



第24回 海上技術安全研究所研究発表会  
2024年7月26日



# 自動運航船がもたらす未来の描像 ～自動運航船プロジェクトチームの研究開発～

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  
自動運航船プロジェクトチーム  
間島 隆博

- 自動運航船PTの研究ビジョン（背景、研究方針、具体的テーマ、体制）
- **自動化システムの技術開発**
  - 小型実験船「神峰」
  - OZTによる自動避航システム
  - 自動離着岸へのLiDARの応用
  - タブレットによる短距離遠隔操船システム
- **安全性評価技術の開発**
  - リスク解析技術
  - 総合シミュレーションシステム（FTSS、SHS）
- まとめ

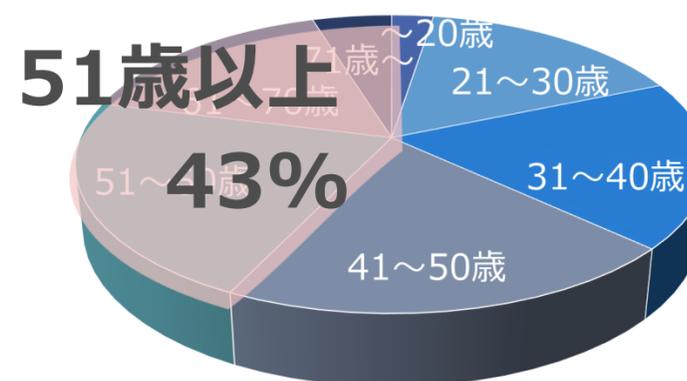
# 自動運航船PTの研究ビジョン（背景、研究方針）



## 社会的背景

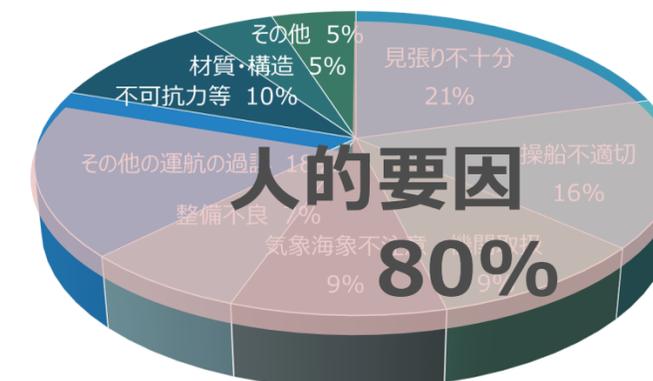
内航船員の高齢化・人手不足、および、海難事故（人的要因）低減に向け、DX（AI）により飛躍的に進展した自動化技術を船舶分野に取り入れ、自動運航船の普及を実現する。  
そのため、以下を実施。

内航船船員の年齢構成



船員労働統計調査  
国土交通省(2022年)から作成

海難事故原因別割合



海上保安レポート  
海上保安庁(2021年)から作成

## 自動運航船PTの研究方針

### ■自動化システム(航海関係)の技術開発

#### 関係機関との連携

- 大学・研究機関
- 民間企業

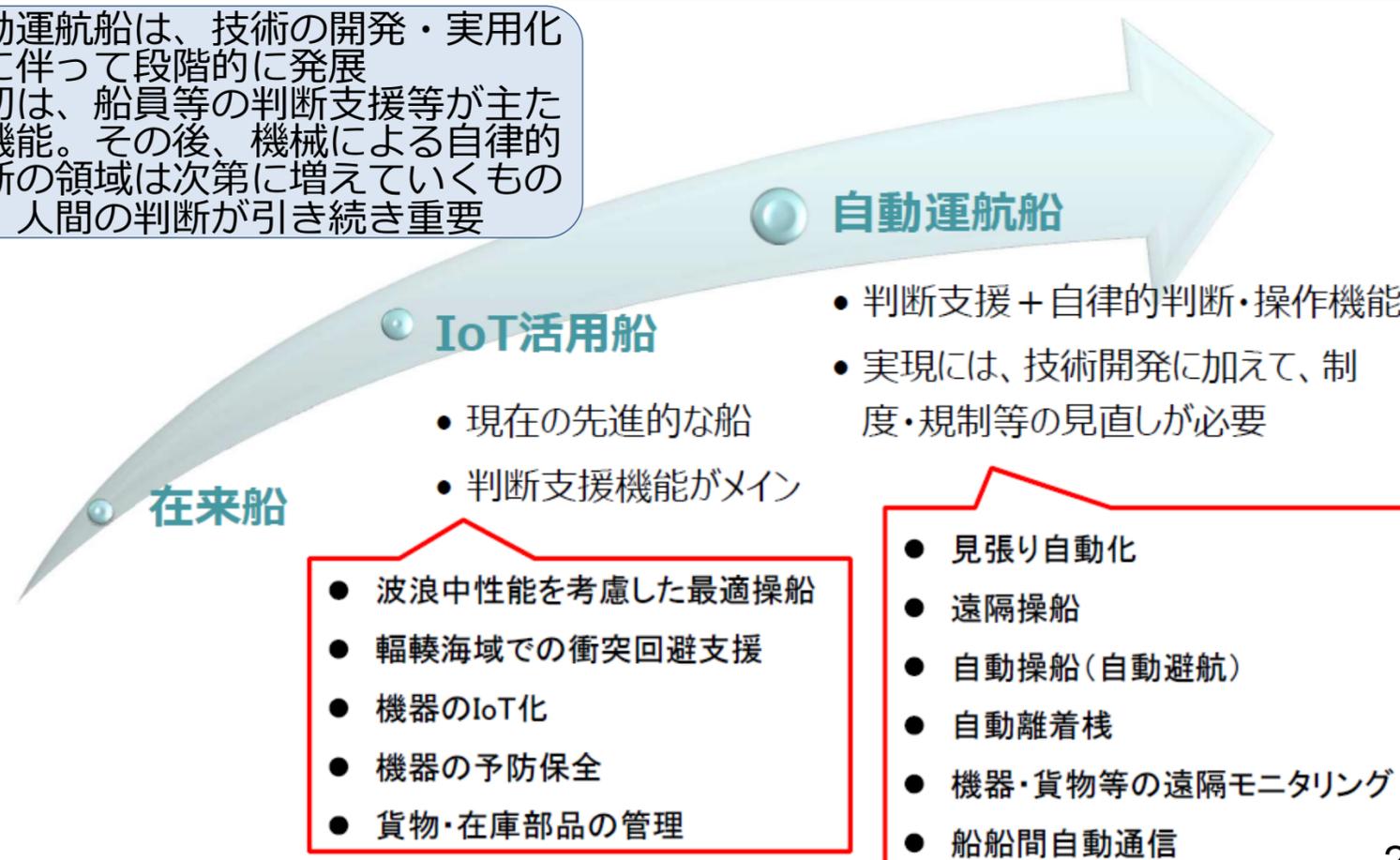
### ■安全性評価技術の開発

#### 関係機関との連携

- 行政機関
- 船級協会
- 国際機関

技術開発と自動運航船の発展  
(国交省資料)→  
『自動運航船に関する現状等(H29)』から抜粋

- 自動運航船は、技術の開発・実用化等に伴って段階的に発展
- 当初は、船員等の判断支援等が主たる機能。その後、機械による自律的判断の領域は次第に増えていくものの、人間の判断が引き続き重要



## 具体的な研究テーマ、実施体制

### ■ 自動化システム(航海関係)の技術開発

- ・ 状況認識機能
- ・ 避航操船機能
- ・ 離着棧機能
- ・ 遠隔監視・操船機能

### ■ 安全性評価技術の開発

(MEGURI2040 安全性評価事業にも関連)

- ・ リスク解析技術
- ・ シミュレーション技術

### 海上技術安全研究所の役割（社会実装）

開発技術の実用化、普及

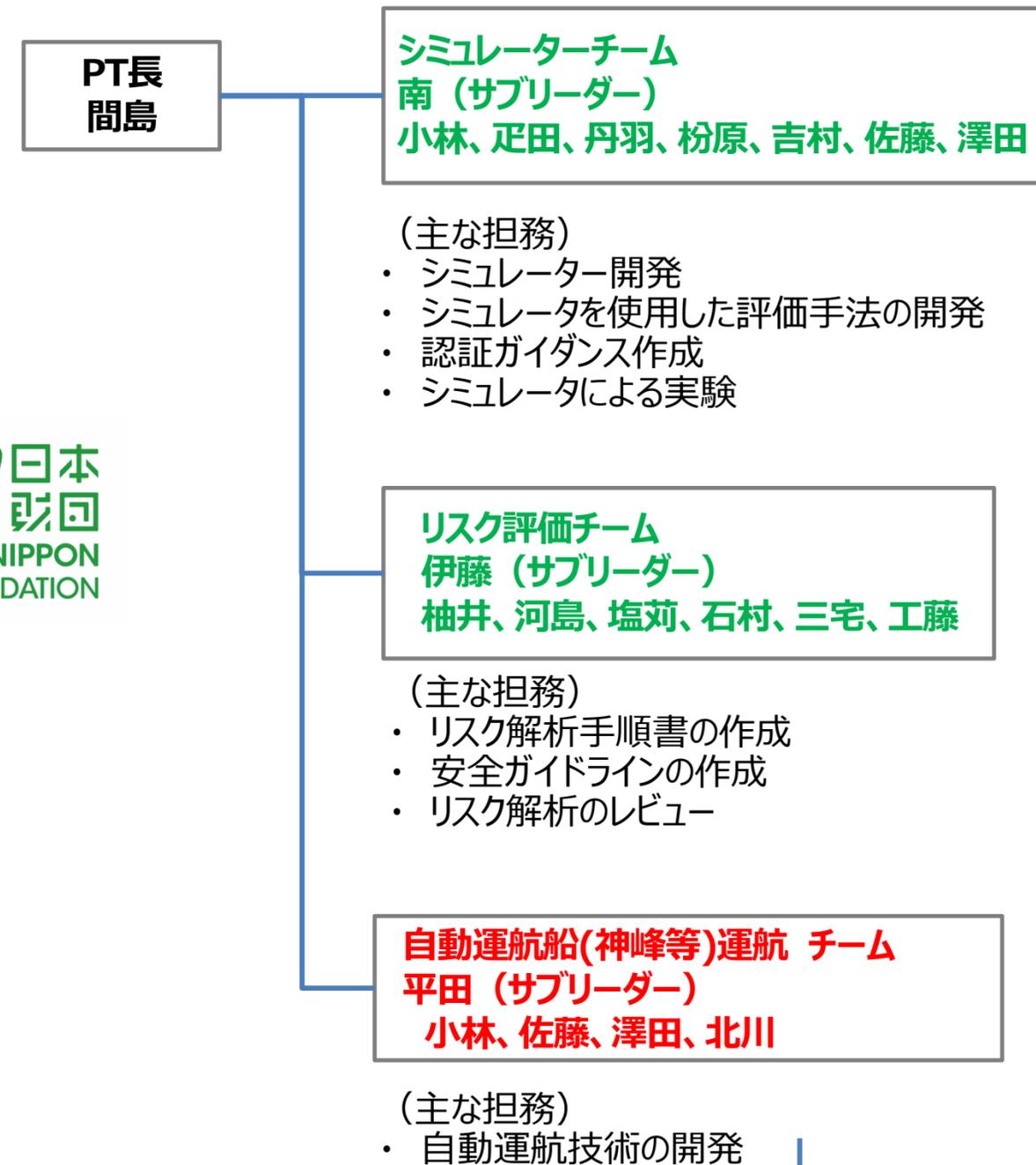
公的機関・第三者機関としての規格、規準の作成等

無人運航船プロジェクト

MEGURI  
2040



## ■ 研究実施体制

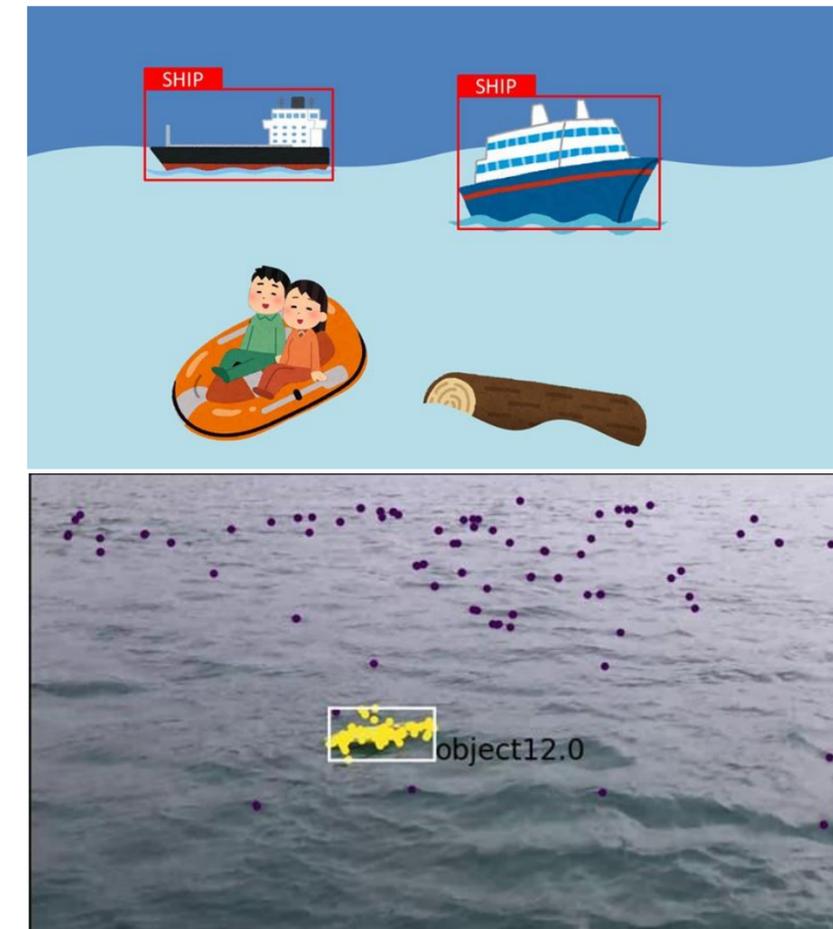


## 小型実験船「神峰」による実船実験

- OZTによる自動避航システム
- 自動離着棧へのLiDARの応用
- タブレットによる短距離遠隔操船システム

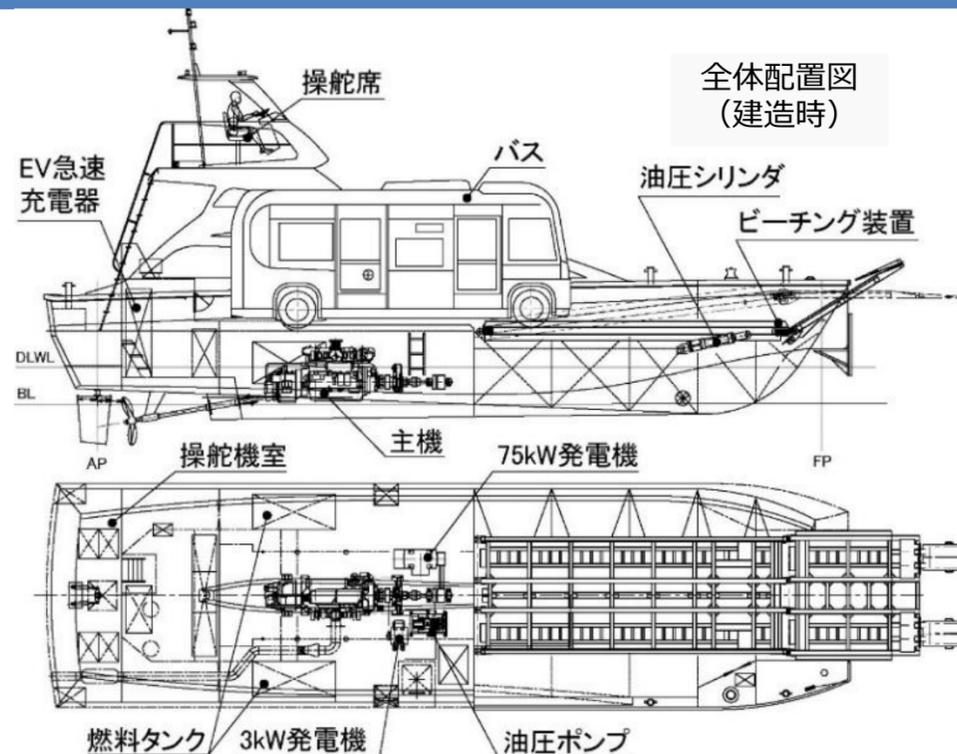
### 【関連ポスターセッション】

- PS 15 : 小林  
船上カメラによる浮遊障害物検出の研究開発
- PS 16 : 佐藤  
変動OZTを元にした避航アルゴリズムの研究開発



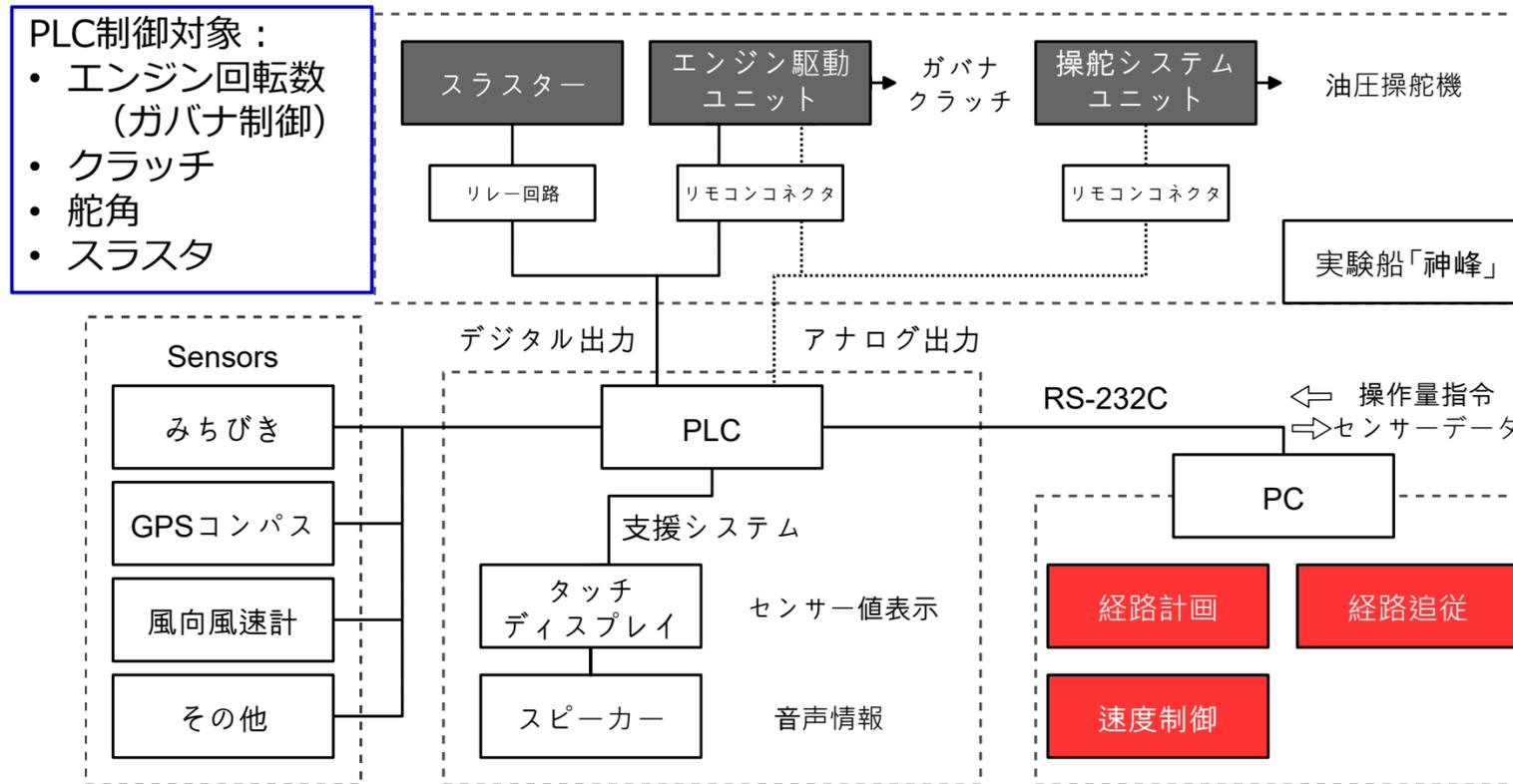
# 自動化システム（航海関係）の技術開発

## 小型実験船「神峰」



**船体制御システムの構成**  
 PLC(Programmable Logic Controller)を中心とした制御システムを構築  
 →PCから操船可能

主要目	値
全長[m]	16.5
垂線間長[m]	14.9
登録幅(1.0WL) [m]	4.38
型深さ[m]	1.50
計画喫水[m]	0.70
プロペラ直径[m]	1.0
プロペラ翼形状	MAU
試験時トン数（推定） [ton]	21.535

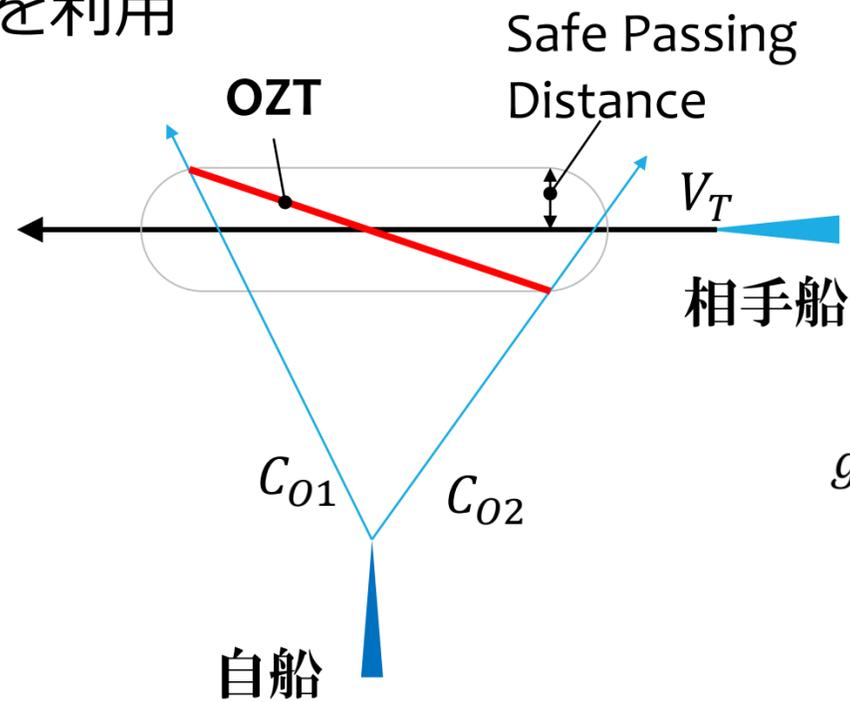


# 自動化システム（航海関係）の技術開発

## 自動避航操船システム（新手法）



- 避航操船システムに相手船による航行妨害  
ゾーンOZT : Obstacle Zone by Target  
を利用

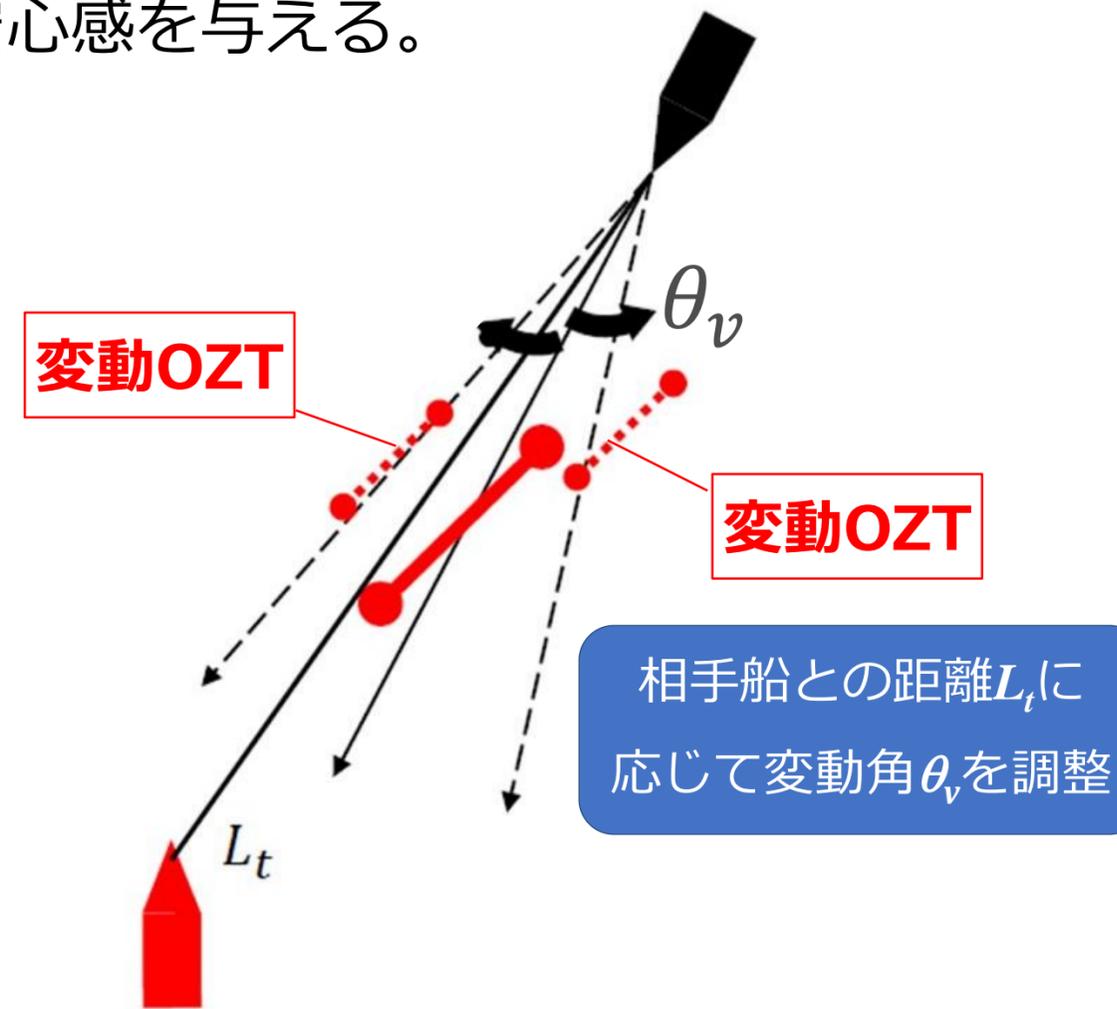
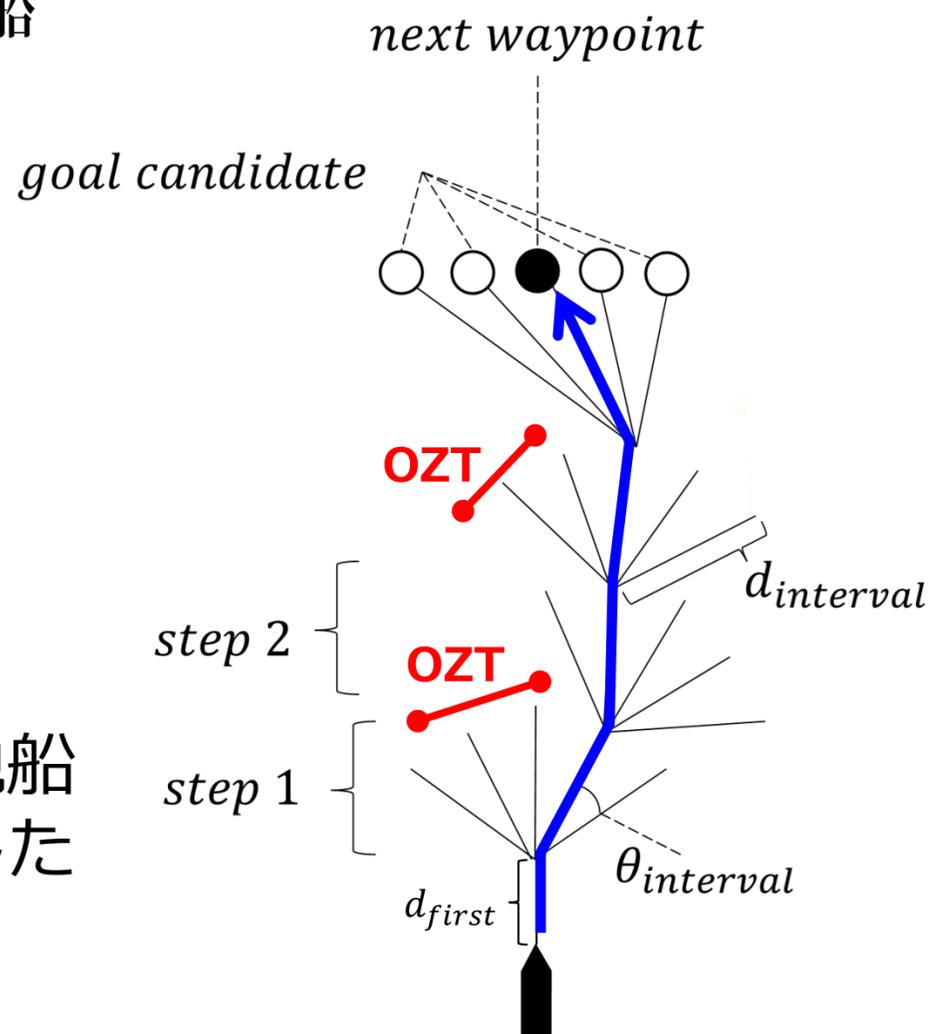


未来の自船、他船  
の状態も考慮した  
避航経路

- 相手船の将来行動を考慮するために、OZTに、相手船の変針の影響を加えた

**変動OZT**を考慮した避航アルゴリズムを開発。

→ 早めに大きく迂回することにより、  
相手船に安心感を与える。

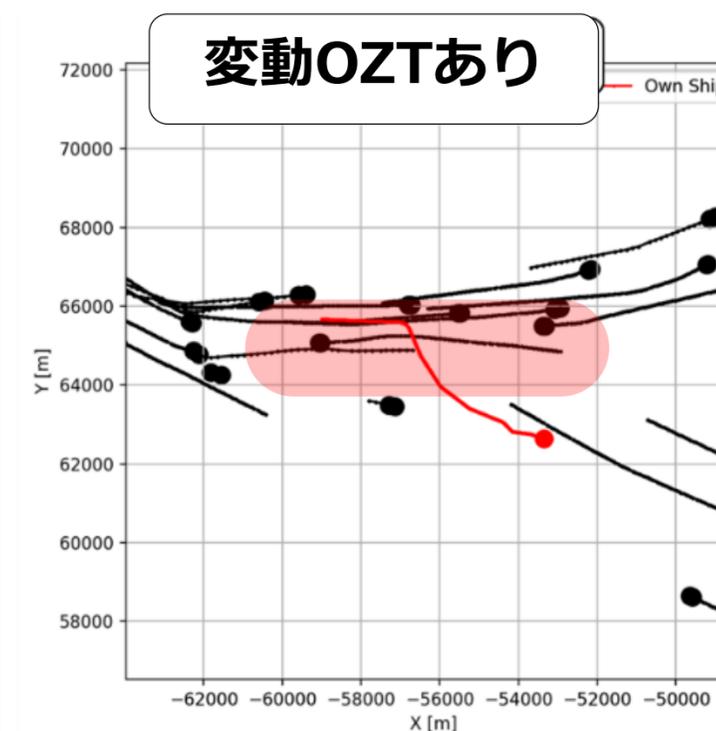
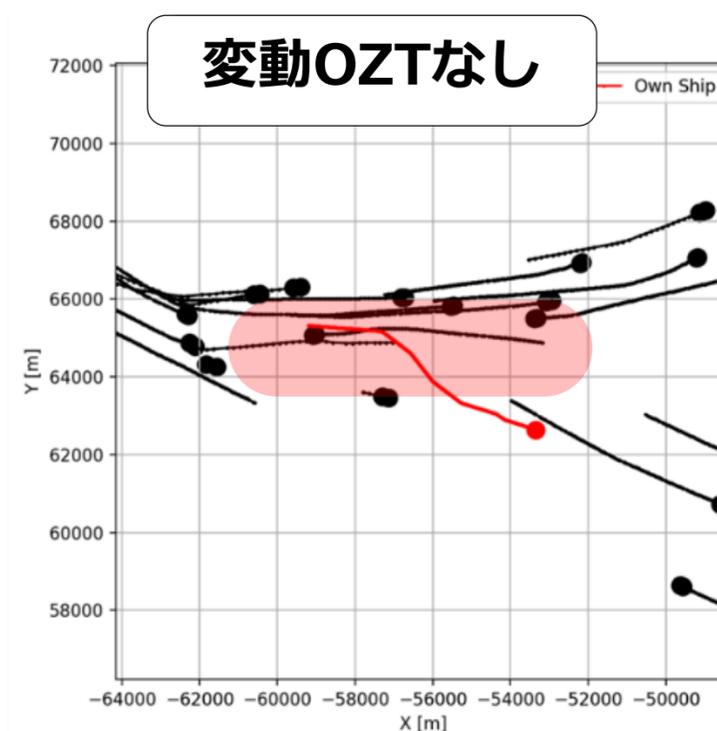
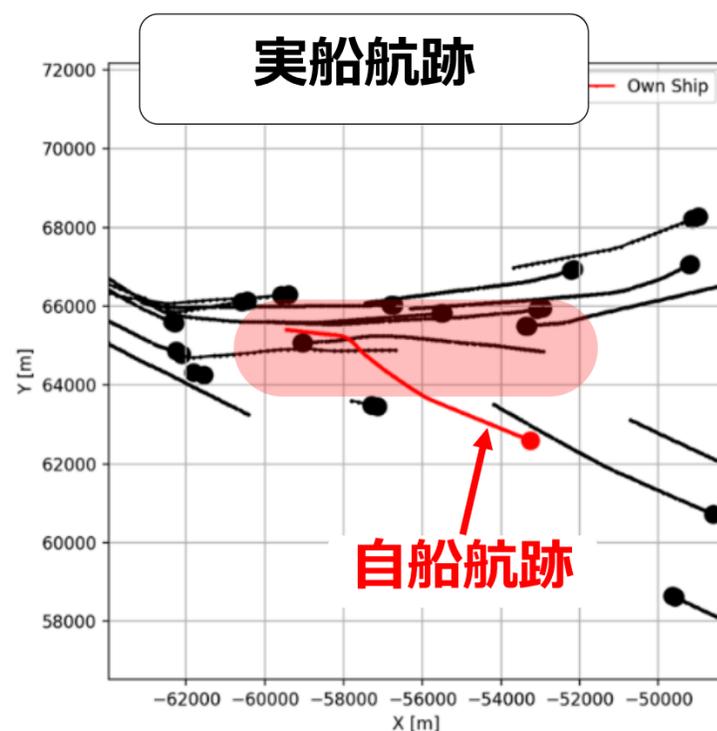


# 自動化システム（航海関係）の技術開発

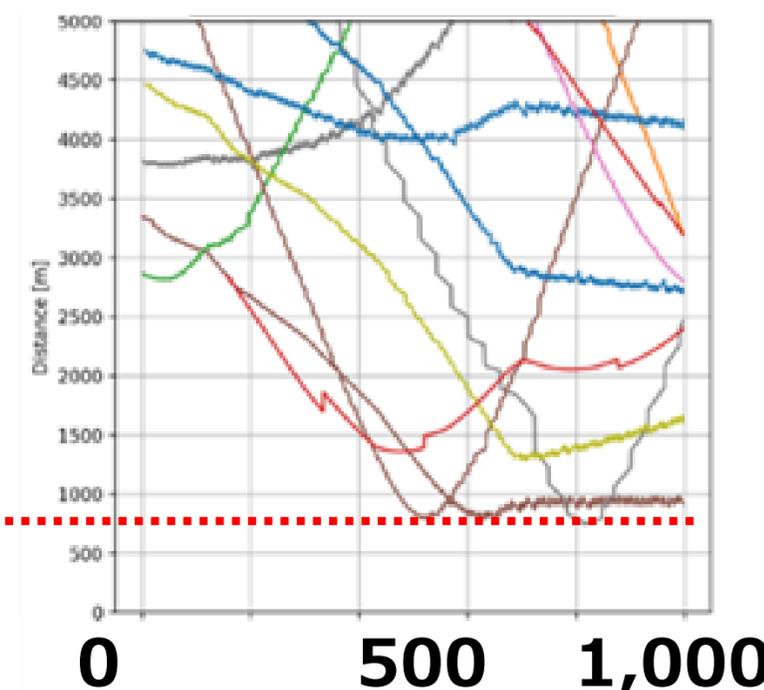
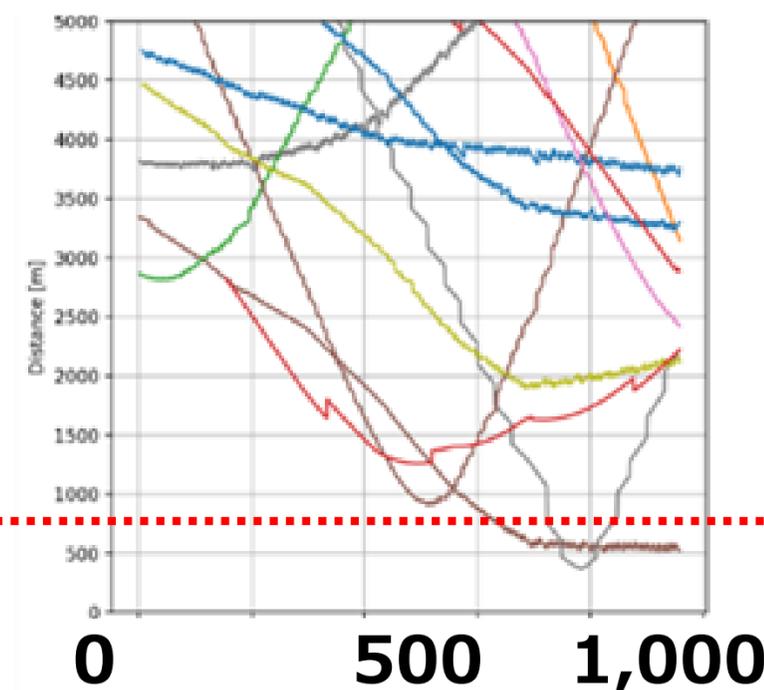
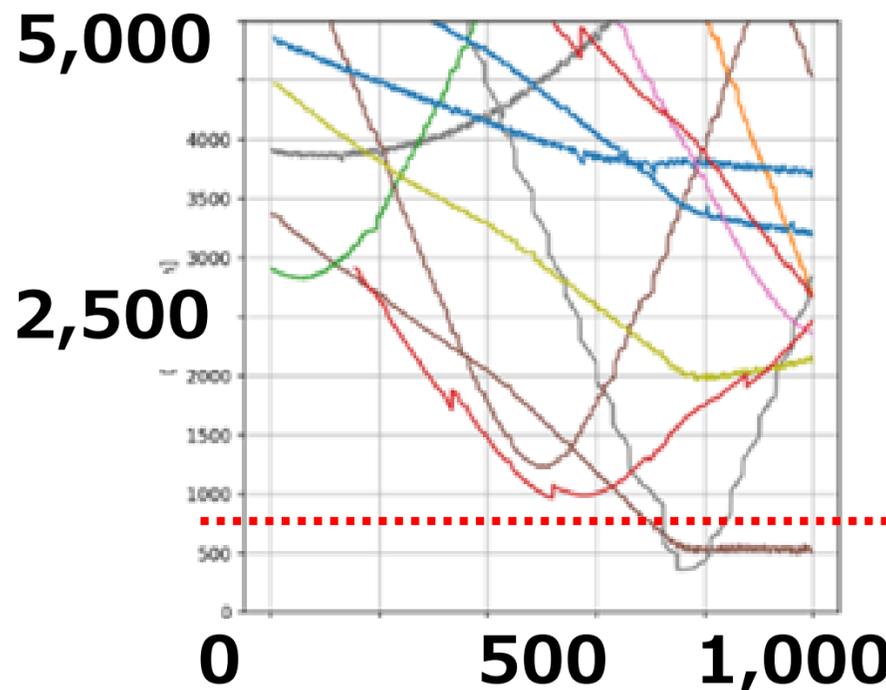
## 自動避航操船システム(新手法の検証)



- 変動OZTによる新手法を  
実海域の交通流データ  
を用いて試行した結果
- 変動OZTなしが、比較的  
実船航跡と同じ
- 変動OZTありは、実船航  
跡よりもより大きく避航  
し、他船との離隔距離も  
大



他船との離隔距離(m)



時間(秒)

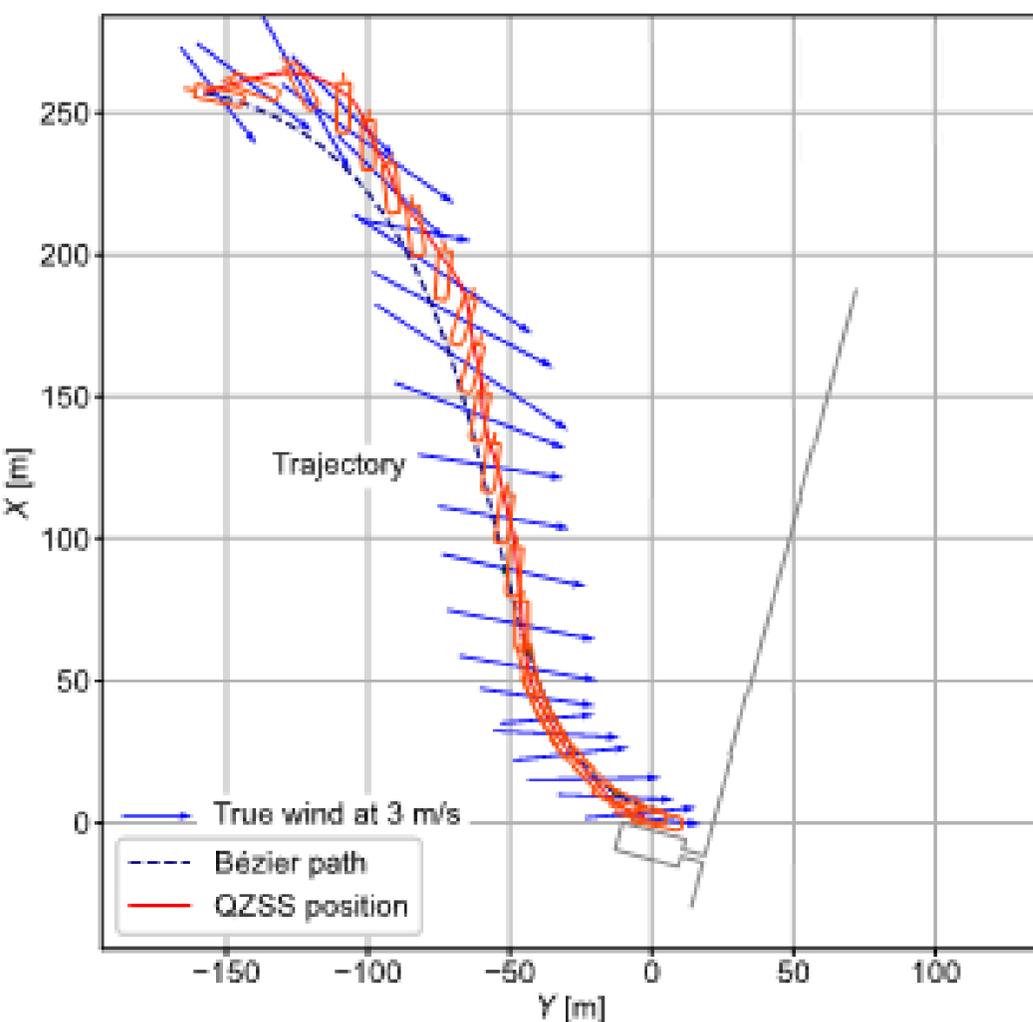
# 自動化システム（航海関係）の技術開発

## 自動離着棧システム（これまでの成果）



- 風外乱等も考慮し、操船者の負荷が高い着棧の支援・自動化システムを開発

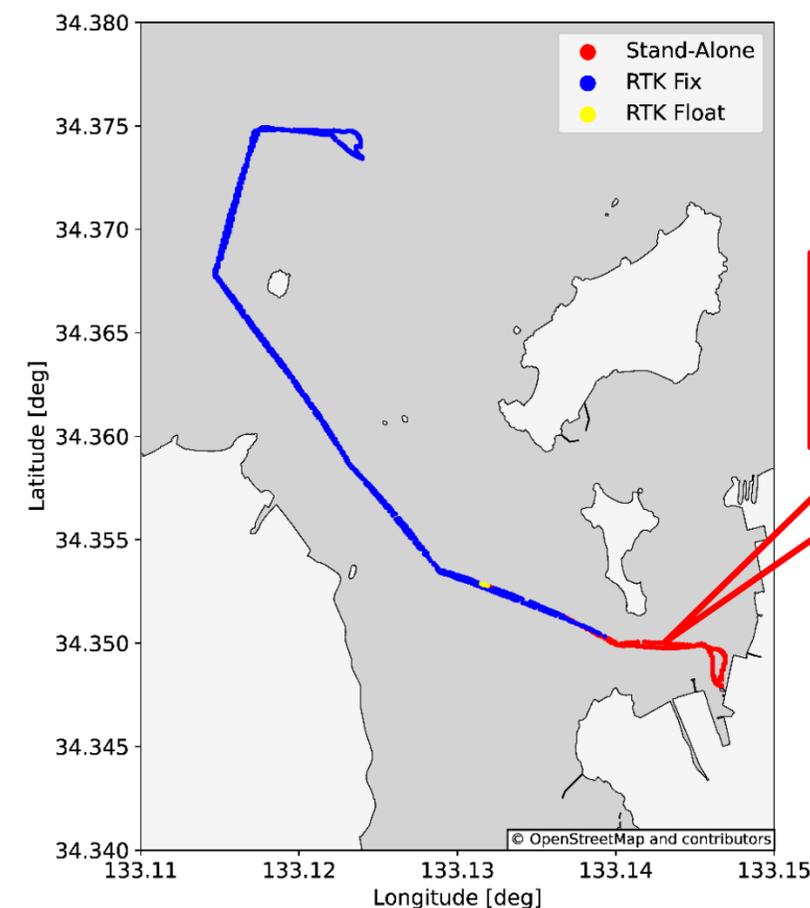
より厳しい外乱下においても比較的安定した自動着棧を可能とする自動着棧システムを試作



試作システムによる  
強風時の着棧実験結果

課題：QZSS（準天頂衛星、みちびき）を採用。しかし、常時、センチメートル級の測位精度は得られない。

→センサ系の冗長化の必要性

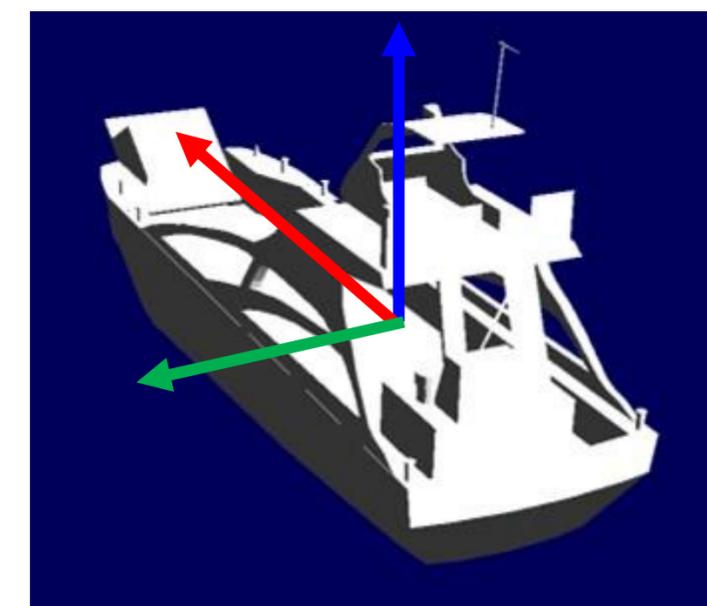
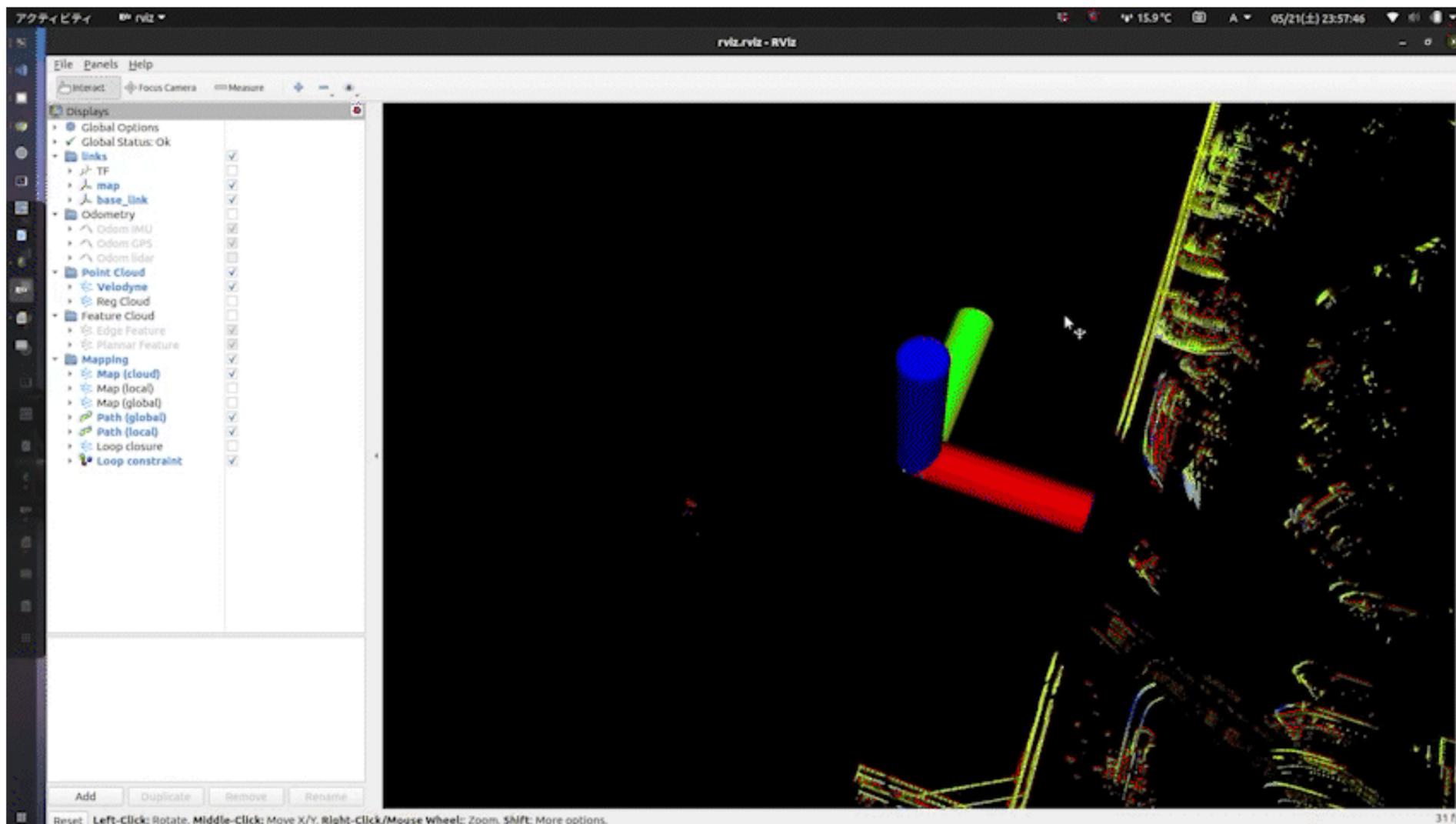


# 自動化システム（航海関係）の技術開発

## 自動離着棧システム（新測位システム）



- LiDARを用いたSLAM技術（Simultaneous Localization and Mapping, 自己位置推定とマッピングの同時実行）を応用し、海岸の点群地図の作成 と 測位および船首方位角を推定
- 陸上用の技術のため、海上用の改良を実施。



# 自動化システム（航海関係）の技術開発

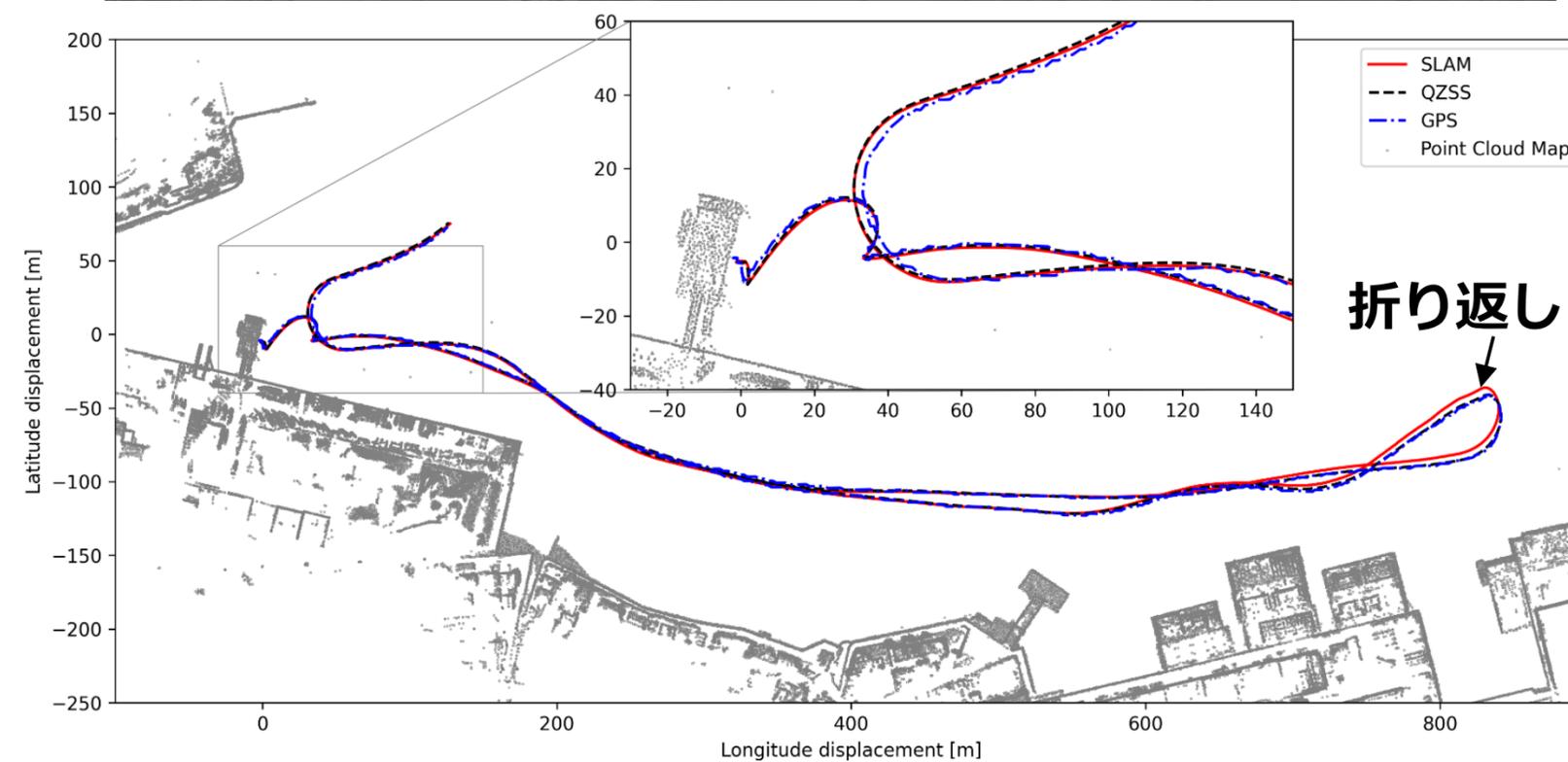
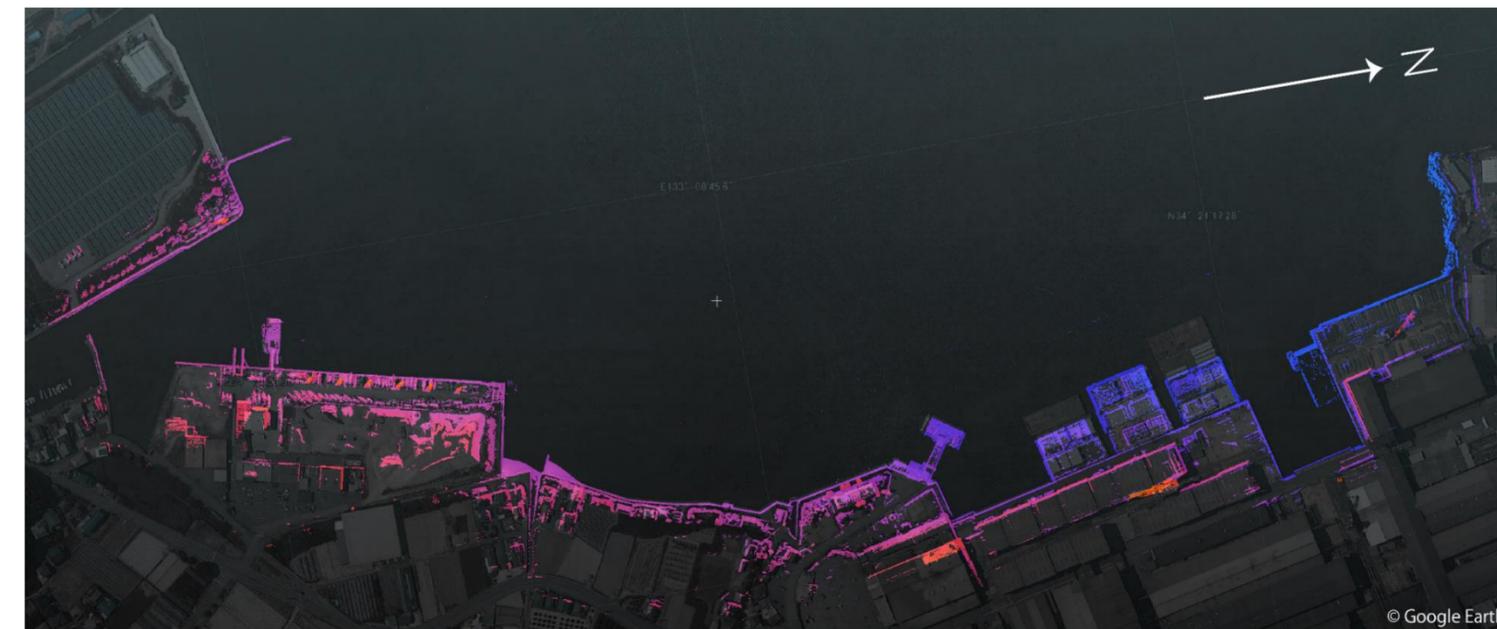
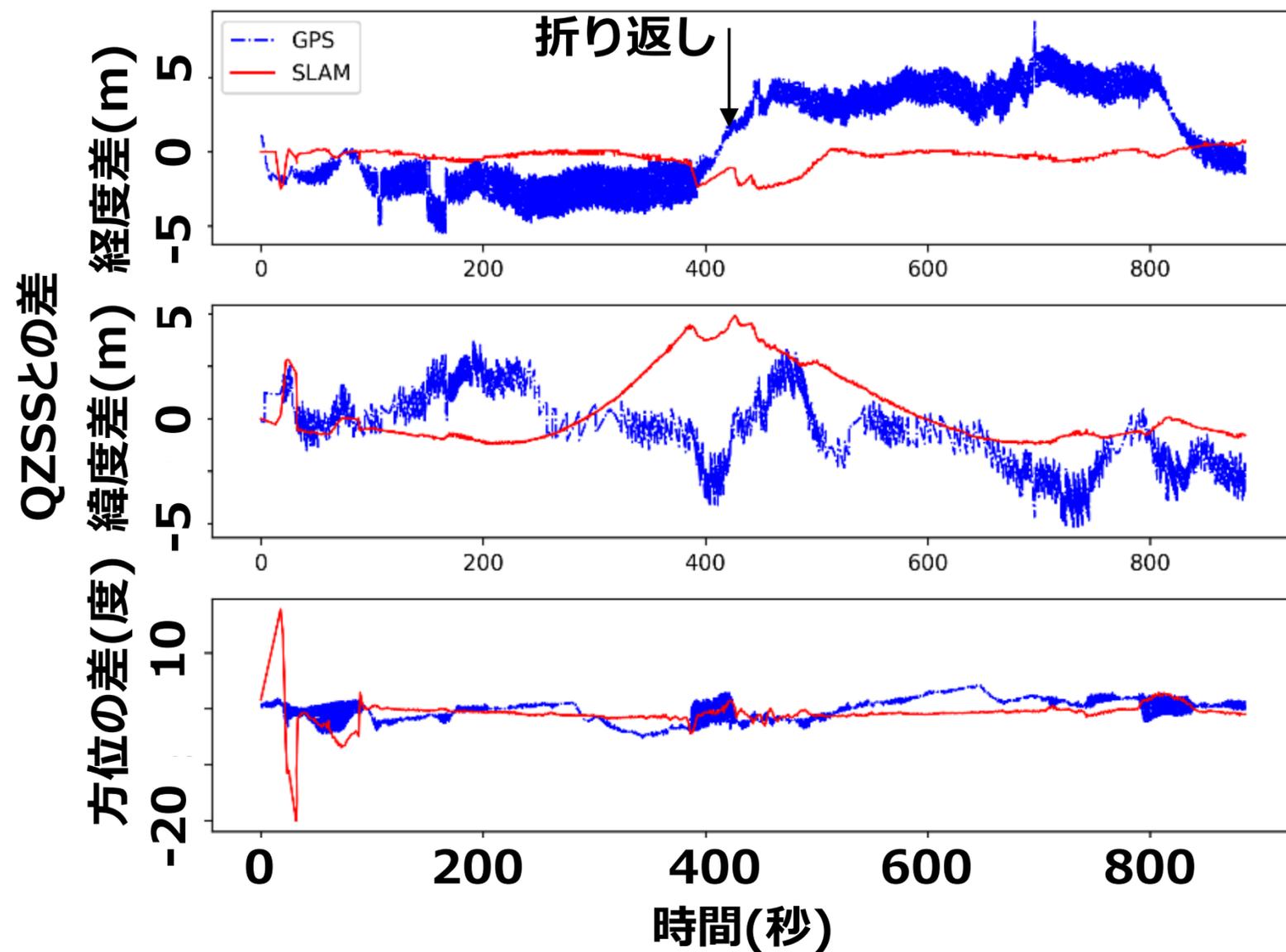
## 自動離着棧システム（新測位システムの検証）



- SLAMの推定値評価（GPS/QZSSの計測値と比較）
- 時系列の比較では、3者の結果は概ね一致。

SLAMの測位はQZSSと同程度(折り返し付近を除く)

→測位システムとして実用的精度



# 自動化システム（航海関係）の技術開発

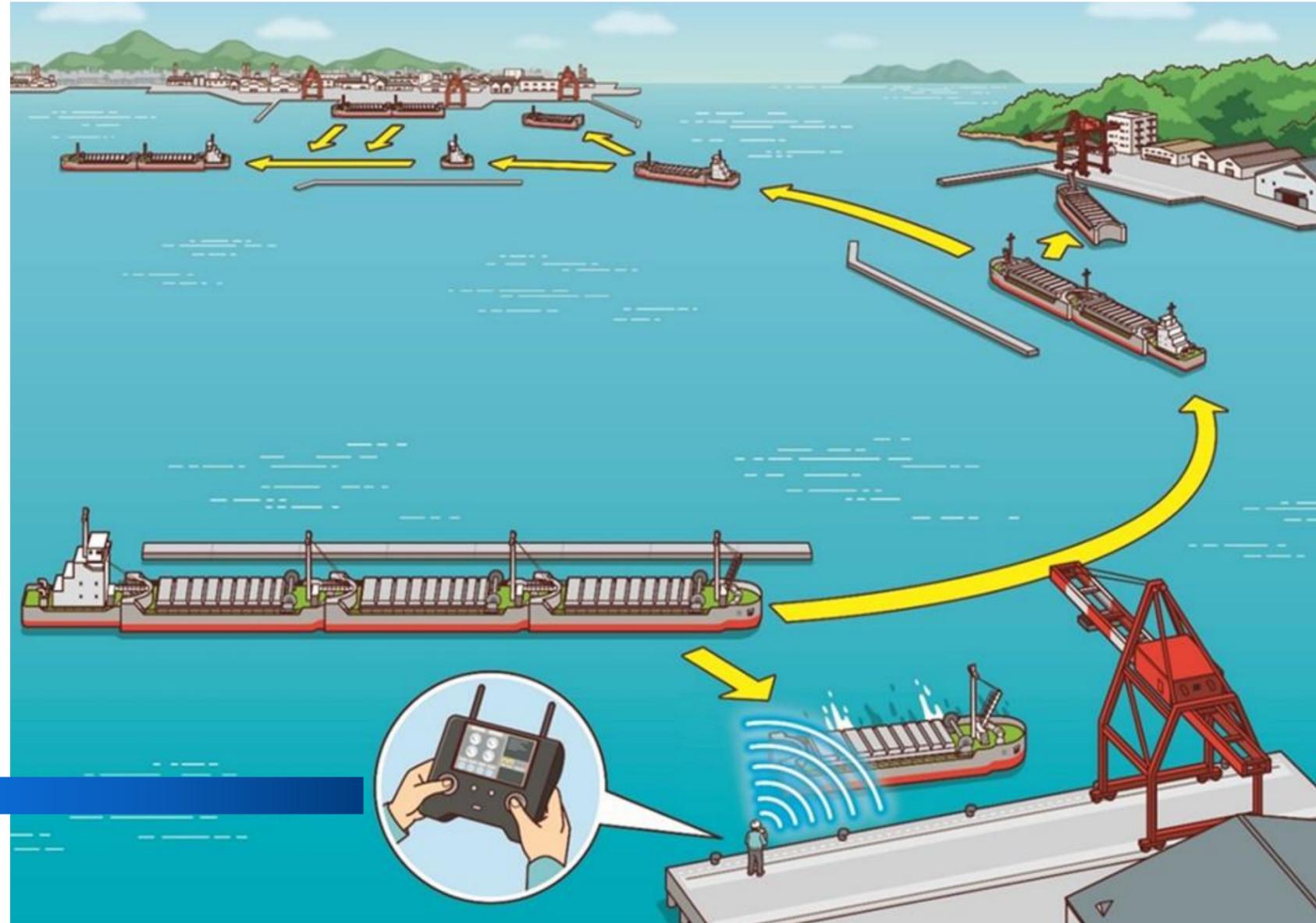
## 短距離遠隔操船システム（応用先:トリプル連結バージ）



- 2022年度より、  
（一財）日本船舶技術研究協会様  
らと連携し  
“トリプル連結バージ”の調査事業を  
進めている。



タブレットによる短距離遠隔操船システム



トリプル連結バージのイメージ図

# 自動化システム（航海関係）の技術開発

## 短距離遠隔操船システム（調査内容）



### 主な調査内容

実海域における通信試験 & 試作システムの実海域試験

通信手段：Wi-Fi

計測項目：

本船位置と陸上操船場所（浮き棧橋）との距離に対する

- ・受信信号強度RSSI（Received Signal Strength Indication）
- ・通信遅れ（Ping応答時間）を計測

#### RSSIの目安

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

-75dBm以下では接続が不安定

#### Ping応答時間の目安

RSSI	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

動画視聴やオンライン会議の場合、30ms以下で快適、50ms程度までが許容範囲



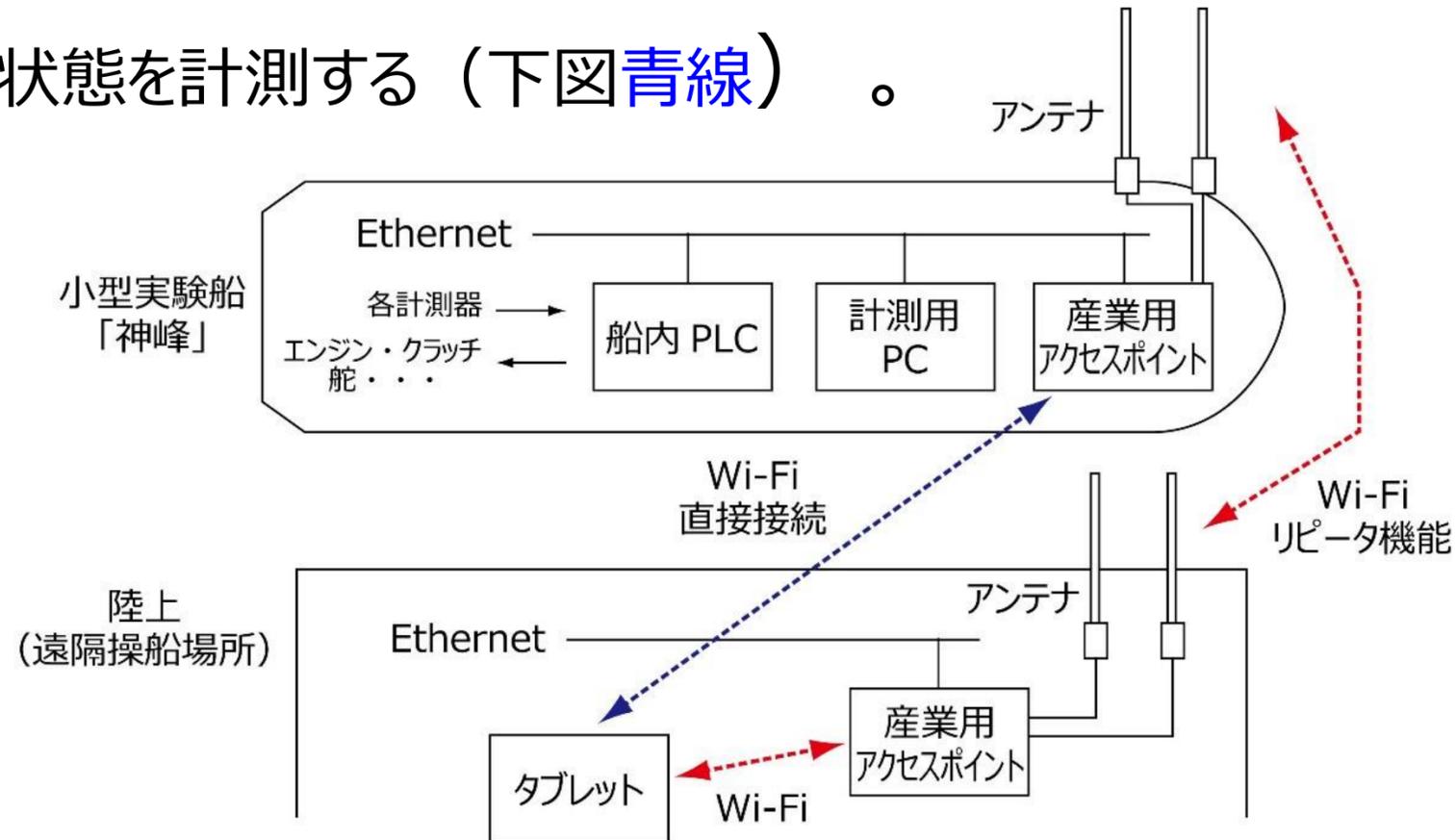
試験海域

# 自動化システム（航海関係）の技術開発

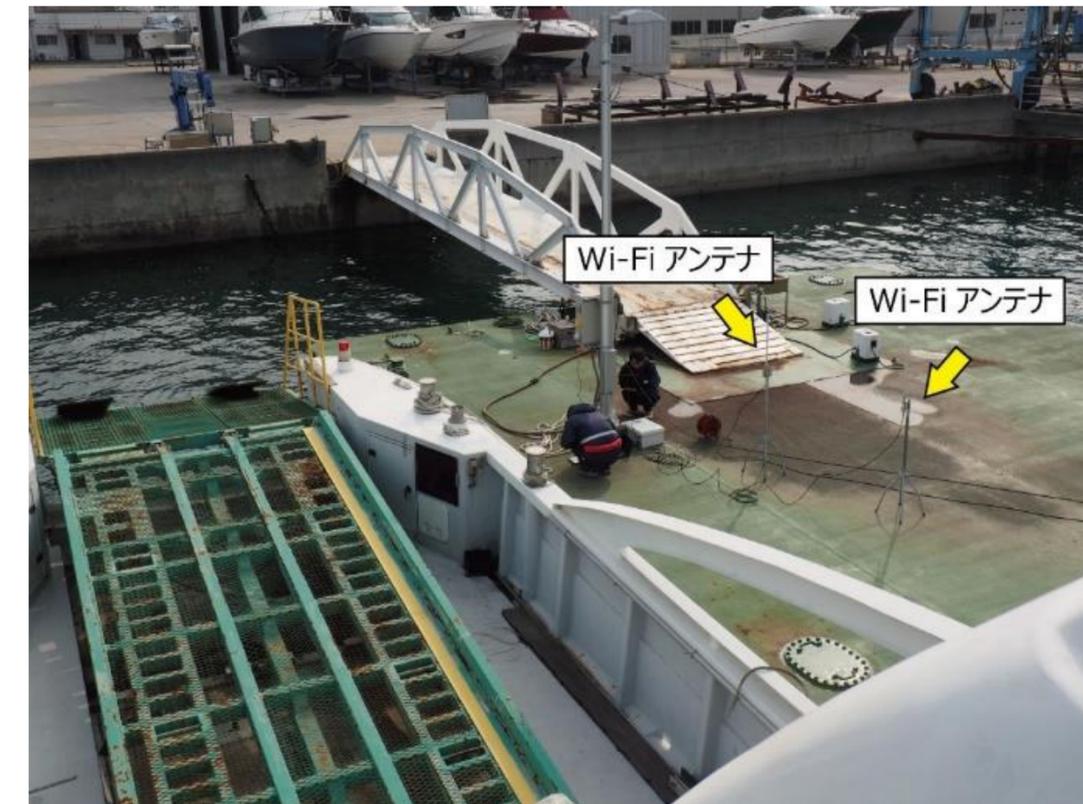
## 短距離遠隔操船システム（機器、試験装置の構成）



- 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機器および試験装置の構成



Wi-Fiアンテナ

➡ **結果：リピータ機能 & 高効率アンテナで、1000m程度まで安定した通信**

# 自動化システム（航海関係）の技術開発

## 短距離遠隔操船システム（実験結果&デモ動画）



小型実験船「神峰」

ライフ信号

可視可聴警報発令



遠隔操縦画面（タブレット）

### 通信状態監視機能の概略

- リスク解析技術
- 総合シミュレーションシステム

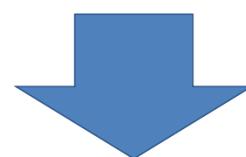
## 【関連ポスターセッション】

- PS 18 : 石村  
自動運航船のリスク解析 ～タスクベースのハザード同定手法～

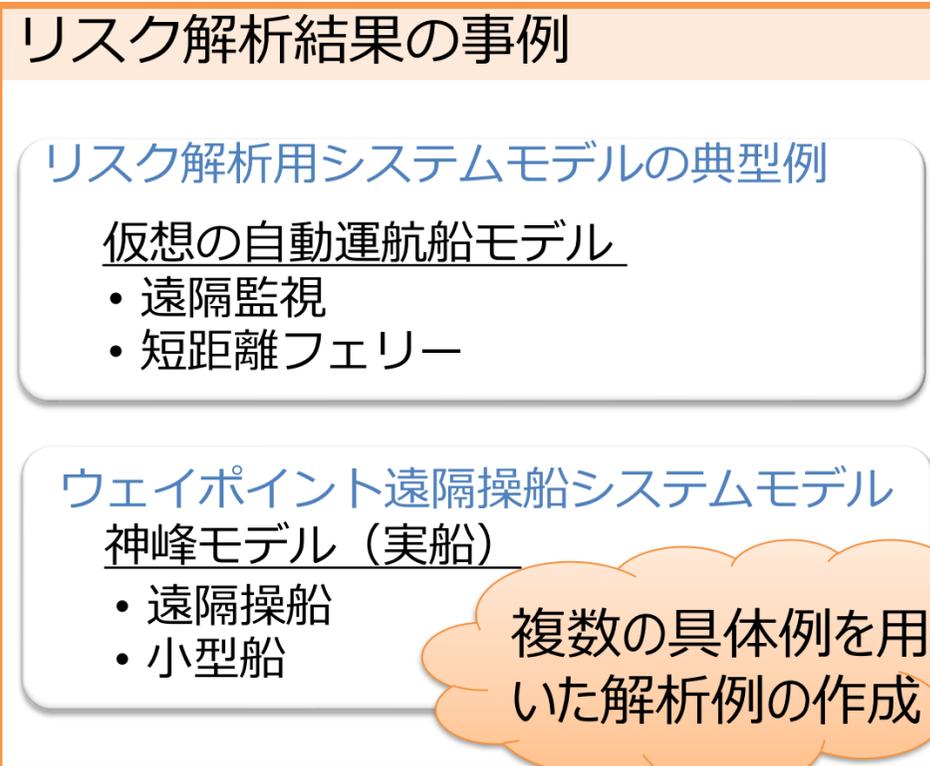
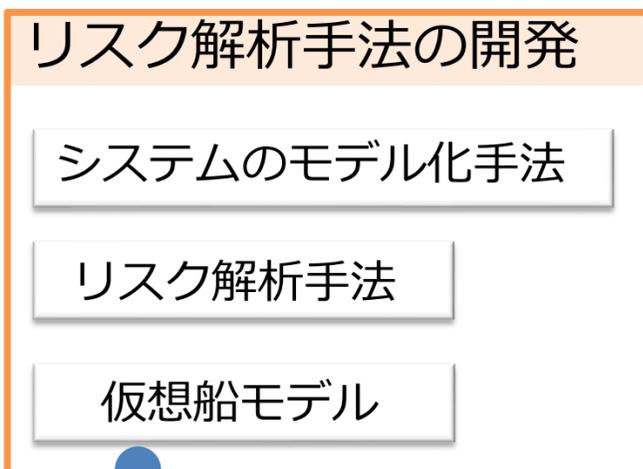
- 安全安心な海上交通社会を実現：適切な安全規則の構築が必要

- 近年：既存の規則やガイドラインの適用が困難なこれまでに実績が無い技術を導入した船舶(新概念船：自動運航船等)の開発が加速

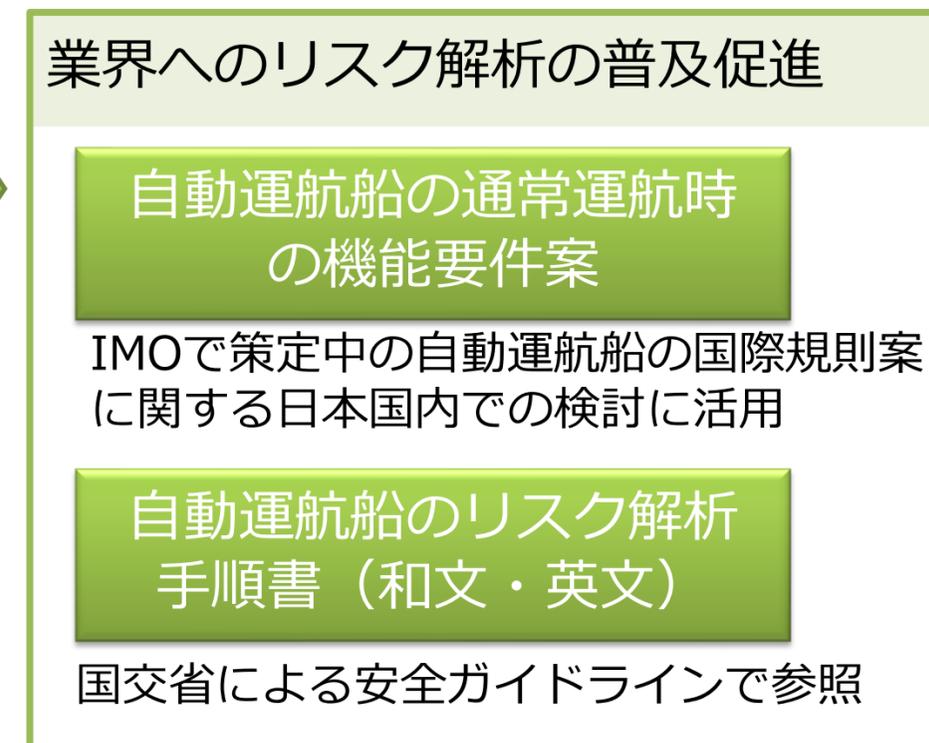
- リスク解析の需要増加：IMOや船級等の規則等で、設計時により広範な種類のリスク要因を漏れなく抽出し、対処することが重視される傾向



**多様な新概念船の開発の加速や、リスク評価の需要の増加を受け、対象となる技術の安全性を示すための枠組みを構築するための研究を実施**



複数の具体例を用いた解析例の作成



### ■ 自動運航船に適した対象のモデル化とリスク解析手法を開発

リスク解析には解析対象の明確化が必要。しかし、既存の手法では不足する部分が存在

- 従来船舶を対象としたリスク解析は、ハードウェア中心のシステム構成図であり、自動運航船の大規模で複雑なシステム全体を把握する手法がない

→ UML (Unified Modeling Language)を応用したモデル化手法を開発

- ソフトウェア同士または人間間での相互作用に起因するハザードなどの考慮が必要

→ タスクの誤り、未実施、遅延等に着目するタスクベースのハザード同定手法を開発

### 自動運航船の安全評価ガイドライン案の作成

- 2種類の船種×3種類の操船タイプの合計6隻の自動運航モデル船を設定し、リスク解析を実施。

自動運航モデル船、6種

旅客船（海域限定）	貨物船
自律操船	自律操船
遠隔操船1	遠隔操船1
遠隔操船2	遠隔操船2

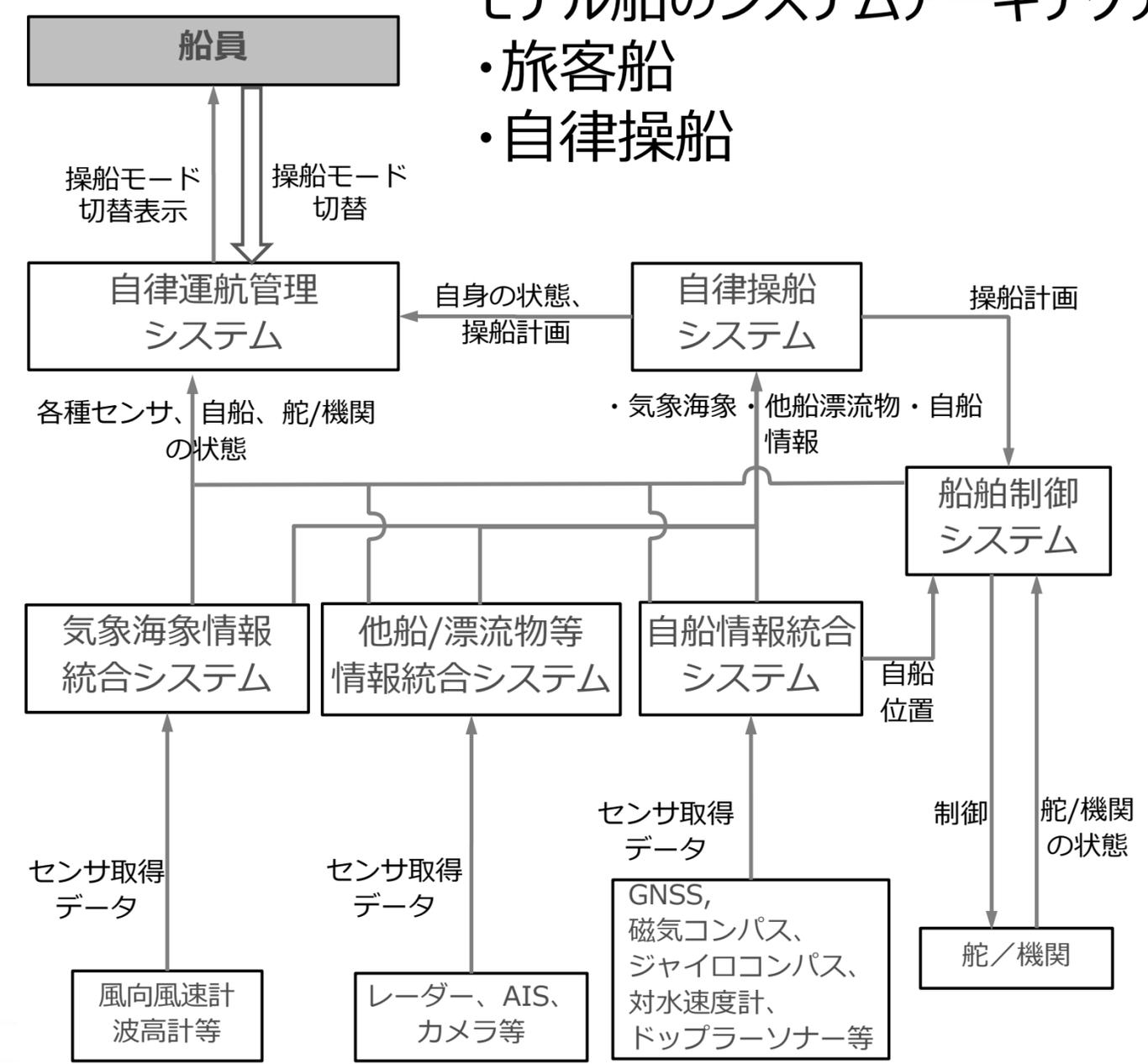
- 自律操船：遠隔コントロールセンター（RCC）なしに船舶側の自律性能による操船
- 遠隔操船1：RCCにおいて操船
- 遠隔操船2：RCCにおいて航路指示し、当該航路指示に従い船舶側の自律性能により操船

### モデル船とは

- 実在、実運航している船舶をベースに、「自動運航船化」するとしたら、どのような方法があるかを運用面、システム面に着目して設計
- リスク解析を実際に試すためのモデル例として使える程度の詳細化

### モデル船のシステムアーキテクチャ例

- ・旅客船
- ・自律操船



# 安全性評価技術の開発

## リスク解析技術（成果の社会実装）



- 「自動運航船/無人運航船のリスク解析手順書」および、リスク解析の具体例を示すワークシートを「解析シート標準」として作成。

- 無人運航船の操船自動化システムに関する認証ガイダンス案を策定。

MEGURI 2040 に係る安全性評価 成果報告書 別紙

自動運航船/無人運航船のリスク解析手順書

日本船舶技術研究会  
海上技術安全研究所

目次

- 1. 概要 ..... 2
- 2. 主要原則 ..... 2
- 2.1 本手順書の対象とする船舶 ..... 2
- 2.2 本手順書の対象とするリスク解析 ..... 2
- 2.3 用語の定義 ..... 2
- 3. リスク解析の実施手順の概要 ..... 4
- 4. 用意すべき資料 ..... 5
- 4.1 初期設計に対する解析が必要となる資料 ..... 5
- 4.2 詳細設計に対する解析が必要となる資料 ..... 5
- 5. リスク解析の各段階で行う作業 ..... 6
- 5.1 解析の準備 ..... 6
- 5.2 検討組織 ..... 7
- 5.3 解析条件の合意 ..... 7
- 5.4 解析と評価の実施 ..... 10
- 5.4.1 ハザード同定 ..... 10
- 5.4.2 リスクの指標化 ..... 11
- 5.4.3 初期設計に対するリスク解析及び評価 ..... 12
- 5.4.4 詳細設計に対するリスク解析及び評価 ..... 12
- 5.5 報告書 ..... 12
- 付録 1 考慮すべきハザードの例 ..... 14
- 付録 2 代表的なリスク解析手法の概要 ..... 17
- 付属書 1 自動運航船のリスク解析の実施例 ..... 20
- 付属書 2 無人運航船の実証実験のリスク解析の実施例 ..... 76
- 付属書 3 無人運航船のリスク解析の実施例 ..... 138
- 参考文献 ..... 167

Attachment Report of the MEGURI2040 Safety Assessment

Risk analysis procedure for MASS

Japan Ship Technology Research Association  
National Maritime Research Institute

Table of Contents

- 1. Outline ..... 3
- 2. Key Principles ..... 3
- 2.1 Target ships of this manual ..... 3
- 2.2 Target risk analysis of this manual ..... 3
- 2.3 Definition of terms ..... 3
- 3. Outline of risk analysis procedure ..... 5
- 4. Documents to prepare ..... 6
- 4.1 Documents necessary for an analysis of the initial design ..... 6
- 4.2 Documents necessary for an analysis of the detailed design ..... 6
- 5. Tasks performed at each step of a risk analysis ..... 7
- 5.1 Preparation for an analysis ..... 7
- 5.2 Working group ..... 8
- 5.3 Consensus on the analytical conditions ..... 8
- 5.4 Performing analysis and assessment ..... 11
- 5.4.1 Identifying hazards ..... 11
- 5.4.2 Indexing risks ..... 13
- 5.4.3 Risk analysis and assessment of the initial design ..... 13
- 5.4.4 Risk analysis and assessment of the detailed design ..... 14
- 5.5 Report ..... 14
- Annex 1. An example of hazards to consider ..... 16
- Annex 2. Outline of common risk analysis methods ..... 19
- Appendix 1. A practical example of risk analysis on a phase II autonomous ship ..... 22
- Appendix 2. A practical example of risk analysis on a demonstration experiment of phase III autonomous ship ..... 35
- Appendix 3. A practical example of risk analysis on a phase III autonomous ship ..... 35
- References ..... 35

認証ガイダンスの中間案策定

本節では、本事業の成果として無人運航船の自動化システムに関する認証ガイダンスの中間案を記載する。本内容は、IMO GBS (Goal Based Standard) の Tier 4 相当の内容を想定した中間案である。なお、本報告の執筆時点で議論されている規則、通称 MASS Code は IMO GBS の分類としては Tier 1, 2 (ゴール、機能要件) 相当である。なお、離着航については本年度の作業内容に含まれないが、参考のために記載する。

概要

自動運航船に係る安全性に関する認証を実施するにあたり、シミュレーションによる認証手順について定めるものである。

本ガイダンスにおいては、避航操船タスクと離着航操船タスクの自動化について、シミュレーションによる性能評価手順を定める。

原典

手順範囲

- 他船との接近遭遇又は衝突を避けるために取られた行動は、1972年に改正された海上衝突予防規則に従っていること (MSC 106/S.1, Y.2.1.3.1より)。
- 避航操船については、特に COLREGs の Rule 8, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18 を検証することを目的とする。
- 離着航制御については、岸壁や浅瀬近くでの操縦性能に影響が程度に計画速度より低い速力のオペレーションを想定し、事前に計画された離着航計画に基づき、十分な精度で制御できるかをシミュレーションにより検証する。

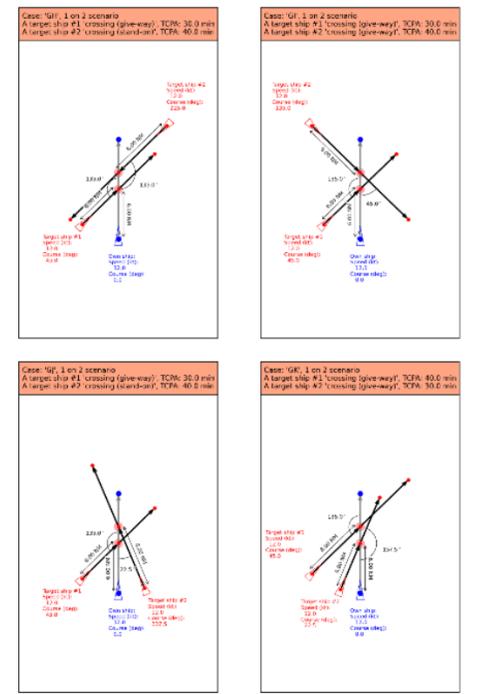
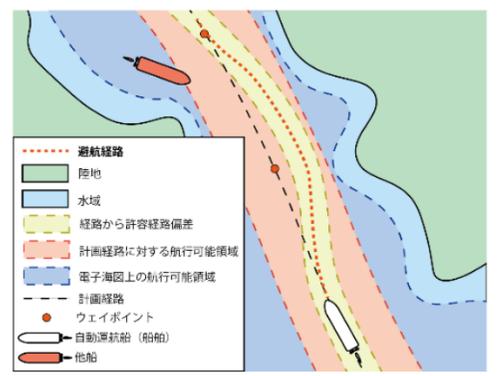
自動運航船の定義は、[IMO MSC YX]に従う。また、[自動化レベル、モード]についても同様とする。原則としてB0 (船舶にタッチがない、船上には無人でない) で運転される自動化レベルまでに適用されるタスクを対象とする。また、タスクを実行するシステムの運転設計領域 (OOD) は事前に要件化されていることとする。

用語 Definition

**Operational Design Domain** The range of operation for task/function of the ANS, where the ANS can work properly. 自動化システムが適切に機能する運用の範囲をいう。

**Task/Function タスク/機能** Operations of MASS automated with the ANS. 操船業務を構成する操作や作業を、自動化システム又は遠隔制御システムの設計に応じて組み合わせるもの (自動化や遠隔制御の対象や範囲、程度に)

項目	概要	パフォーマンス
A. 共有の領域	相手船とのシナリオ初期時の位置関係および危険判定。	1 (自動): 1 (TTC)は13秒未満かつ1 (自動) 2 (手動)は47秒未満 (最大80ノット)
B. 直交までの時間	シナリオの長さや対向、離一長期間的な状況における船速規制の値を規定する。	短航 (ICPA 10 min)、中航 (ICPA 30 min)、長航 (ICPA 60 min)、計3パターン
C. 船速	自動および手動時の船速。	自動は計画速度で設定。相手船は自分の計画速度を基準とし70%・100%・120% (従事は設定)の計3パターン
D. 実行の有無	相手船の操縦による見合い関係の変化。	船速的に10ノットの差 (自動と手動)からの差 (手動)を解除。ICPA (短・中・長)に準拠 (手動)と同等 (手動)とする。操縦パターンと同等とすると36秒未満 (手動)。また、ICPA (短・中・長)に準拠 (手動)により、ICPA (短・中・長)に準拠 (手動)を解除する。また、B, Cの基準で実行パターンを解除。



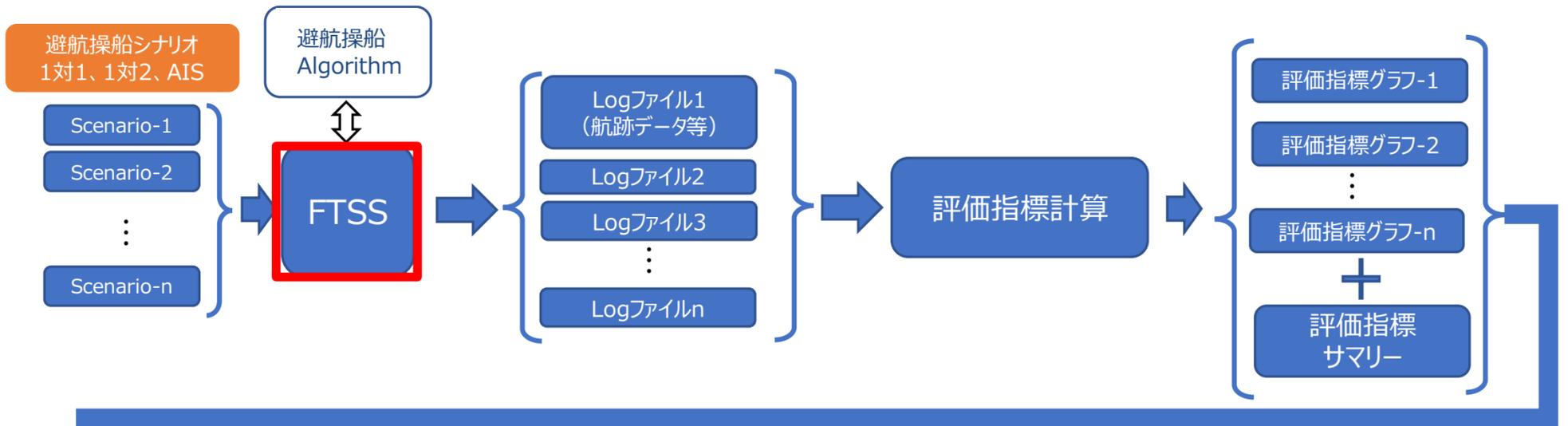
現在IMOにおいて進められている自動/無人運航船に関する規則 (MASSコード) の審議に本成果を活用。

# 安全性評価技術の開発 総合シミュレーションシステム



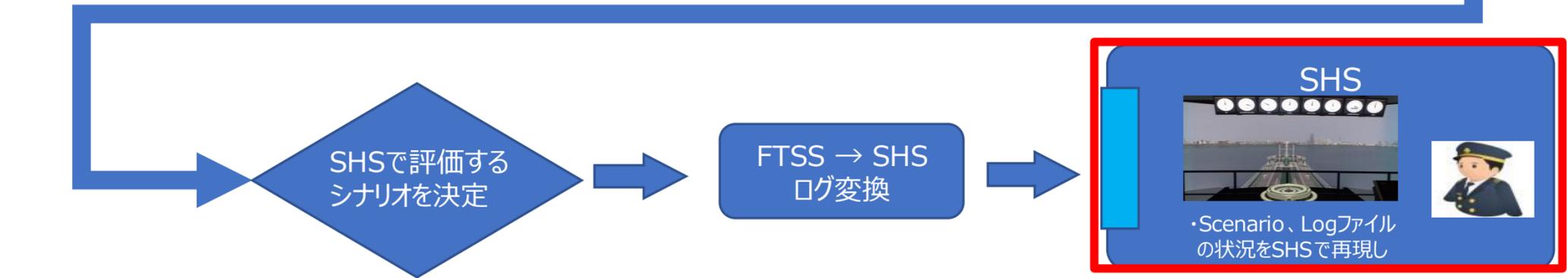
## • FTSS : ファストタイム シップシミュレータ

様々なシナリオを実時間より短い時間でシミュレーション可能。自動化ソフトウェアを検証。



## • SHS : 操船シミュレータ

人の関与を考慮した評価に必要な船橋環境を模擬したシミュレーションシステム。

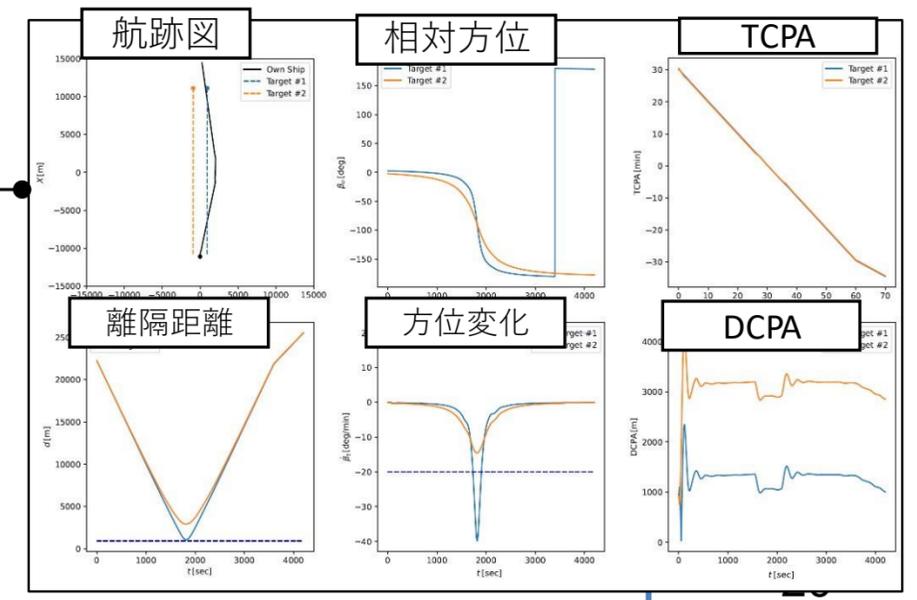


右図は、FTSSとSHSを連携した例  
(避航操船アルゴリズムの  
安全性評価の過程)

### □ FTSSで避航シナリオの実行、評価指標作成

- 評価指標作成
  - シナリオごとの評価指標のグラフ
  - シナリオの評価指標サマリー(表)
  - 表示危険度は検討中

Case	最小離隔距離 [m]	最大方位変化率 [deg/min]	最小離隔距離判定	最大方位変化率判定
Scenario-1	1068.8	39.7	pass	pass
Scenario-2	1064.5	39.9	pass	pass
.....	.....	.....	.....	.....
Scenario-n	2762.4	12.8	pass	failure



シナリオ、環境データを読み込み  
シミュレーション結果（ログや指標）を出力  
（ログファイルはSHSで再現可能）

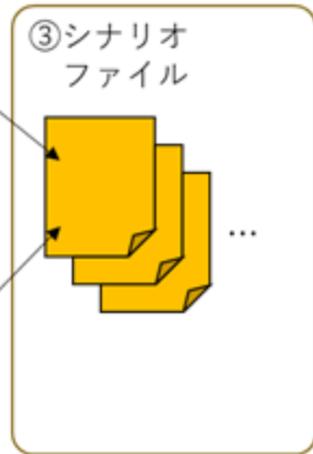
→ 自動化システムの  
開発、評価へ応用

### ①自然環境 データセット

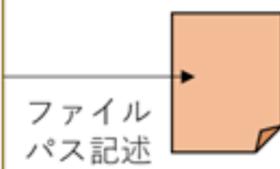
- 深度
- 潮流
- 風
- 天候

### ②シナリオ関連 ファイル

- 海域情報
- 自船情報
- 他船情報



### ④シナリオ一覧 ファイル

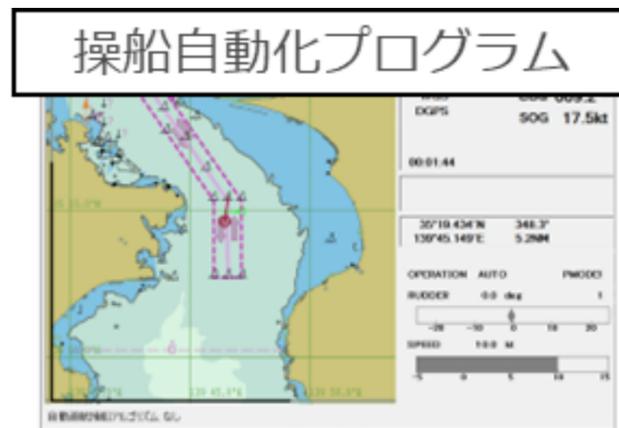


入力

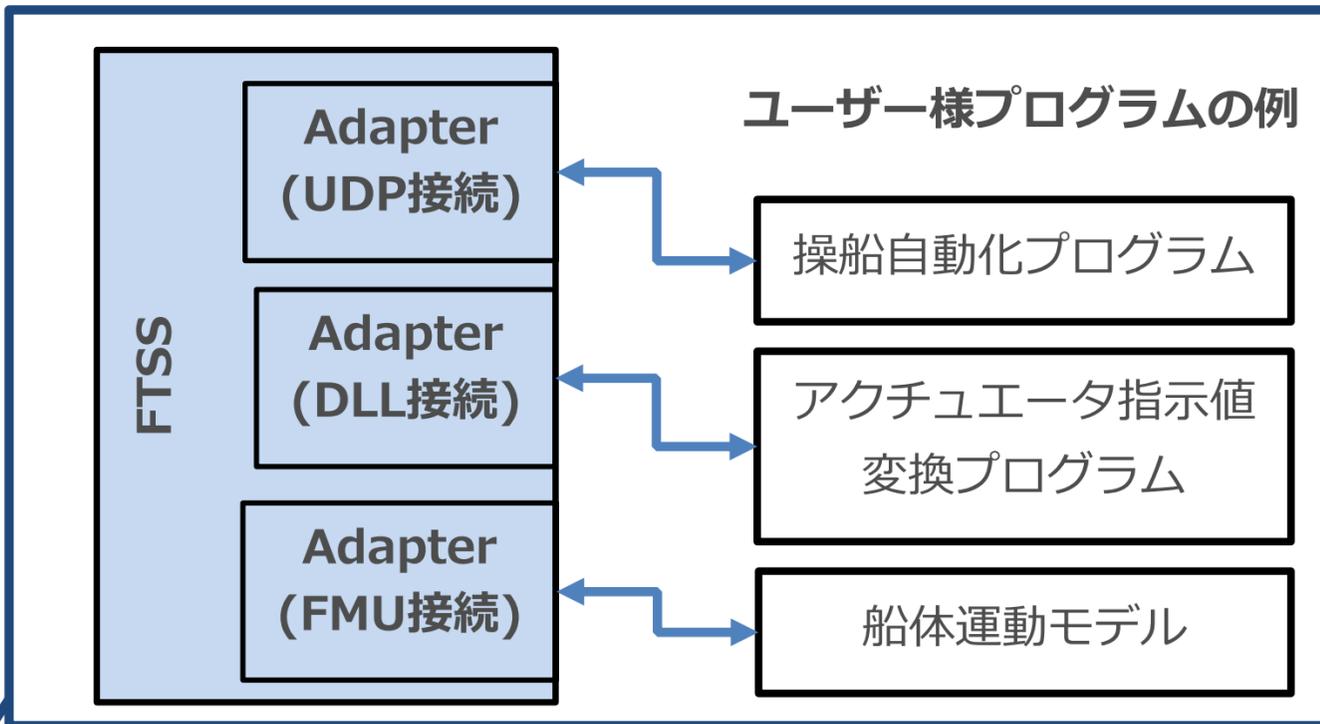


- Windows10,11(64bit)
- .Net Framework(C#)
- Python

出力



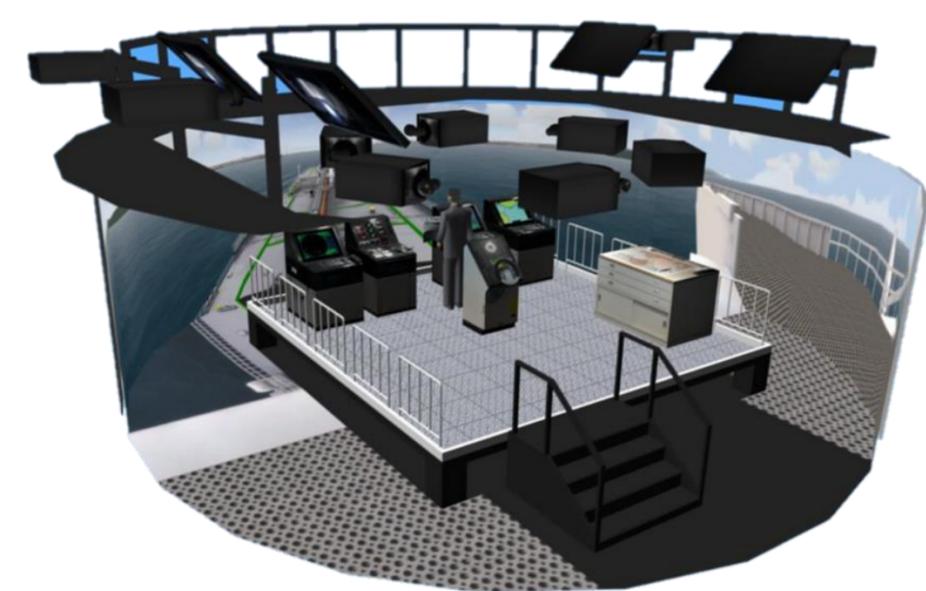
UDP  
送受信



Adapterの仕様、  
ソースコードを公開し、  
ユーザー様プログラムを  
モジュール単位で  
様々な方式により接続

# 安全性評価技術の開発

## SHS : 操船シミュレータ



SHS本体



### ■ 主なシステム構成

- 360度円筒スクリーン（半径6.5m）
- 下方スクリーン
- 操舵スタンド
- 航海機器

レピータコンパス、ECDIS  
レーダー(S-band, X-band)  
機関コンソール、  
通信コンソール、等



シミュレータ操作室



SHSの航海機器類

## 操船シミュレータのデモ & 公開実験を実施



東京港出港、シミュレーション航海 ①夜間航行、②濃霧、③波浪&動揺

## 自動運航船プロジェクトチームの研究開発項目

### ■ 自動化システム(航海関係)の技術開発

#### ・ OZTによる自動避航システム

変動OZTの効果を確認。

→ 協調航行（他船との通信による経路交換等）を検討

#### ・ 自動離着岸へのLiDARの応用

SLAMによる測位は実用的精度であることを確認。

→ 岸壁の測距に活用し、自動離着岸アルゴリズムと融合

#### ・ タブレットによる短距離遠隔操船システム

距離と通信状態の関係、および、安全対策の機能を確認。

→ トリプル連結バージへの応用を踏まえた開発項目を調整中

### ■ 安全性評価技術の開発

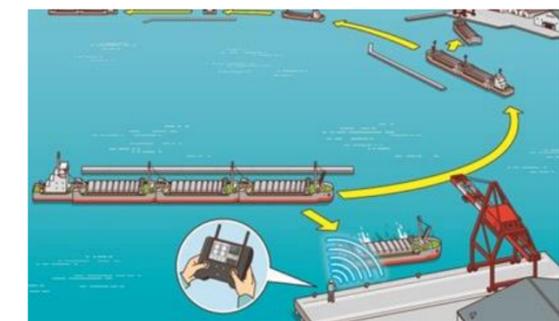
#### ・ リスク解析技術

自動運航船のリスク解析手法を開発。

#### ・ 総合シミュレーションシステム

FTSSとSHSを開発。

→ 自動化システムの安全性評価に応用。



本研究の安全性評価技術の開発の一部は、公益財団法人日本財団様の助成を受け、一般財団法人日本船舶技術研究協会様が行う「MEGURI2040 に係る安全性評価」事業の委託研究として実施し、一般財団法人日本海事協会様よりサポートと有益な助言をいただきました。



避航操船技術の開発は、東京海洋大学様、MOLマリン&エンジニアリング(株)様、(株)商船三井様、商船三井テクノトレード(株)様、(株)YDKテクノロジーズ様 との共同研究で得られた成果です。



短距離遠隔操船システムの開発は、公益財団法人日本財団様の助成を受け、一般財団法人日本船舶技術研究協会様が行う「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」事業において実施した研究で得られた成果です。

関係者の皆様に対し、感謝の意を表します。

ご清聴ありがとうございました



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**  
National Maritime Research Institute

