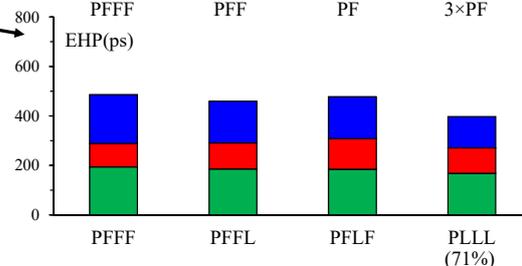
◆ 実船の有効馬力を推定

- ・ 長水槽で模型船を曳航し、全抵抗を計測。
- ・ 3次元外挿法により、**摩擦抵抗**、**粘性圧力抵抗**、**造波抵抗**の各種抵抗成分を水底、摩擦、圧力抵抗を実船レイノルズ数を考慮して換算し、実船の有効馬力を推定。



◆ バージの载荷状態による比較

- ・ 「PFFF」と「PLLL」の比較より、排水量が3割減っても有効馬力(抵抗)は然程減らない。Cyclic Operationにより満載バージを随時押せる配船とする事が有益と思われる。
- ・ 「PFLF」と「PFFL」を比較すると、後者の法が有効馬力(抵抗)が低い。バージ間の喫水が違う場合には、バージの並べ方も重要になり得る。
- ・ 造波抵抗は船速の4乗に比例する事から、造波抵抗が急増する船速域を避けた適切な船速設定が重要。



本研究の目的

◆ 抵抗性能の評価 (水槽試験)

- ◆ 広島大学曳航水槽で平水中直進試験(抵抗試験)を実施。
- ◆ 全抵抗を計測し、3次元外挿法により各抵抗成分(摩擦+粘性圧力+造波)を評価。
- ◆ 連結状態、载荷状態毎に実船の有効馬力を推定。

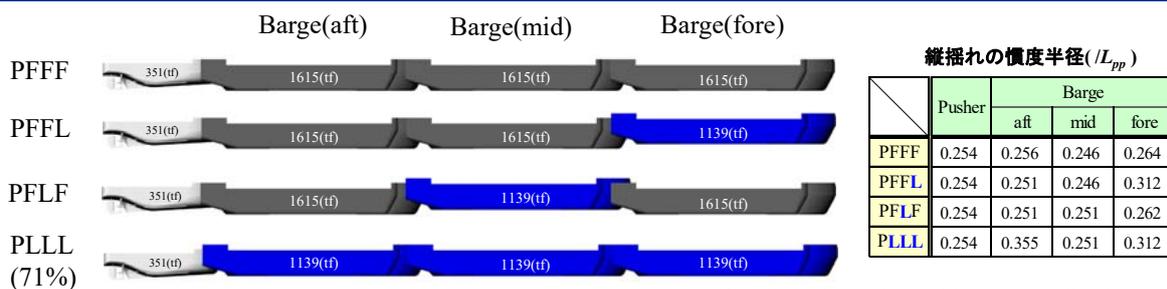
◆ 規則波中の各船体運動および各連結部に作用する荷重の評価 (水槽試験)

- ◆ 曳航水槽で規則波中直進試験を実施。
- ◆ プッシャーと各バージの縦運動(前後揺れ・上下揺れ・縦揺れ)及び連結部の荷重(前後方向および上下方向)を計測。
- ◆ 波長、波高、船速、载荷状態の影響を系統的に評価。

◆ 平水中の操縦運動性能の評価 (シミュレーション計算)

- ◆ 船体、プロペラ、舵に作用する流体力をCFD計算により推定。
- ◆ 各種係数を同定し、プッシャー・バージの操縦運動数学モデルを構築
- ◆ 操縦運動シミュレーション計算(旋回運動・Zigzag運動)を通じて、操縦性能を評価。

規則波(向波)中の直進試験

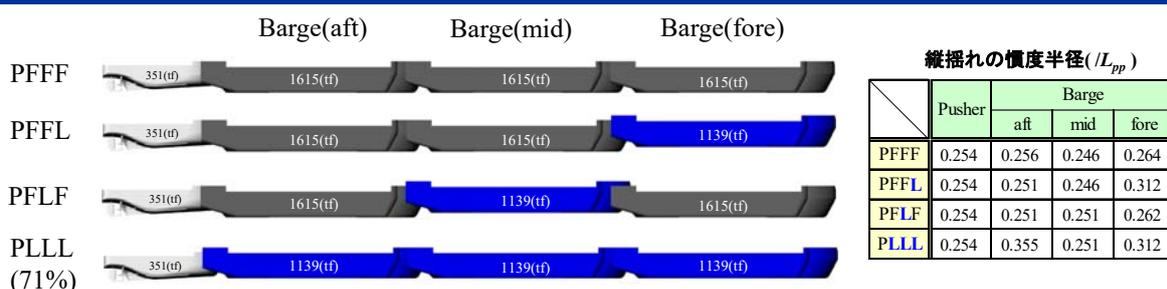


トリプル連結バージの主な実験点(実船スケールへの換算値)

載荷状態	U (kt) 船速	H _w (m) 波高	λ / L_{pp} 波長船長比																												
			0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8	2												
			λ (m) 波長																												
			32.1	48.2	64.2	80.3	96.3	112.4	128.4	144.5	160.6	176.6	192.7	208.7	224.8	240.8	256.9	289.0	321.1												
T (s) 周期																															
4.5																5.6	6.4	7.2	7.9	8.5	9.1	9.6	10.1	10.6	11.1	11.6	12.0	12.4	12.9	13.7	14.4
PFFF	8	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○													
		1.09	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○													
		1.45	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○													
	10	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○													
	1.09	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○														
PFFL	8	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○														
PFLF	8	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○														
PLLL	8	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○														
	10	1.09			○	○	○	○		○			○	○	○	○	○														

12

規則波(向波)中の直進試験



トリプル連結バージの主な実験点(実船スケールへの換算値)

載荷状態	U (kt) 船速	H _w (m) 波高	λ / L_{pp} 波長船長比																												
			0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8	2												
			λ (m) 波長																												
			32.1	48.2	64.2	80.3	96.3	112.4	128.4	144.5	160.6	176.6	192.7	208.7	224.8	240.8	256.9	289.0	321.1												
T (s) 周期																															
4.5																5.6	6.4	7.2	7.9	8.5	9.1	9.6	10.1	10.6	11.1	11.6	12.0	12.4	12.9	13.7	14.4
PFFF	8	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○													
		1.09	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○													
		1.45	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○													
	10	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○													
	1.09	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○														
PFFL	8	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○														
PFLF	8	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○														
PLLL	8	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○														
	10	1.09			○	○	○	○		○			○	○	○	○	○														

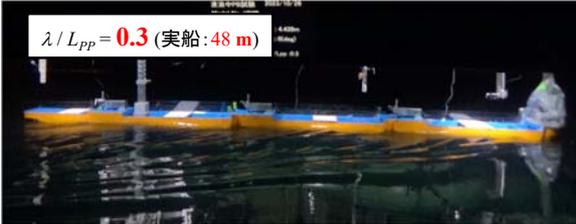
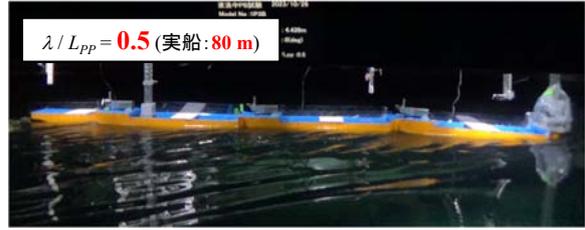
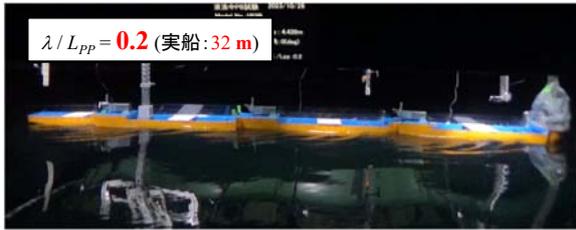
有義波
 ・波長: 19 m
 ・波高: 0.44 m
遭遇し得る最大波
 ・波長: 56 m
 ・波高: 2.5 m

航行海域で主に遭遇する波条件

13

【PFFF】 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高:0.72 m (模型:20 mm)

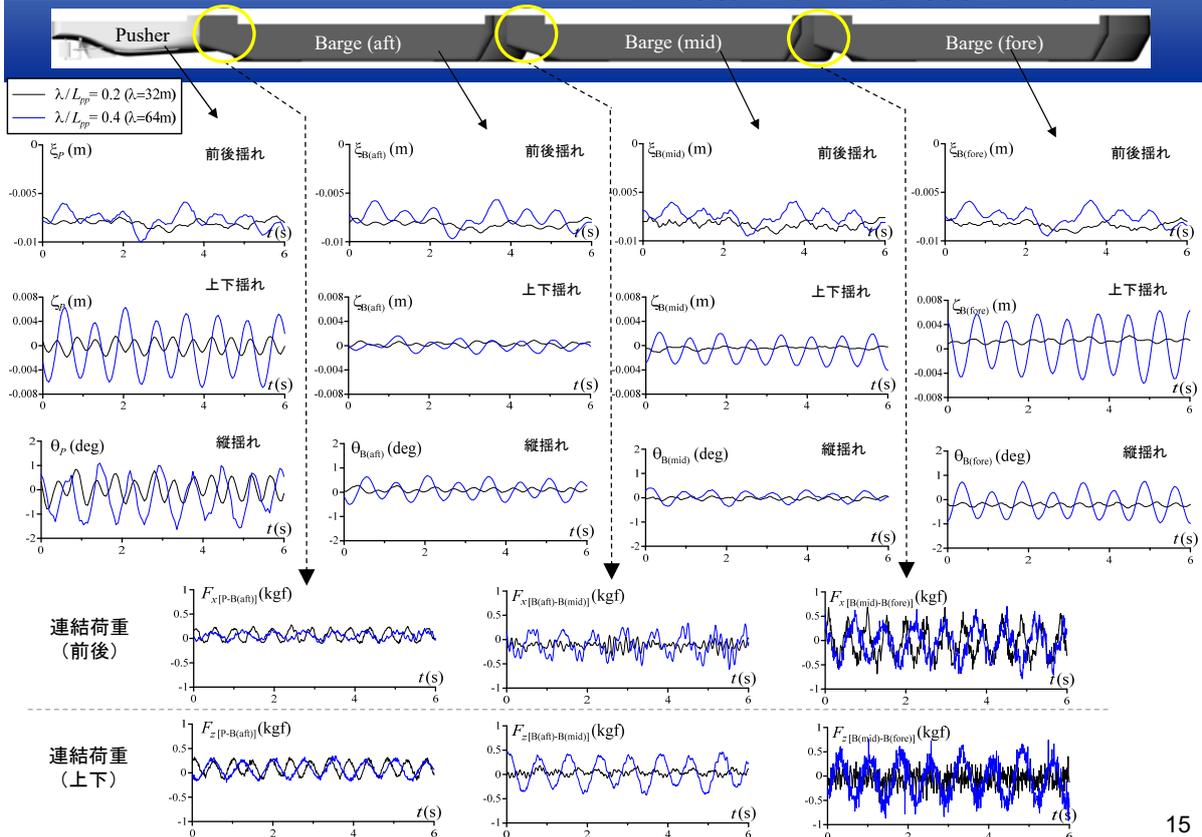
船体運動に及ぼす波長影響



14

【PFFF】 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高:0.72 m (模型:20 mm)

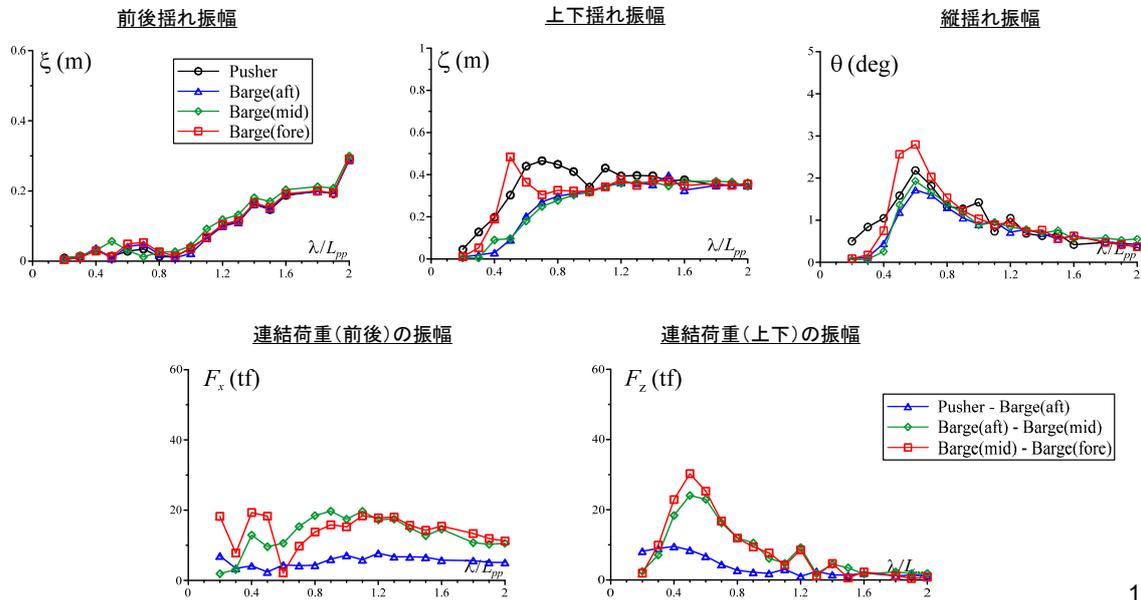
船体運動と連結部荷重の時系列



15

船体運動と連結部荷重の変動振幅 (波の出会い周波数で変動する1次成分, 実船換算)

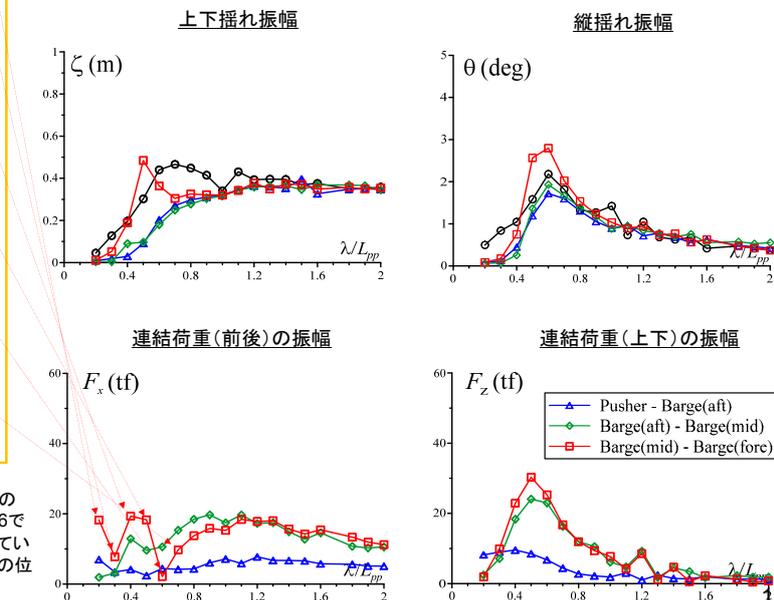
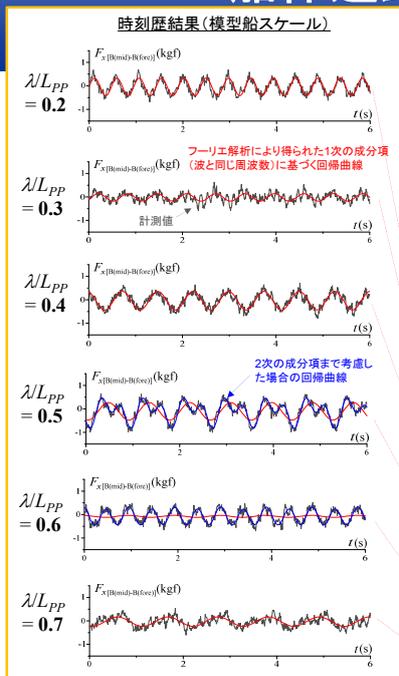
【PFFF】 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高:0.72 m (模型:20 mm)



16

船体運動と連結部荷重の変動振幅 (波の出会い周波数で変動する1次成分, 実船換算)

8 kt (模型:0.684 m/s), 波高:0.72 m (模型:20 mm)



短波長域において、先頭連結部における前後荷重の複雑な変動が観察された。特に波長船長比0.5、0.6では、出会い波周波数より高次の変動成分が混入している事が分かる。連結部を挟んだバージの船体運動の位相差(干渉)が一因とも思われる。

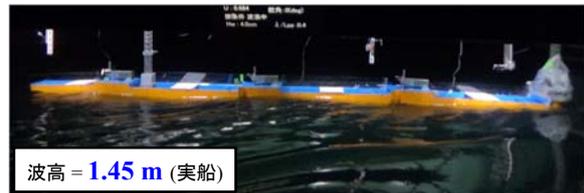
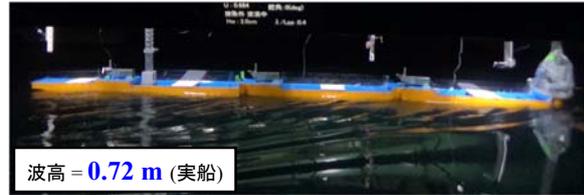
船体運動に及ぼす波高影響

有義波
波長: 19 m
波高: 0.44 m

遭遇し得る最大波
波長: 56 m
波高: 2.5 m

$\lambda / L_{PP} = 0.2$ (波長: 32 m)

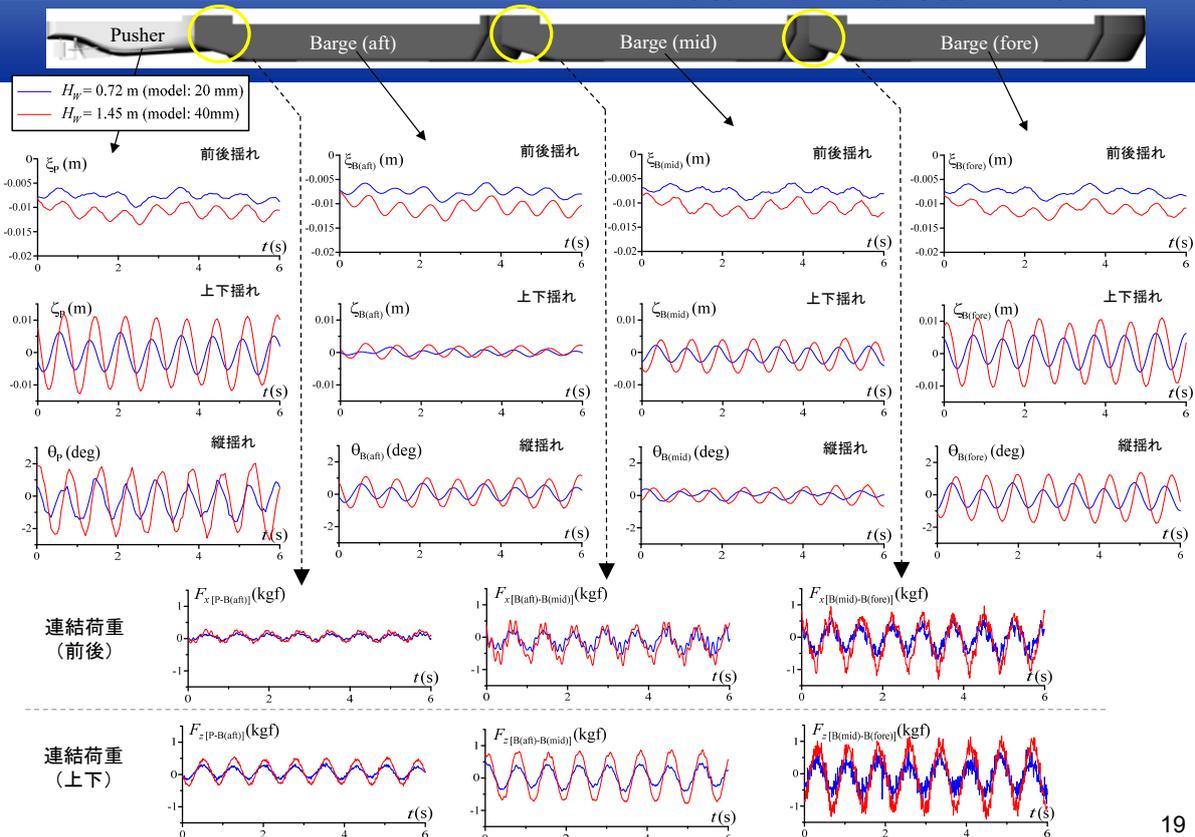
$\lambda / L_{PP} = 0.4$ (波長: 64 m)



18

【PFFF】 8 kt (模型: 0.684 m/s), $\lambda / L_{PP} = 0.4$ (波長: 64 m)

船体運動と連結部荷重の時系列

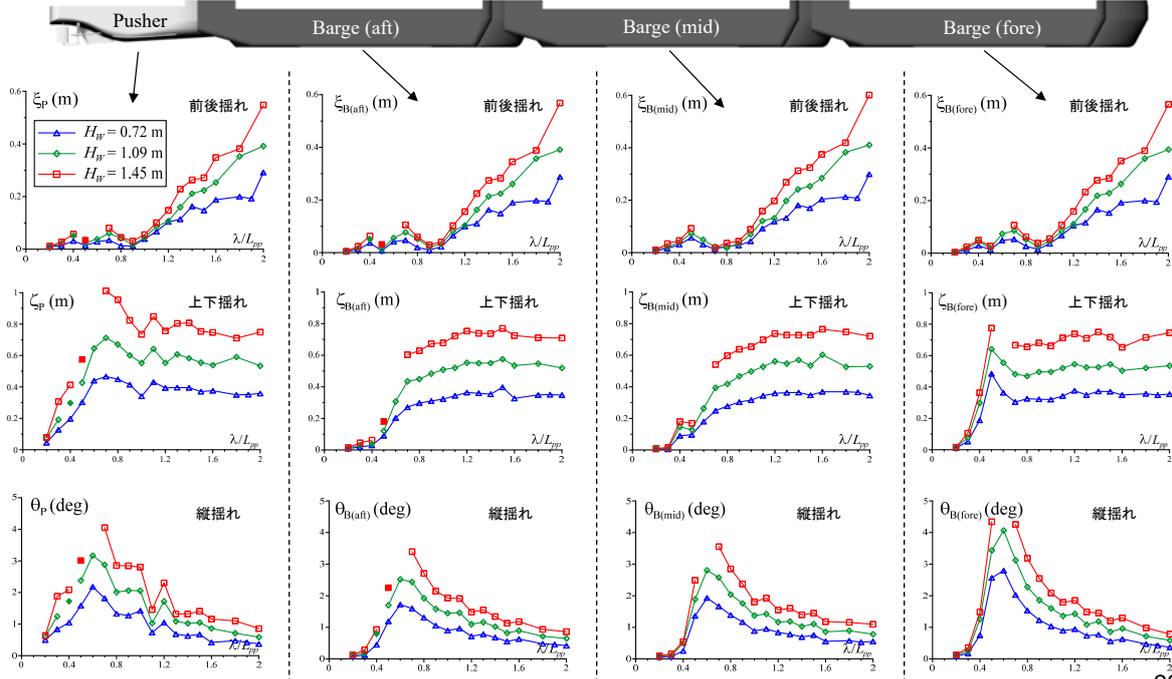


19

船体運動の変動振幅に及ぼす波高影響 (波の出会い周波数で変動する1次成分, 実船換算)

【PFFF】 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高:0.72 m (模型:20 mm) vs 1.09 m (同:30mm) vs 1.45 m (同:40mm)

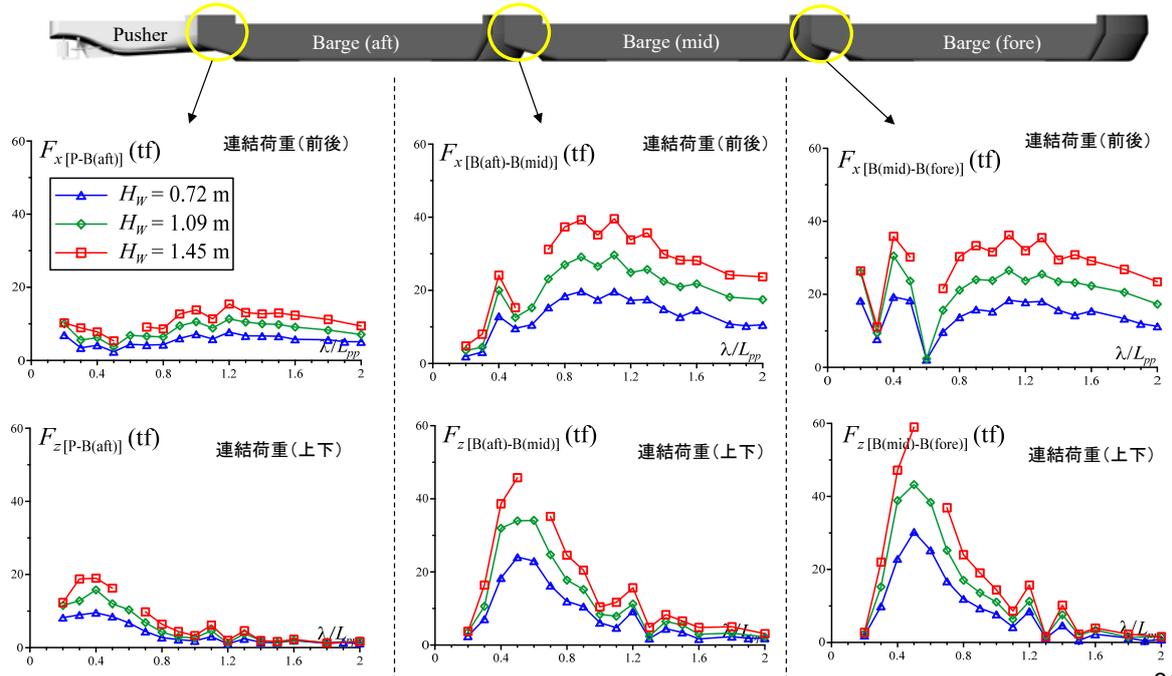
※画像解析システムの計測不具合があった試験点は、レーザー測距計に基づく解析結果をプロット(色塗りソリッド)。



20

連結部荷重の変動振幅に及ぼす波高影響 (波の出会い周波数で変動する1次成分, 実船換算)

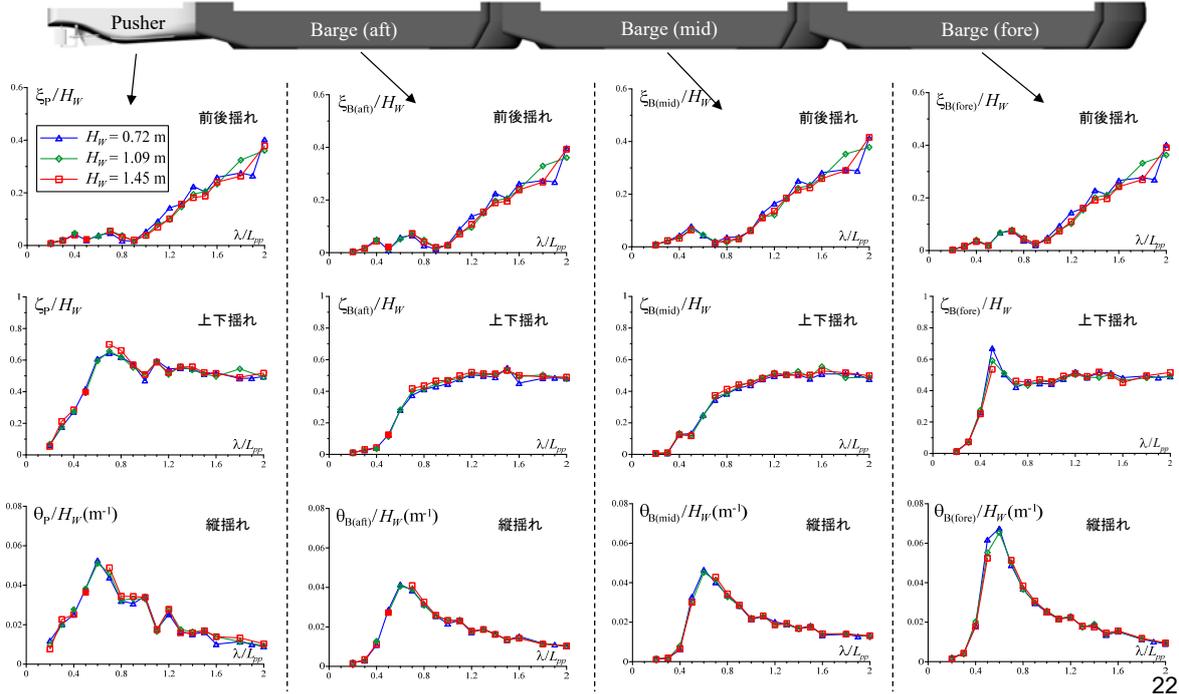
【PFFF】 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高:0.72 m (模型:20 mm) vs 1.09 m (同:30mm) vs 1.45 m (同:40mm)



21

船体運動の変動振幅に及ぼす波高影響 (波の出会い周波数で変動する1次成分, 波高で除算)

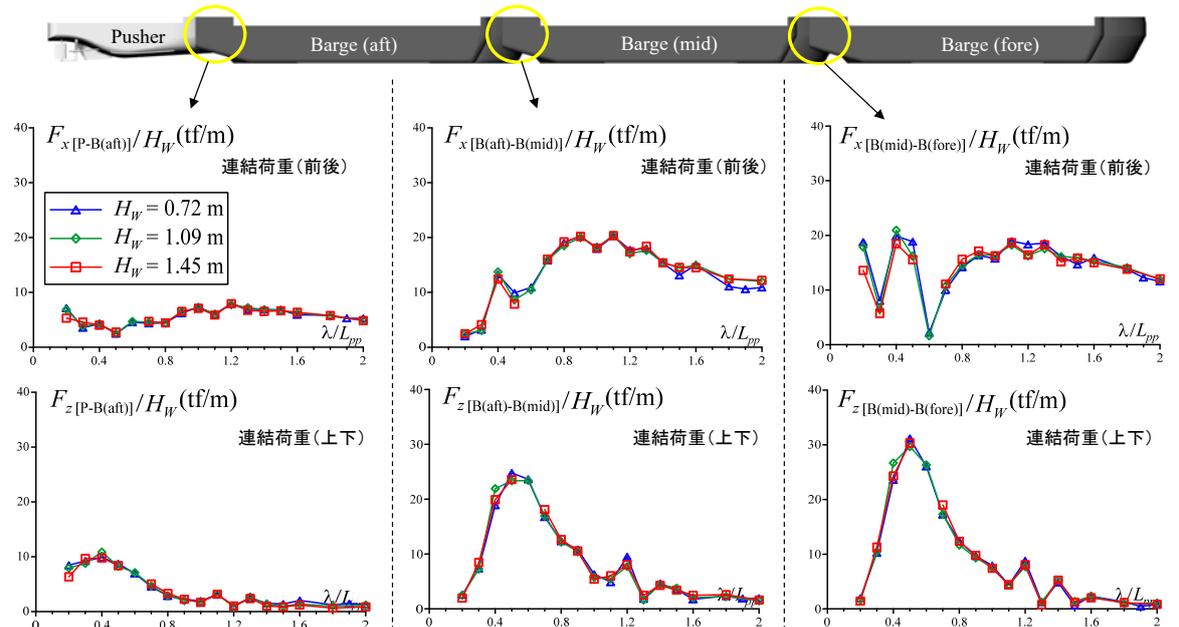
【PFFF】 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高:0.72 m (模型:20 mm) vs 1.09 m (同:30mm) vs 1.45 m (同:40mm)



22

連結部荷重の変動振幅に及ぼす波高影響 (波の出会い周波数で変動する1次成分, 波高で除算)

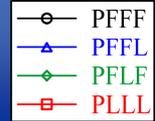
【PFFF】 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高:0.72 m (模型:20 mm) vs 1.09 m (同:30mm) vs 1.45 m (同:40mm)



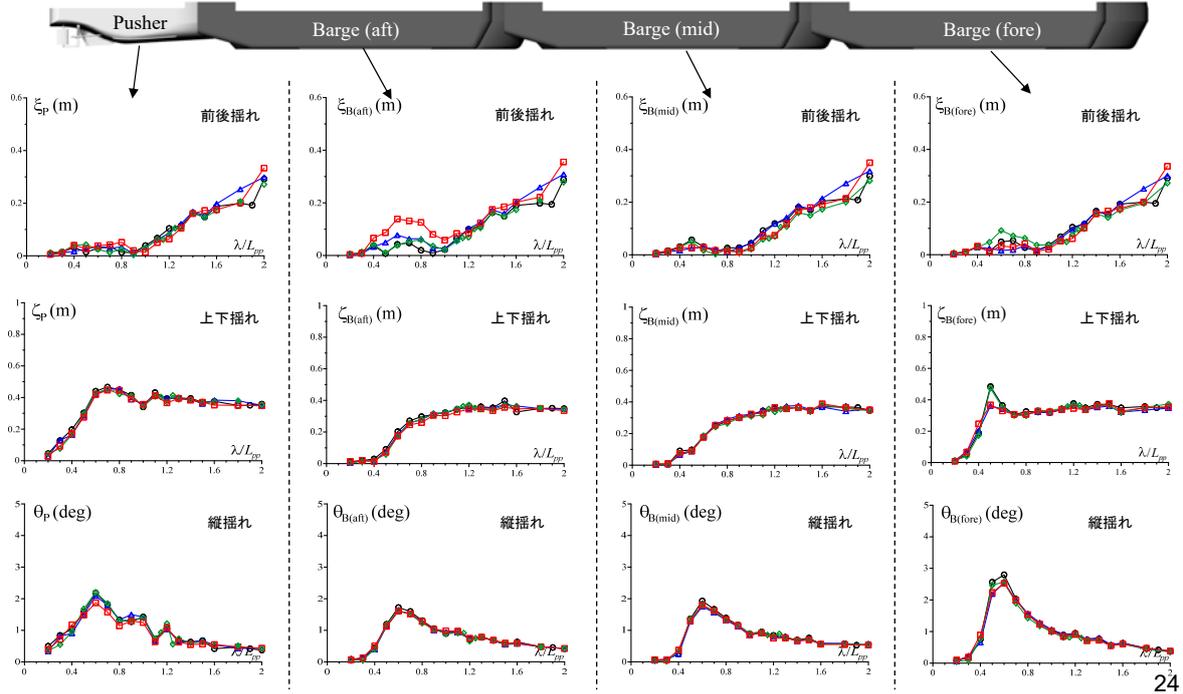
◆ プッシャーと各バージの船体運動ならびに各連結部の前後荷重と上下荷重の1次の変動振幅は、波高で除算した値が波高にかかわらず一致する。異なる波高における連結部荷重を推定する上で有用な知見と思われる。

23

船体運動の振幅に及ぼす載荷状態の影響 (波の出会い周波数で変動する1次成分, 波高で除算)



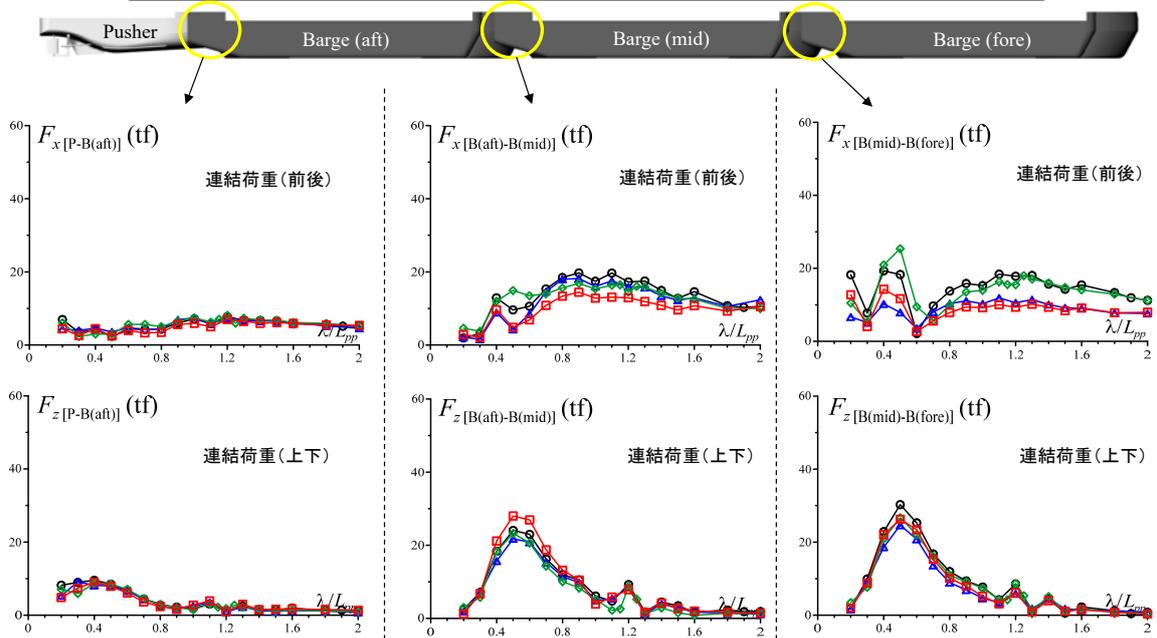
【PFFF】vs【PFFL】vs【PFLF】vs【PLLL】 船速: 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高: 0.72 m (模型:20 mm)



連結部荷重の振幅に及ぼす載荷状態の影響 (波の出会い周波数で変動する1次成分, 波高で除算)



【PFFF】vs【PFFL】vs【PFLF】vs【PLLL】 船速: 8 kt (模型:0.684 m/s), 波高: 0.72 m (模型:20 mm)



◆ 載荷状態の影響は、前後揺れ、延いては前後方向の連結荷重に強く現れる結果となった。前方に配置されるバージの載荷状態に応じた伴流域の形成により、後方に配置されるバージの流入速度が影響を受ける事も一因と考えられる。

8ktで直進する時の連結部における最大荷重の概算

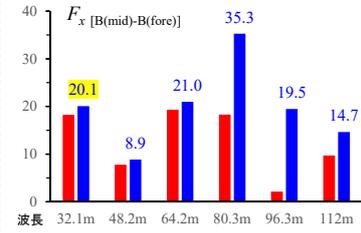
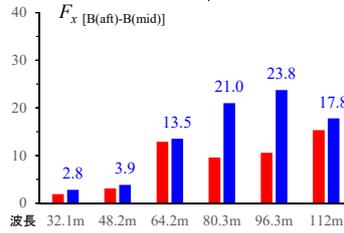
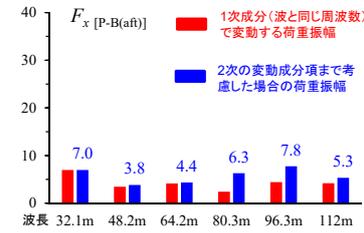
有義波
波長: 19 m
波高: 0.44 m

遭遇し得る最大波
波長: 56 m
波高: 2.5 m

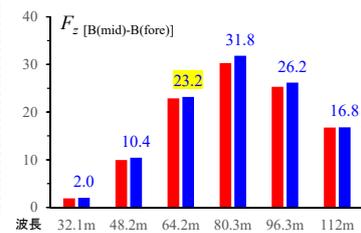
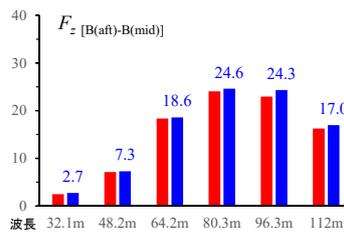
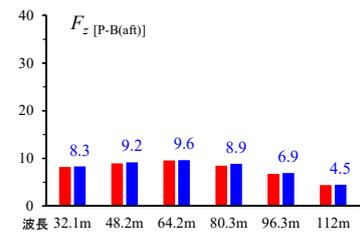
【PFFF】
船速: 8 kt
波高: 0.72 m



連結荷重(前後)の振幅



連結荷重(上下)の振幅



◆ 有義波(波長19m, 波高0.44m)中で動揺する時の連結部荷重を, 最も波長が短い実験データ(波長32.1m, 2次の変動成分まで考慮した荷重振幅)の結果に波高倍率(0.61倍)を掛けて概算すると, 先頭連結部で前後方向に最大『12 tf』程度の振幅で荷重が振動する。(上下荷重振幅は『1 tf』程)

◆ 遭遇し得る最大波(波長56m, 波高2.5m)中で動揺する時の連結部荷重を, 実験データ(波長64.2m, 2次の変動成分まで考慮した荷重振幅)の結果に波高倍率(3.47倍)を掛けて概算すると, 先頭連結部で上下方向に最大『81 tf』程度の振幅で荷重が振動する。(前後荷重振幅は『73 tf』程) 26

本研究の目的

◆ 抵抗性能の評価 (水槽試験)

- ◆ 広島大学曳航水槽で平水中直進試験(抵抗試験)を実施。
- ◆ 全抵抗を計測し, 3次元外挿法により各抵抗成分(摩擦+粘性圧力+造波)を評価。
- ◆ 連結状態, 載荷状態毎に実船の有効馬力を推定。

◆ 規則波中の各船体運動および各連結部に作用する荷重の評価 (水槽試験)

- ◆ 曳航水槽で規則波中直進試験を実施。
- ◆ プッシャーと各バージの縦運動(前後揺れ・上下揺れ・縦揺れ)及び連結部の荷重(前後方向および上下方向)を計測。
- ◆ 波長, 波高, 船速, 載荷状態の影響を系統的に評価。

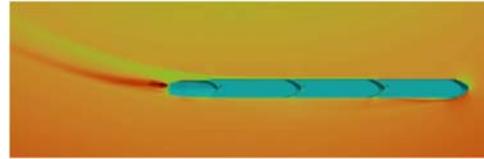
◆ 平水中の操縦運動性能の評価 (シミュレーション計算)

- ◆ 船体, プロペラ, 舵に作用する流体力をCFD計算により推定。
- ◆ 各種係数を同定し, プッシャー・バージの操縦運動数学モデルを構築
- ◆ 操縦運動シミュレーション計算(旋回運動・Zigzag運動)を通じて, 操縦性能を評価。

PB輸送船の操縦性能の推定方法 (1)

① CFD(数値流体力学)計算により、自航 / 運動状態の定常流体力を推定

- フリーソースCFDツール『OpenFOAM』を活用
- 定常乱流解析 / 单相流(自由表面影響は考慮せず)
- 乱流モデル: $k-\omega$ SST (Menter et al. 2003)



◆ CFD計算の概要

- 実験と同じ模型船スケールで実施
- 船体、舵の実形状を考慮。プロペラは、単独特性試験の推力曲線に基づく推力とトルクを体積力として、直径相当の円盤領域に与える方法で考慮。
- 船速は 実船8 kt 相当の0.684 m/s
- 回転数は模型自航点 (実験の造波抵抗を外部入力して、計算時の自航回転数を同定)
- 3連結PB輸送船は5つの載荷状態を計算: PFFF, PFFL, PFLF, PLLL(71%), **PLLL(42%)**
- バージの連結台数を変更したケースも計算: PFF(2台連結), PF(1台連結)
- 4種類の拘束模型試験:
 - 自航試験(自航要素の推定)
 - 舵角試験(直進時、舵に流入するプロペラ後流速の推定)
 - 整流試験(操縦運動時、舵に流入する流れの角度の推定)
 - 斜航・旋回試験(操縦運動時の船体流体力の推定)

28

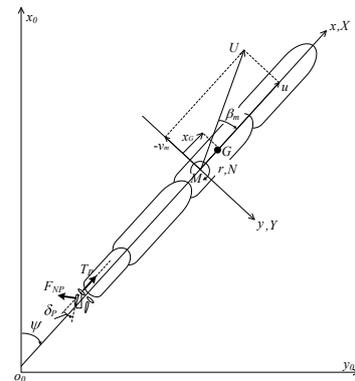
PB輸送船の操縦性能の推定方法 (2)

② PBの航走状態毎に操縦運動を表す力学モデルを構築・シミュレーション

- 船舶の操縦運動数学モデル『MMGモデル』に則り定式化
- モデル内の各種係数は、CFDの流体力データに基づき同定(粘性影響を受ける摩擦抵抗と伴流係数は実船換算)
- 35° 舵角試験, 10° Z試験, 20° Z試験をシミュレーション。

◆ 3自由度(前後、左右、回頭)の運動方程式(モデル)

$$\begin{cases} (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)v_m r - x_G m r^2 = X \\ (m + m_y)\dot{v}_m + (m + m_x)ur + x_G m \dot{r} = Y = Y_H + Y_R \\ (I_{zG} + x_G^2 m + J_z)\dot{r} + x_G m(v_m + ur) = N_m \end{cases}$$



船体流体力: $Y_H = 1/2 \rho L_{PP} d U^2 \{Y'_v v_m' + (Y'_r - m'_x)r' + Y'_{vvv} v_m'^3 + Y'_{rrr} r'^3 + Y'_{vvr} v_m'^2 r' + Y'_{vrr} v_m' r'^2\}$

舵力: $Y_R = -(1 + a_H)(F_{NP} + F_{NS}) \cos \alpha_R$

舵直圧力: $F_{Ni} = \frac{1}{2} \rho A_R (u_{Ri}^2 + v_{Ri}^2) f_a \sin \left(\delta - \frac{v_{Ri}}{u_{Ri}} \right)$

舵流入速(前後): $u_{Ri} = \epsilon u (1 - w_{Pi}) \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left(\sqrt{1 + \frac{8KT_i}{\pi J_i^2}} - 1 \right) \right\}^2 + (1 - \eta)}$

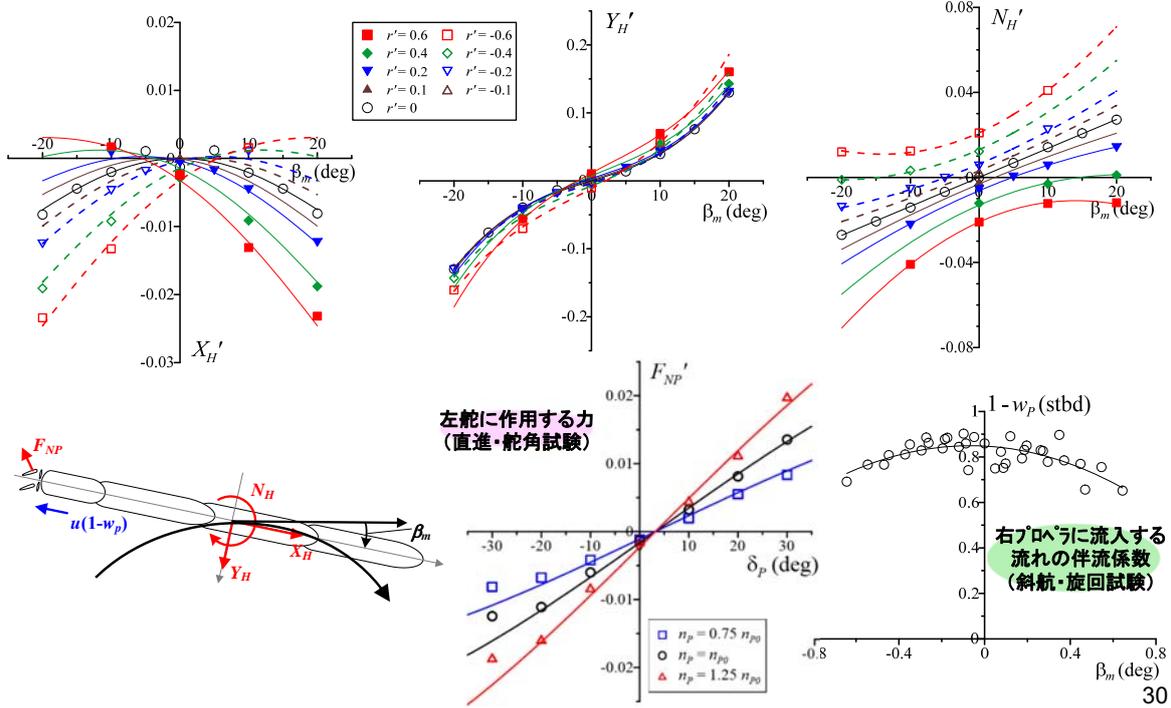
(左右): $v_{Ri} = v_{Roi} - U Y_{Ri} (v_{mi} + l_{Ri} r)$ ($i=P$: port, $i=S$: starboard)

赤字が力学モデル内に現れる実験係数であり、水槽試験やCFD計算の流体力データから同定する必要がある。

29

PFFFの流体力の計算結果(一例)

主船体に作用する力(斜航・旋回試験)



操縦運動数学モデルの実験係数の同定

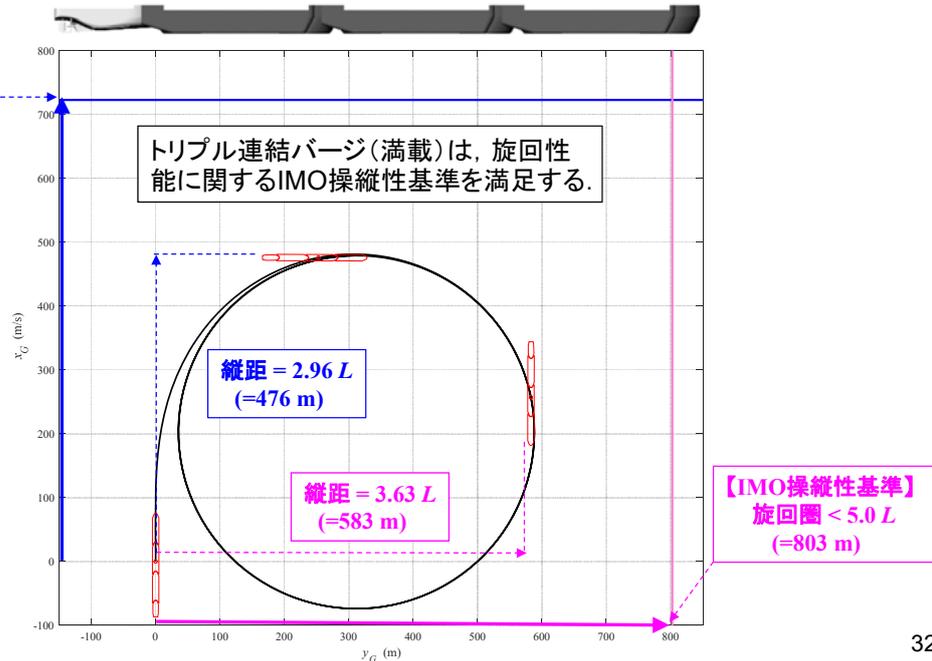
	PF	PFF	PFFF	PFFL	PFLF	PLLL(71%)	PLLL(42%)
(C_D, C_L, C_Z)				(0.256, -0.296, -0.138)			
K	1.050	0.760	0.490	0.570	0.670	0.610	1.088
t_p	0.137	0.101	0.122	0.128	0.122	0.125	0.131
w_{p0}	0.268	0.263	0.151	0.181	0.174	0.168	0.163
C_{wakes0}	0.731	0.725	0.839	0.809	0.815	0.816	0.833
C_{wakes1}	0.068	0.159	0.141	0.138	0.145	0.221	0.142
C_{wakesz}	-0.666	-0.518	-0.397	-0.380	-0.424	-0.628	-0.817
β_{p0}	-0.023	-0.119	-0.101	-0.098	-0.103	-0.110	-0.033
t_R	0.031	0.101	0.019	-0.055	-0.082	-0.012	-0.057
a_H	0.105	0.085	0.073	0.069	0.067	0.091	0.096
x'_H	-0.338	-0.380	-0.402	-0.402	-0.400	-0.409	-0.443
ε	0.990	0.990	1.000	0.990	0.990	0.990	0.990
κ	0.410	0.460	0.450	0.410	0.410	0.420	0.440
γ_{+p}, γ_{-s}	0.458	0.641	0.636	0.613	0.645	0.663	0.771
γ_{-p}, γ_{+s}	0.432	0.287	0.288	0.293	0.329	0.472	0.475
l'_R	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
$\delta_{0p}, -\delta_{0s}$	4.261	3.287	3.183	3.251	3.222	3.321	3.366
X'_{vv}	-0.037	-0.057	-0.070	-0.105	-0.072	-0.074	-0.097
$X'_{vv} + m'_y$	0.162	0.100	0.067	0.058	0.067	0.047	0.027
X'_{rr}	0.002	-0.006	-0.009	-0.011	-0.007	-0.009	-0.005
X'_{vvvv}	0.221	0.068	0.052	0.322	0.142	0.137	0.311
Y'_v	-0.258	-0.201	-0.177	-0.167	-0.165	-0.138	-0.107
$Y'_r - m'_x$	0.022	0.022	0.018	0.025	0.022	0.022	0.025
Y'_{vvv}	-1.854	-1.812	-1.729	-1.411	-1.678	-1.139	-0.589
Y'_{vrv}	-0.427	-0.444	-0.332	-0.019	-0.401	-0.158	0.015
Y'_{rvr}	-0.348	-0.401	-0.360	-0.263	-0.387	-0.241	-0.139
Y'_{rrr}	-0.002	-0.005	0.004	0.006	-0.008	-0.004	-0.003
N'_v	-0.133	-0.101	-0.078	-0.058	-0.064	-0.039	-0.004
N'_r	-0.047	-0.036	-0.031	-0.023	-0.030	-0.025	-0.020
N'_{vvv}	0.028	-0.004	-0.014	0.061	-0.038	0.028	0.032
N'_{vrv}	-0.159	-0.285	-0.295	-0.211	-0.326	-0.193	-0.118
N'_{rvr}	0.032	-0.005	-0.015	0.013	-0.032	-0.004	0.014
N'_{rrr}	-0.006	-0.007	-0.012	-0.009	-0.015	-0.007	-0.003
m'_x	0.0072	0.0038	0.0023	0.0023	0.0023	0.0019	0.0006
m'_y	0.181	0.118	0.091	0.077	0.077	0.052	0.023
J'_z	0.0078	0.0057	0.0048	0.0041	0.0041	0.0030	0.0015

PFFFの舵角35° 旋回運動シミュレーション

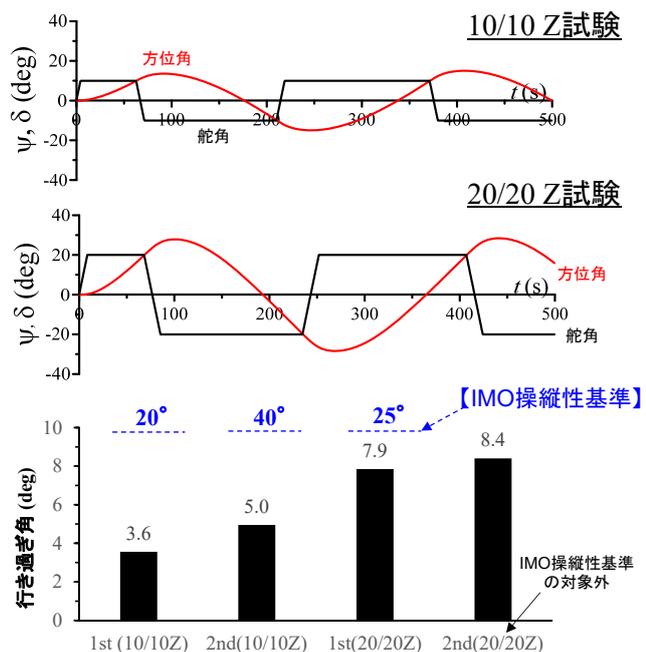
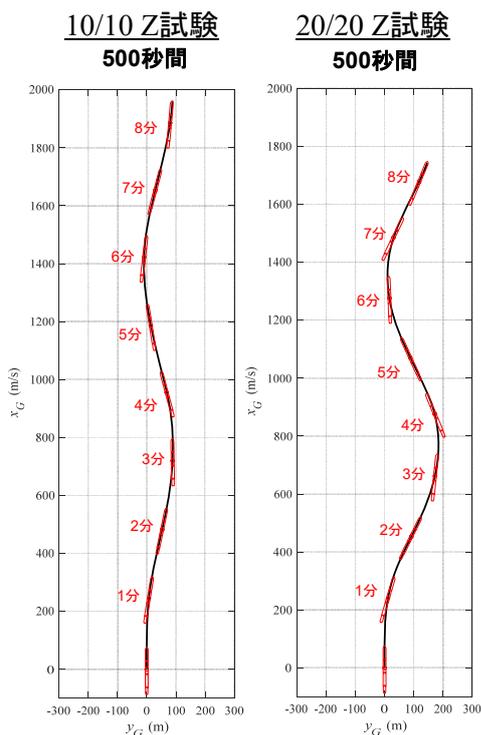
IMO MSC 76/23, Resolution MSC.137(76), Standards for Ship Manoeuvrability, Report of the Maritime Safety Committee on Its Seventy-Sixth Session-Annex 6, (2002)

- ◆ 100 m 以上の船舶あるいはケミカル運搬船に適用
- ◆ 深水域, 平水中, 満載状態, 等喫水, およその常用速力の90%以上 ※今回は『8 kt』で評価

【IMO操縦性基準】
縦距 $4.5 L$
(=722 m)

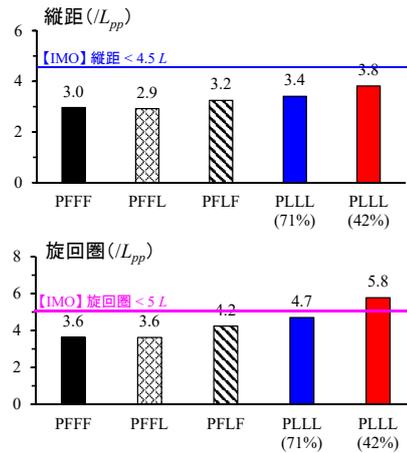
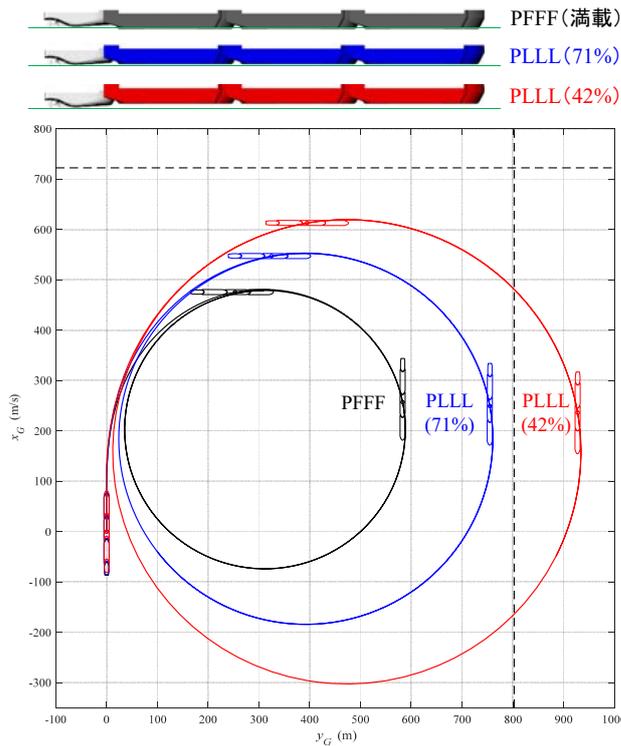


PFFFのZigzag運動シミュレーション



- ◆ トリプル連結バージ(満載)は, 針路安定性(保針性)に関するIMO操縦性基準を満足する.

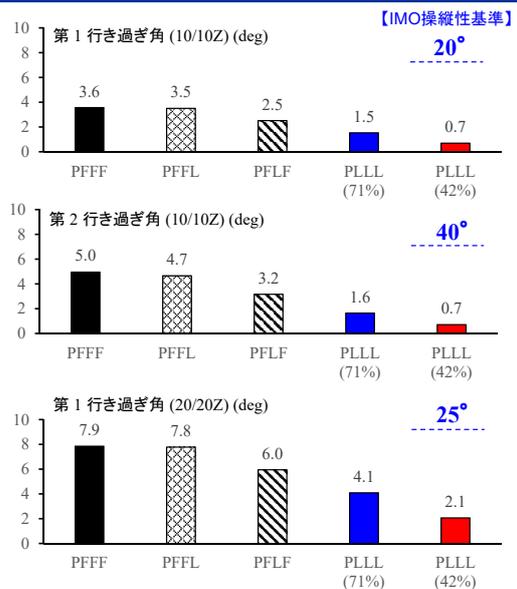
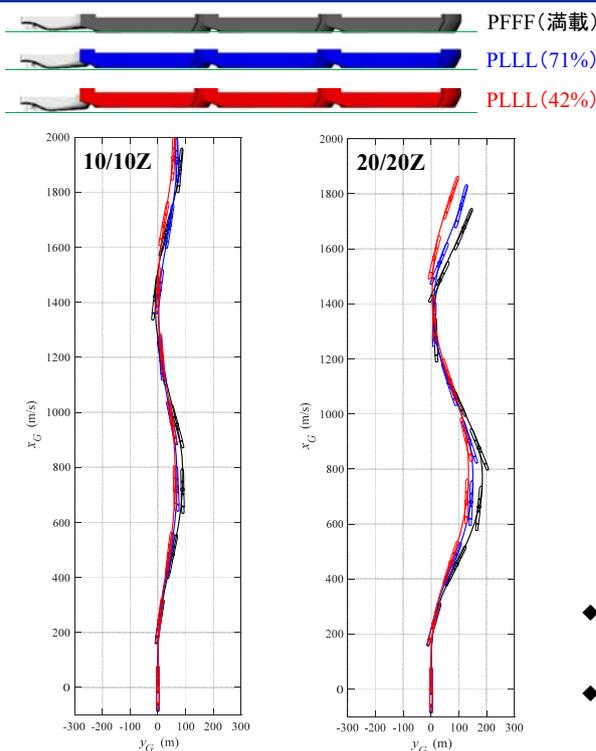
旋回性能に及ぼす載荷状態の影響



- ◆ 軽荷状態になる程、旋回径が大きく旋回性能は劣る。
- ◆ 3つのバージのいずれも、満載排水量の42%しか貨物を積載しない場合(PLLL42%)、旋回圏がIMO操縦性基準を超える恐れがある(そもそも満載状態を対象とした基準を為、あくまで参考指標)。
- ◆ 軽荷状態でバージの喫水が浅くなるほど、PB輸送船の船船底からプッシャーが突き出る様相となる為、尾翼効果が強まり運動が発達し辛いからと解釈できる。
- ◆ 混載時、軽荷バージの位置により旋回性能に差がある。

34

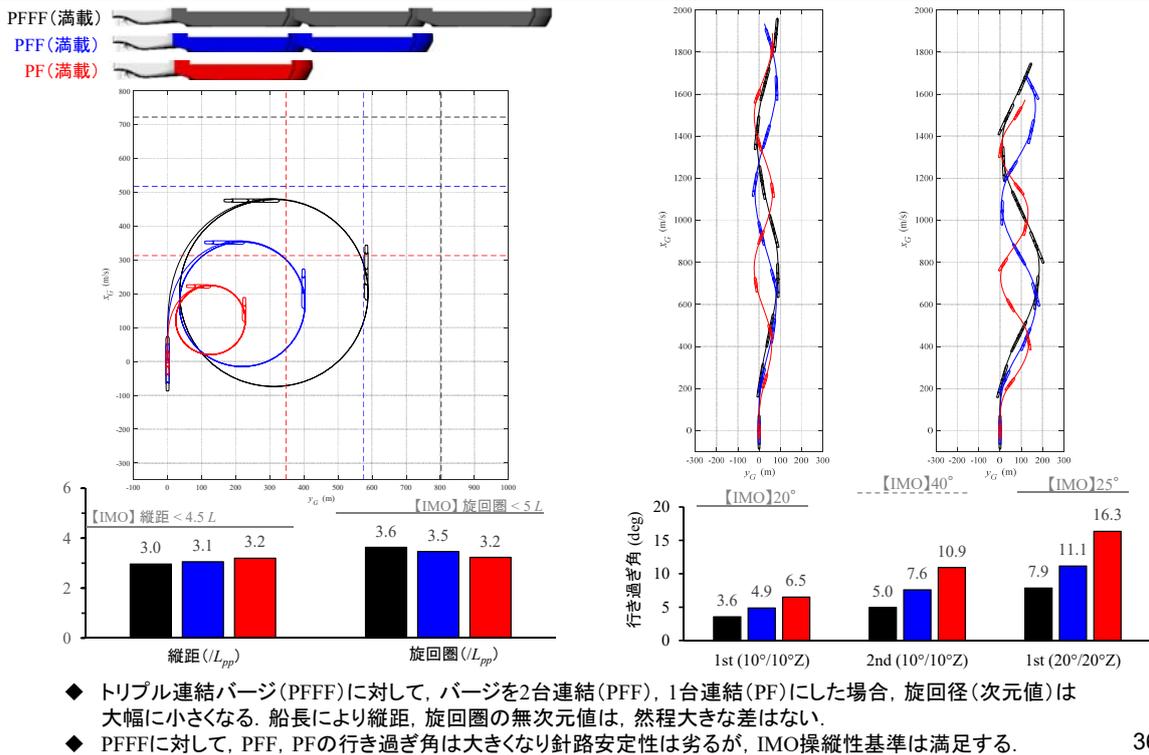
針路安定性(保針性能)に及ぼす載荷状態の影響



- ◆ 操舵時の方位角の行き過ぎ角(オーバーシュート角)は、満載、軽荷、混載状態のいずれも行き過ぎ角に対するIMO操縦性基準は満足している。針路安定性に問題は認められない。
- ◆ 行き過ぎ角は軽荷状態においてより小さい傾向にあり、針路安定性能に優れる事が分かる。同性能は、運動の発達し易さという点から、旋回性能と一般にはトレードオフの関係にある。

35

操縦性能に及ぼす連結バージ数の影響



36

本研究成果のまとめ

- ◆ 抵抗試験を実施し、PB輸送船の船体抵抗を計測した。
 - ✓ 粘性圧力抵抗の観点から、バージの連結台数を増やす方が単位輸送量当たりの有効馬力は低減する。しかし多連結にするほど連結部が増える為、そこで圧力変動が生じて造波、延いては造波抵抗が増大し易い点には留意が必要である。
- ◆ 規則波中直進試験により、船体運動ならびに連結部加重を計測した。
 - ✓ 今回の想定海域の波浪条件(有義波)は、トリプル連結バージの長さに対しては短波長域に当たり、瀬戸内海の有義波高は高くない為、船体動揺は然程顕著ではない。トリプル連結バージの場合、端部のブッシャーと先頭バージが相対的に揺れ易い。
 - ✓ 連結部の荷重は、連結部を挟んだ船体の重量と船体運動と相関がある。特に重たいバージが動揺する先頭の連結部において、大きな荷重が作用し易い。
 - ✓ 大きな波高の中では船体運動の増大に比例して連結部荷重の変動振幅も増大する。但し波高により無次元化した荷重振幅は、波高によらずほぼ一致する。
- ◆ CFDにより操縦運動時の流体力を推定し、力学モデルに基づき、巡回・Zigzag運動シミュレーション計算を実施した。
 - ✓ トリプル連結バージ(満載)の巡回性能および針路安定性(保針性能)は、IMOの操縦性基準を満足する。満載のまま連結台数を減らした場合も一連の操縦性能は問題ない。
 - ✓ 軽荷状態になるほど針路安定性が顕著に良くなる傾向にあり、裏を返すと運動が発達し難い状態である事から、巡回性能は悪化する傾向にある。特にバージの排水量を満載状態の42%まで減少させた場合、満載時と比較して巡回航跡が大分大きくなる恐れがあり、操船にあたり注意を要する。

37

今後の課題

- ◆ 連結部機構はPB輸送船を成り立たせる核心技術である為、強度設計に必要な連結部荷重のデータの蓄積が重要である。不規則波中や斜波中、更には波浪中の操縦運動時など、複雑な連成運動が起こるより厳しい状況下での検討が望まれる。(左右荷重や捻り荷重の評価を含む)
- ◆ PB輸送船は、各船体間の相対横揺れは許容されていない為、一体となって横揺れが生じる。バージの連結台数を増やすと、船幅は変わらず長さだけが伸びるが、一般に縦に細長い形状は横メタセンタ半径が小さい事から、横波中の横揺れの復原性の評価も望ましい。

添付資料 5

トリプル連結バージ

- ・ 自律運航バージの遠隔操縦システム

トリプル連結バージ

～自律運航バージの遠隔操縦システム～



一般財団法人 **日本船舶技術研究協会**
JAPAN SHIP TECHNOLOGY RESEARCH ASSOCIATION

1

2023年度の調査内容



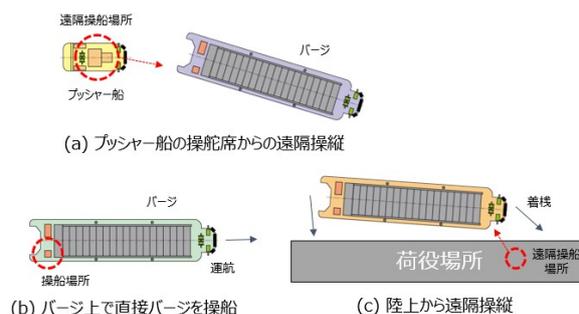
- 2022年度の調査内容に基づき、自律運航バージの遠隔操縦システムについて資料を取りまとめた。

主な調査内容

- ① 模型船による遠隔操縦システムの基本性能確認
- ② 実海域における通信予備試験
- ③ 操船シミュレータの活用方法についての調査

船-船通信手段の候補と特徴

No.	通信手段	特徴・備考
1	Wi-Fi	<ul style="list-style-type: none"> ● 陸上で広く使われている無線LAN機能である。 ● リピータ機能（アクセスポイント間通信）を利用できる。 ● 状況により異なるが、陸上業務用機器では、300～2000mの距離の通信が可能である（要確認）。 ● 無線LANの電波強度は法律で規制されている。
2	LTE (4G)	<ul style="list-style-type: none"> ● スマートホンや携帯電話用の通信規格である。 ● プッシュャー船およびバージ（あるいは荷役場所）にインターネット環境を構築することによって、遠隔操縦が可能となる。 ● インターネット接続の安定性やVPN等の接続方法、セキュリティ対策について確認が必要である。



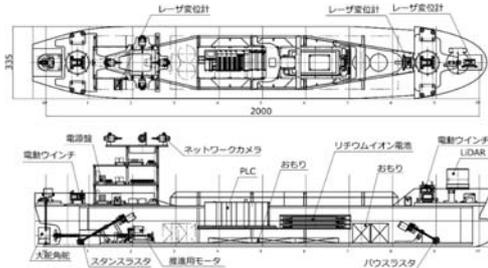
バージ操船コンソールの場所と操作

2

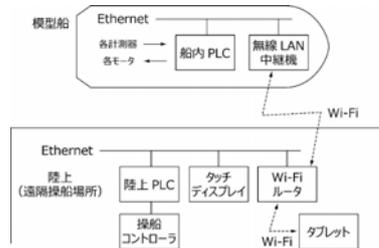
模型船による遠隔操縦システムの基本性能確認



- 海技研が所有する既存の模型船を用いて、Wi-Fi機器の基本性能を確認した。
- 船と陸上との通信状態を監視するライフ信号機能について検討し、動作を確認した。



模型船の基本構成



遠隔操縦システムの基本構成



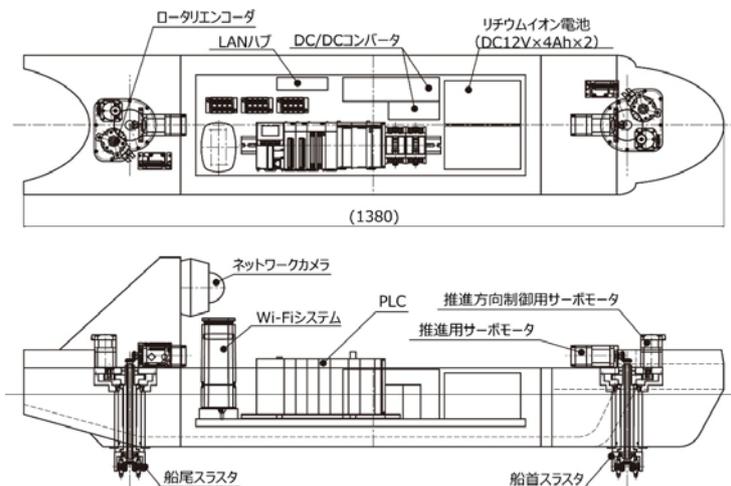
通信状態監視機能の概略

3

模型船による遠隔操縦システムの基本性能確認



- 本事業のバージ船は船首・船尾にポンプジェット式スラスタを装備することとしており、通常の模型船では遠隔操縦による操船感については判断できない。
- 今後実施される実海域実験に先立ち、遠隔操縦システムを含めた模型試験を行う計画である。



模型バージの概略（詳細は検討中）

4

実海域における通信予備試験

- 海技研が管理する小型実験船「神峰」を用いて、因島マリーナの浮き桟橋周辺において、Wi-Fi機器の通信試験や産業用タブレットによる遠隔操船試験を行った。



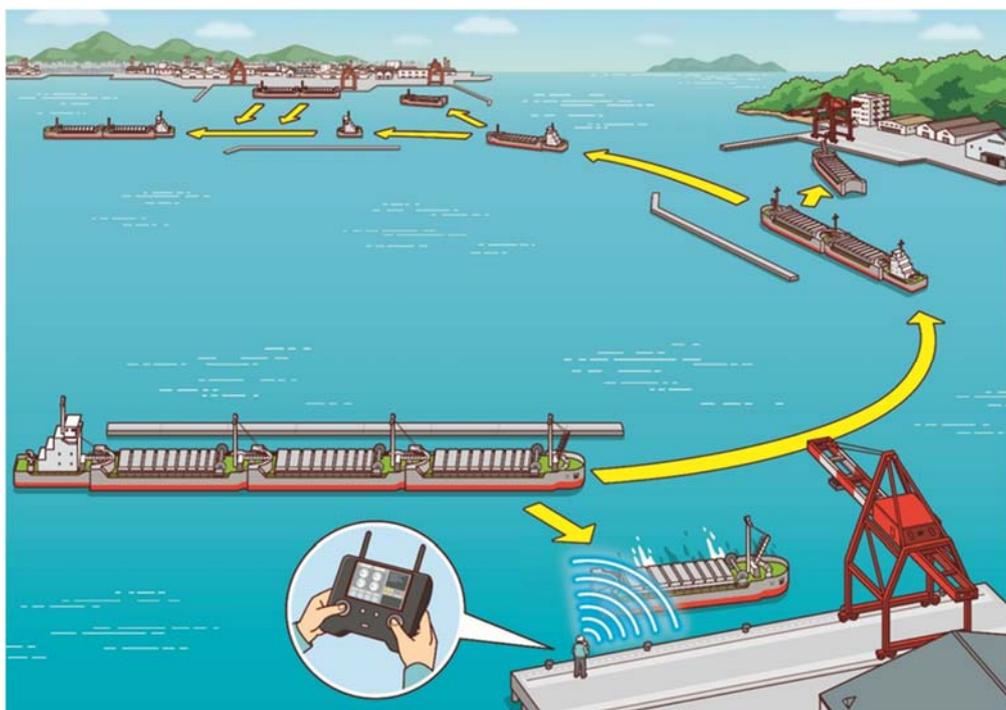
小型実験船「神峰」



試験海域

5

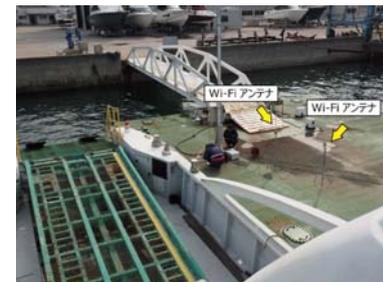
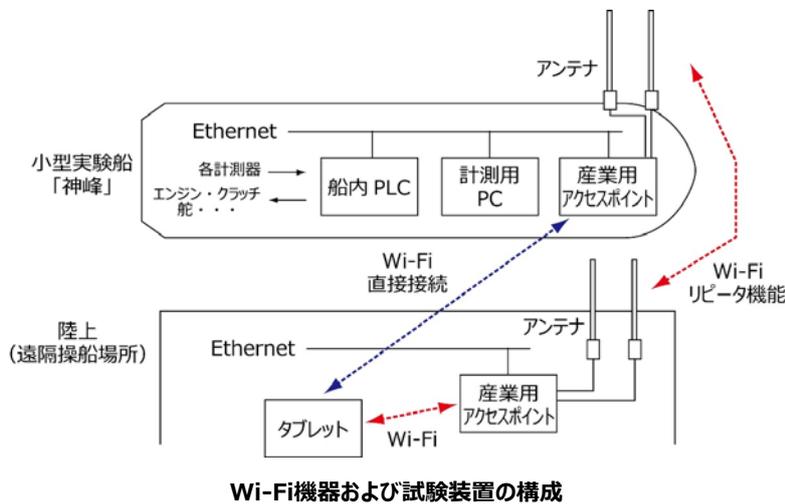
実海域における通信予備試験



6

(1) Wi-Fi機器および試験装置の構成

- 屋外で使用できる産業用アクセスポイントを設置し、リピータ機能を利用した通信を構築する（下図赤線）。
- 比較のため、リピータ機能を利用しない通信においても通信状態を計測する（下図青線）。



Wi-Fiアンテナ

7

(2) 計測項目

- 通信条件を4条件に変えて、本船位置と陸上操船場所（浮き桟橋）との距離に対する受信信号強度RSSI（Received Signal Strength Indication）と通信遅れ（Ping応答時間）を計測した。

RSSIの目安

RSSI	品質
-30~-61 dBm	Excellent
-63~-73 dBm	Good
-75~-85 dBm	Fair
-87~-97 dBm	Poor

- ✓ 無線接続の品質を表す指標であり、数値が大きいくほど無線接続が良好である。
- ✓ メーカー資料には、2.4GHzの場合、-65dBm以上であれば十分な通信速度が得られ、-75dBm以下では接続が不安定になる場合があるとの記載がある。

Ping応答時間の目安

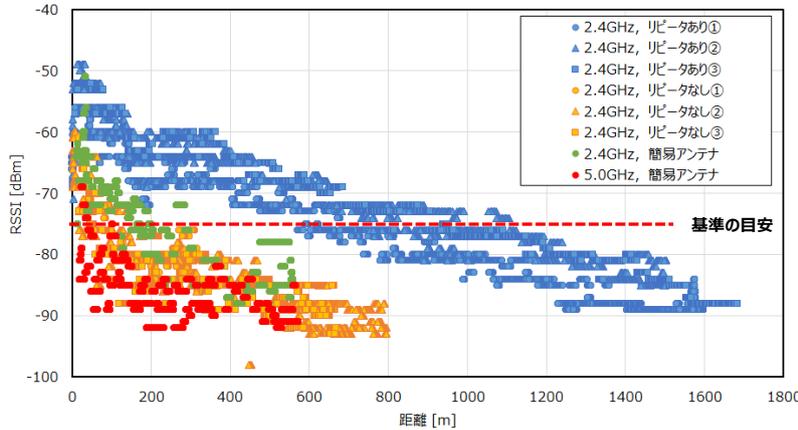
Ping応答時間	品質
15 ms以下	かなり速い
16~35 ms	速い
36~50 ms	普通
51~100 ms	遅い
101 ms以上	かなり遅い

- ✓ 機器の制御に用いる場合の目安は不明である。
- ✓ 動画視聴やオンライン会議の場合、30ms以下であれば快適、50ms程度までが許容範囲と言われている。

8

(3) 受信信号強度RSSIの試験結果

- リピータ機能と高性能アンテナを用いた場合、最大1600m程度の距離まで通信可能であるとの結果が得られた。
- ただし、通信遅れの増大や瞬時の通信遮断を踏まえると、安心して遠隔操縦できる距離は1000m程度である。



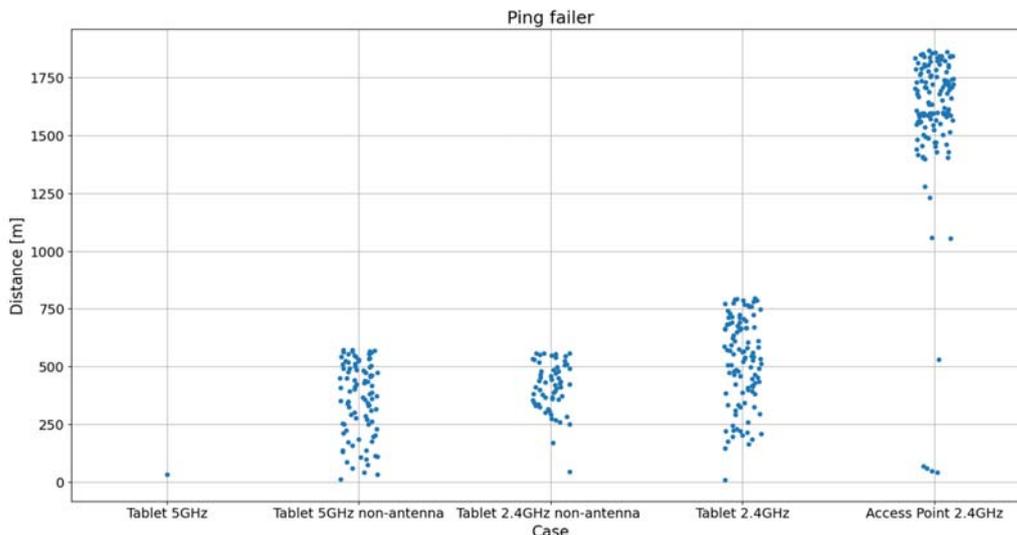
通信確認試験の結果



リピータ機能と高性能アンテナを用いた場合の電波強度RSSI

(4) Ping失敗プロット

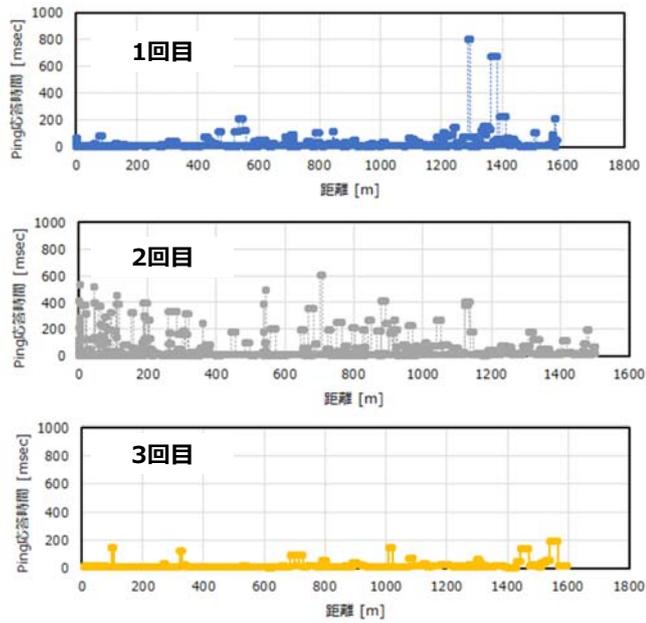
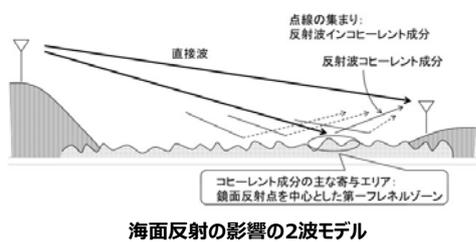
- リピータ機能と高性能アンテナを用いた場合、他の試験条件と比べて、Pingを失敗した際の距離は長く、安定した通信ができる。



Ping失敗プロット

(5) Ping応答時間の試験結果

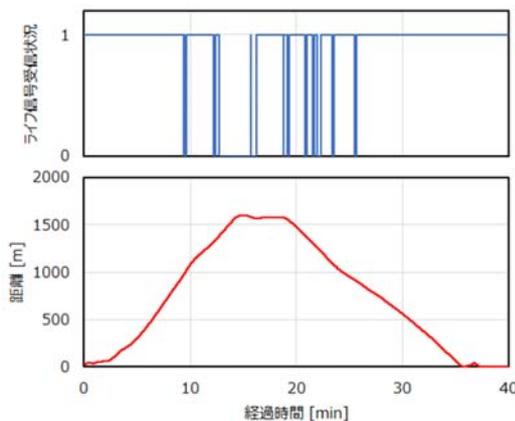
- 右図は、リピータ機能と高性能アンテナを用いた場合のPing応答時間の計測結果である。
- 同一の通信条件において3回の計測を行っており、Ping応答時間の傾向に違いが見られる。
- この原因は明確ではないが、Wi-Fi使用時の周囲状況などが影響を受けている可能性があり、注意が必要である。



Ping応答時間の計測結果

(6) 通信状態監視機能の確認と安全対策

- 模型試験と同様、タブレットからWi-Fi機器を介して船内PLCに対してライフ信号を送信し、船内PLCでその受信状況を確認した。
- 通信が遮断された場合、画面表示と音声による警報が発令する機能、船内PLCによる非常停止機能は適切に動作した。



通信状態監視機能確認試験



通信遮断時のタブレット画面

(7)実海域予備試験のまとめ

- ① 数百mを超える遠隔操縦においては、産業用アクセスポイントの**リピータ機能と高利率アンテナ**の設置が有効である。リピータ機能と高利率アンテナにより、1000m程度の距離まで安定した無線通信が可能であることを確認した。
- ② Wi-Fi機器を用いた通信においては**電波強度と通信遅れが重要**であり、受信信号強度RSSIの数値だけで通信状況を判断するのは難しいことがわかった。
- ③ 遠隔操縦システムには**通信状態を確認する機能**が必要不可欠である。通信状態を確認する方法としては、操船端末機から本船側の制御器にライフ信号を送る方法、操船端末機が本船との通信状況を監視して通信異常時に画面および音声によって警報を発令する機能などがあり、それらの有効性を確認した。
- ④ 遠隔操縦システムには**通信異常時の安全対策**の機能が必要不可欠である。本試験においては、操船端末機から本船側の制御器に送るライフ信号が途絶えた際、本船を停止させる方法（非常停止を発令し、アスターン操作によって最短距離で本船を停船させる方法）が有効であることを確認した。
- ⑤ 本船が遠隔操縦場所から300m程度以上離れると視認がしづらくなり、本船のおおよその状態は確認できるものの、他船との位置関係や見合い関係がわからなくなる。そのような状況で遠隔操縦を行う場合、電子海図やレーダなどの航海機器の情報を遠隔操縦場所に共有するシステムが必要となり得る（**航海情報の共有**）。

13

操船シミュレータの活用方法についての調査

- 自律運航バージの遠隔操縦システムを実現するための操船シミュレータの活用方法について調査した。

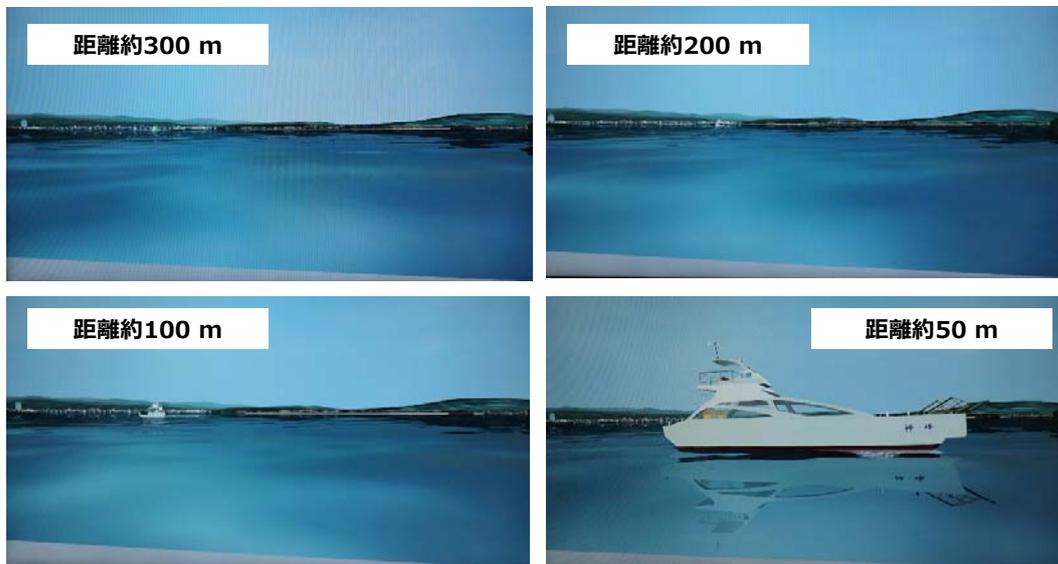
操船シミュレータの活用方法

No.	活用方法	備考
①	操船特性の確認	<ul style="list-style-type: none"> ● 連結型プッシャーバージ船の操船特性を確認できる。 ● 適切な運動モデルを導入する必要がある。 ● 仕様上、ポンプジェット式スラストの機能を正確にシミュレートすることは難しく、バージ単独の操船特性を確認するのは難しい（要確認）。
②	他船からの見え方の確認	<ul style="list-style-type: none"> ● プッシャーバージ連結時の他船からの見え方などを確認できる。 ● 連結型プッシャーバージの3Dモデルを準備する必要がある。
③	操船者視点の確認	<ul style="list-style-type: none"> ● 陸上またはプッシャー船からバージを遠隔操縦する際の操船者の視点（見え方）を確認できる。
④	システム開発利用	<ul style="list-style-type: none"> ● ジョイスティック操船やタブレット操船など、装置の使いやすさや動作を確認しながらシステム開発を進めることができる。 ● 安全対策機能を確認できる。

14

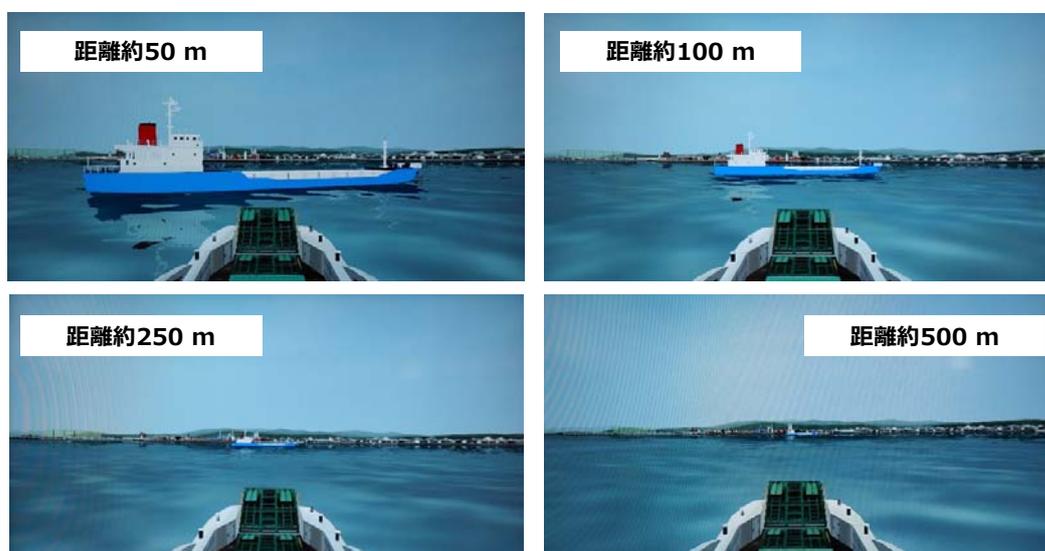
(1) 陸上遠隔操縦場所から小型実験船を遠隔操縦

- 海技研が所有する簡易式の操船シミュレータを用いて、③操船者視点を確認した。
- 上記の実海域予備試験に類似させ、陸上の視点を見ながら遠隔操縦をした。



(2) 全長約65mの貨物船の見え方

- 小型実験船「神峰」の操舵席から、全長約65mの貨物船を見ているときの画面である。



(3) 操船シミュレータ活用のまとめ

- 操船シミュレータは任意の視点を設定でき、遠隔操縦システムの初期検討に有効である。
- 海技研の簡易式操船シミュレータには、PLC等が既に接続されているため、操船のしやすさを踏まえたデザインにするなど、装置の使いやすさなどを確認しながらシステム開発を進めることができる。



任意の視点から小型実験船を操縦している様子
(高さ20m、距離約50mの船上を想定)

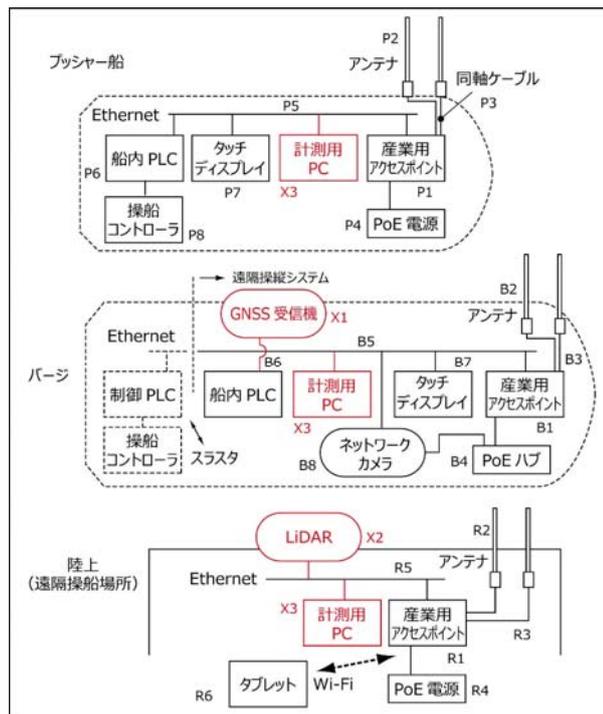


操船シミュレータによるタブレット操船

実証実験用バージの遠隔操縦システムの設計

- 上記の実海域予備実験の結果などを踏まえて、実証実験のための機器構成を詳細に検討し、自律運航バージの遠隔操縦システムに関する資料を作成した。
- 実証試験においては、詳細な位置計測などのデータ取得のための装置が必要となり得る（右図赤色）。

- ※ 右図のプッシャー船に記載している機器は、プッシャー船上からバージを遠隔操縦する際の機器である。
- ※ 右図のバージに記載している遠隔操縦システムは、別途設置されるスラスト制御機器と通信する（詳細は未定）。



実証実験用バージの遠隔操縦システム

添付資料 6

内航船の船内作業の電化・自動化に関する研究



一般社団法人
内航三ライ研究会

ガット船へのマテリアルハンドラー導入について
—内航船の船内作業の電化・自動化に関する研究—

2024/3

1. 調査の目的

世界的な脱炭素化が進む中、国内も2050年のカーボンニュートラル実現に向け官民をあげた取組みが進められている。外航海運については、既に国際海事機関で検討されているが、国内物流を支える内航海運については、検討がはじまったばかりであり、国土交通省の検討会・日本財団のZERO EMISSION 2050を受け、内航カーボンニュートラル実現の環境整備が今後進められる予定である。

環境整備の一つである安全基準は、外航大型船の条約基準をベースに内航船基準（小型船）の整備を進めているが、大型船前提の基準適用が困難なことを踏まえリスク評価、シミュレーション等により同等安全証明（安全評価）した場合は代替設計が可能となっている。しかしながら、カーボンニュートラル実現に向けた技術の導入実績が少ない中、内航船建造の小型造船所が安全評価を行うのは困難な状況にあり、499GT級等の内航太宗船の代替燃料化のための新コンセプト船に必要な代替設計承認のための安全評価の実施はさらに困難な状況にある。

このため、内航船のGHG排出量の2～3割を占める荷役などの航海以外の作業の電化・自動化に関する技術資料の作成を行うことで、これらに関する技術の安全評価手法を構築し、もって内航カーボンニュートラルの実現に向けた環境整備の一助とすることを目的とする。

2. 調査の流れ

(1) ガット船へのマテリアルハンドラー導入に関する技術資料の作成

既存ガット船船主、乗組員との勉強会による実情調査ならびにニーズ抽出
電化・自動化に向けた機種選定
導入における課題、解決策について
ガット船への実搭載に向けた概念設計
遠隔操縦装置の概念設計

(2) 補足資料

ケミカルタンカー等の船内作業の電化・自動化に関する技術資料の作成
ケミカルタンカー等の船内作業の作業分解
船内作業の合理化に関する資料の作成

2

3. (1) ガット船へのマテリアルハンドラー導入について

内航貨物船（液体、粉体貨物除く）として荷役設備が設置されている船舶（ガット船）は、搭載されている荷役装置には、ガットクレーンを採用しているのがほとんどである。ただし、このガットクレーンは、岸壁での荷役において多様な品物（石などから砂利まで幅広いバラ荷物）を扱えることから、荷主のニーズを満たすものである一方、船舶内でのガットクレーンの操作者（ガット士）は熟練の技が必要となることから、人員の不足が顕著となっており、その人員の育成や代替手段の選定などの課題解決が求められている。



実際の荷役の様子（勉強会メンバーのガット船荷役状況）
<https://www.youtube.com/watch?v=kHtZJq4yHrQ>

3

4. 電化・自動化に向けた機種選定

「操作が簡単」「可能なら遠隔など外部からの操作も検討したい」
これらのニーズと併せ、GHG削減に向けた取り組みとして、**電化・自動化が可能となる設備**を新たに選定し、荷主が現状と同等もしくはそれ以上に満足する、船側の設備及び操作者の満足度にも貢献する荷役設備



バックホウ



マテリアルハンドリングマシン

- 内航ガット船の平均的な1500トン～2400トン（499G/T～749G/T型）の荷役および荷役時間が現状よりも大幅に変わらないこと、
- 操作が簡単（慣れに頼ることなく一定の研修で操作が可能）
- 電化・自動化の拡張性が期待されること。

選定したマテリアルハンドリングマシンの実船への搭載模様

<https://youtu.be/MSjsaNhGVBE?si=4tQmQQj8MIUGIsN6>

4

5. 導入における課題・解決策について

選定したマテリアルハンドリングマシンの見学時における所感

機種の耐久性/メンテナンス性

- 年次検査については不要である（コスト減）
- メーカー推奨の交換部品関係はあり。
油圧系統（ホースなど）は運転500時間
- 各種部品のリードタイムは48時間を全世界標準
- 駆動エンジンの換装目安 15000時間
※国内のガットクレーンと同等。
- 電化に関して、荷役関係はエンジン駆動。
※アーム収納などのトラブル時はモーター駆動可
- 配電盤の塩害対策について懸念あり
※国内ガットクレーンは室内（運転室）に配置

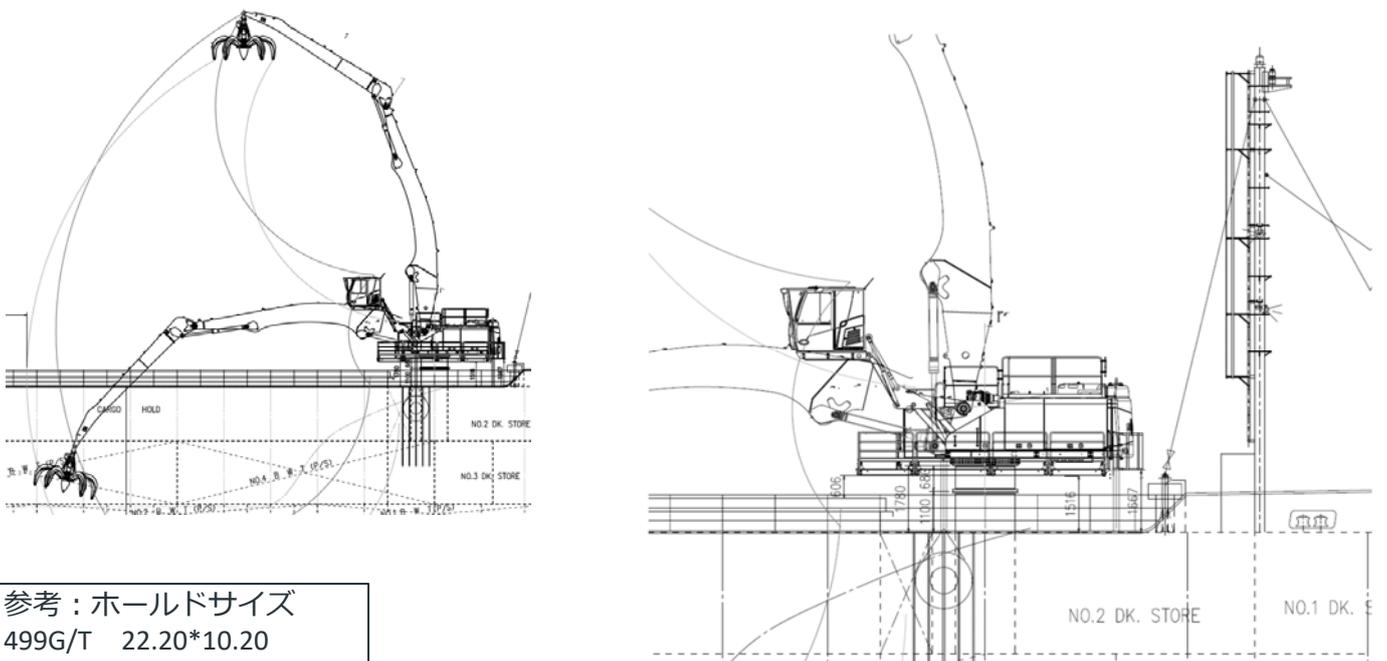
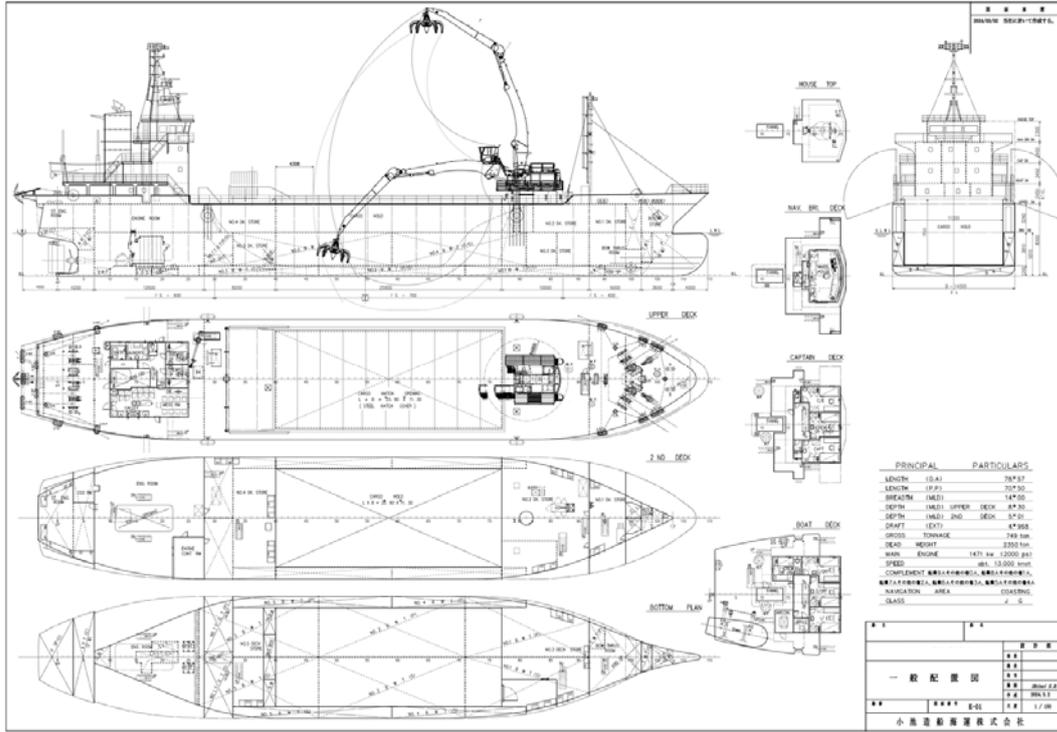
操作者による見学コメント

- コクピットにおける操縦姿勢は安定感がある
- 視認性についても非常に開けており目視による操作・安全確認が十分にできる。
- ガットクレーンにおいては、船体動揺を利用して、クレーンのバケット操作をしているが、本体の駆動のみで操作を行う為、操作とクレーン、バケットが直感的に操作でき、安定性や確実性、簡易性が期待できる。
- バケットの揺れを気にしないでよいということは、船体のホールド内への衝突リスクも減る為、船体のメンテナンス頻度も減ることが想定される。



5

6. マテリアルハンドラーを導入したガット船の概念設計



参考：ホールドサイズ
499G/T 22.20*10.20
749G/T 25.90*11/30

7. 遠隔操縦装置の概念設計

遠隔操縦については、何よりもまず、安全が確保されているか、の検討が第一であることを前提に、ここでは、誰がどこで遠隔操作するのか、機器の概念についてまとめた。

遠隔操作に関して

- **操作者が船員、船内から**
船員労働安全衛生規則第28条の規定が適用。
3か月以上の経験および、船員は6か月以上の従事経験が必要
※船員資格者の場合はほぼ要件クリア。
- **操作者が一般作業員、船内から**
乗組員以外が船内設備を操作するという行為が、どのルールが適用されるか不明
- **操作者が一般作業員、船外から**
陸上においては、車両系建設機械運転技能講習（設置運搬積み込みおよび掘削講習資格）にて、約1週間の講習にて資格取得。

機器の概念について

陸上の建設機械施工（遠隔操作の油圧ショベルと有人ダンプトラックとの協調作業時の安全ルールの検証）における現場検証を実施している、ARAV株式会社殿へのヒアリングを指針としてベンチマーク。

これらは、実際の現場検証実施によるものであり、船舶での遠隔化においても同等の安全対策の検討材料としては有用なものであると考える。

次ページにて詳細。

7-1. 建設機械における遠隔操縦装置の現場検証

- **エリア区分、逸脱防止関連**
操作範囲の定義、逸脱の検知手段（カメラなどの活用）、逸脱時の操作（原則停止）検知手段の信頼性・冗長性（監督者が非常停止できること）
- **障害物検知関連**
検知可能範囲、検知性能、識別性能、デジタルツイン上の衝突検知、機械本体の危険状態の検知
- **非常停止関連**
非常停止の有無・手法の確立、非常停止機能の信頼性・冗長性（通信方法）、事象発生から停止までの時間（0.15秒）、非常停止状態と復旧方法（インターロックなどの解除方法、手段）
- **操作停止関連**
操作停止の有無・手法（遠隔運転から操作停止を可能）、操作停止機能の信頼性・冗長性、事象発生から停止までの時間（0.135秒）、停止状態と復旧方法
- **通信関連**
無線通信の種類（メッシュWIFI+（光回線 OR STARLINK OR 5G/4G/LTE）、通信の安定・異常の検知方法（デバイス同士の通信状況監視）、異常発生から停止
- **その他**
回転灯による状態表示、現場の音声連絡通信手段、対象建機のエリア内への人間の入退場の手段、不具合時の対処方法（非常停止スイッチ押下後人間による実機確認）エリア変更時の方法・手段（関係者への共有）

7-2. 建設機械の実例紹介

ARAVのソリューション 遠隔操作 概要

ARAV



0.7 油圧ショベル
CAT320



日野 2t ダンプ
XZC600T-TWFM



操縦席



アタッチメント



ARAVのソリューション 遠隔操作 通信

4G、LTE等のインターネット回線または独自の通信環境を使用して、
重機を遠隔操作可能です。

導入事例：東京-佐賀間

距離 約 1141 km
遅延 約 0.3 秒
重機 油圧ショベル



8. (2) ケミカルタンカー等の船内作業の電化・自動化について

内航ケミカルタンカー等（ケミカル製品、油製品）についても先述のガット船とは異なった観点で、船内作業の多くが人の手でまだ行われていることから、合理化への取り組みは勿論、乗組員の安全対策についても併せて検討を行った。

本船へのバンカリング作業

一般的な荷役作業よりも作業項目が多い為。

タンククリーニング作業

船体や配管の構造上、最後の仕上げ工程が人間の手間作業となっており、かつケミカル製品の場合、健康に害を及ぼす可能性がある物質もある為、安全確保の観点も加味して。

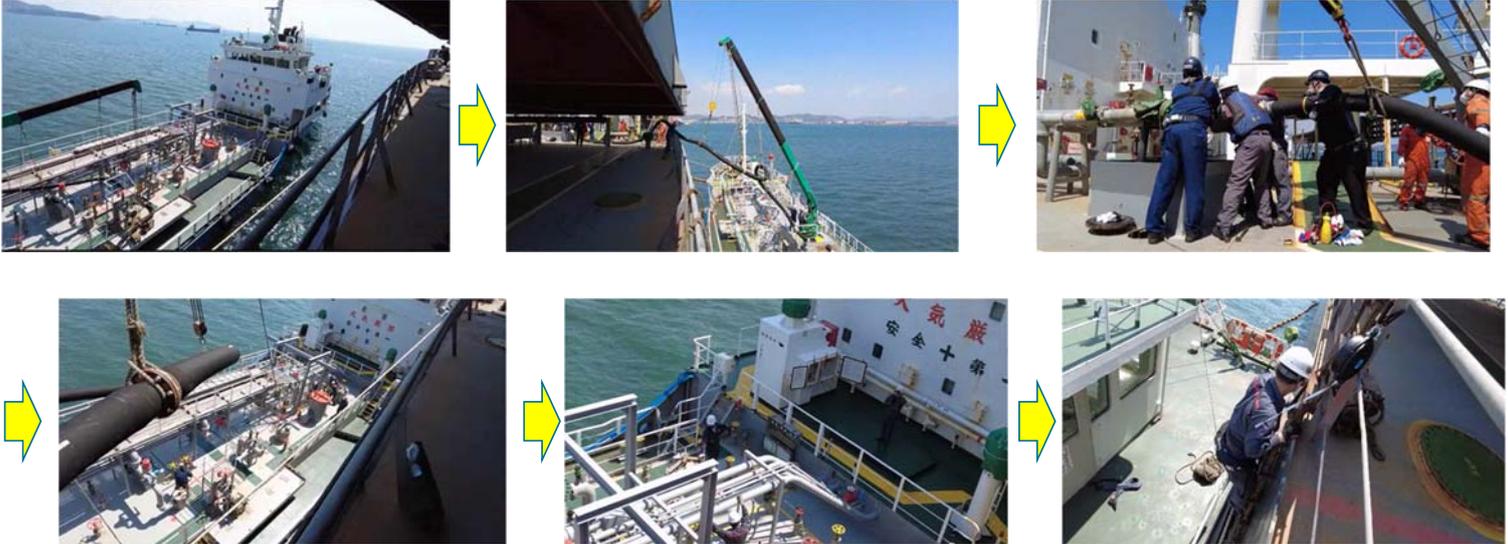


20万DWTのケープサイズバルカーへの本船バンカー作業の実例を紹介。



9. ケミカルタンカー等の船内作業の実例

陸上に接岸した状態での荷役よりも、海上同士での接岸作業をはじめ、高所への移動や乗組員総員での作業など作業項目の多さ、人力による作業、確認の多さがある為、労働負荷は勿論、作業ミスを許さない緊張感が多くある。



12

10. ケミカルタンカー等の船内作業の合理化について

勉強会内部でのアンケート実施
※以下は回答数が多かったものをピックアップ

船内作業における大きな課題は何ですか
荷役監視作業の労務負荷
バルブ、ポンプ操作の複雑化

課題を解決する為に導入したいと思う機器は何ですか
バルブの遠隔操作システム
荷役情報の船陸間共有システム
荷役ポンプ駆動の作業簡素化システム

陸上で使われている機器で船で使いたい機器や仕組みで導入したいものはありますか？
カメラシステム
タブレット



電子機器を導入するにあたり、タンカーについては**防爆機器**の選定が必須となる為、防爆についての検討を進めた。



今回の調査で国内においては上記の利用が可能ではあることが判明した。ただし、非常に高価であることから、積極的な導入における動機付けが必要であると推測される。

13

1 1. 本研究のまとめ

(1)ガット船へのマテリアルハンドラー導入に関する技術資料の作成

現在ガット船における各種課題解決および将来的なGHG削減の一つとなりうる、今回の研究で選定したマテリアルハンドラー機器について、実際の操作者となる乗組員からも、その荷役の**簡易性と安全性の両立**について、大きな期待を持てるとのコメントがあった。

現在運用されているガットクレーンは、設備の信頼性の高さ、大量の荷役に適している為、そのニーズは継続する一方、今回検討を進めたマテリアルハンドラーが、上記に示した課題解決の一助になりうる機器であることが考察される。また、並行して遠隔操作による概念を取り入れることにより、省力化、省人化、安全性の確保へのアプローチを可能とし、設備との親和性を検証し、安全のリスクアセスメントを確保していくことで、その導入においても大いに期待できる結果であると考えます。

本研究の課題としては、日本国内において、当該選定製品を搭載するにあたり、**船級における確認事項を残している**が、安全性への配慮を第一義とすることを前提としてのアプローチをしっかりと行うことでその道筋にも期待ができると考える。

(2)ケミカルタンカー等の船内作業の電化・自動化に関する技術資料の作成

今回合理化の一つとして選定した、タブレットの活用についてであるが、現在にとって標準的な電子機器を有効活用することは、タブレットが本来持つ「簡易性」「情報共有」などを高度に実施することが期待され、省人化は勿論であるが、**属人化されずに統一した品質**での作業が行えるのではという期待も大きくあり、その導入についても大いに期待をしたいと考える。

ご静聴 ありがとうございました。



一般社団法人
内航ミライ研究会



この報告書は日本財団の助成金を受けて作成しました。

内航カーボンニュートラルの実現に向けた新技術の安全評価手法の構築
2023年度 成果報告書

2024年（令和6年）3月発行

発行 一般財団法人 日本船舶技術研究協会

〒107-0052 東京都港区赤坂2丁目10番9号 ラウンドクロス赤坂

TEL 03-5575-6428 FAX 03-5114-8941

URL <https://www.jstra.jp/> E-mail info@jstra.jp

本書の無断転載、複写、複製を禁じます。