

船体動揺監視 IoT システムの開発

学生会員○小森 健史（東京海洋大学）

正会員 久保 信明（東京海洋大学）

要旨

本研究では復原力不足による転覆や激しい動揺による貨物損害事故を未然に防ぐことを目的として、操船者が動揺周期やGM推定値をネットワーク経由でリアルタイムに確認できるシステムを開発した。このシステムはマイコン端末内蔵のMEMS-IMUを利用して船体動揺(Roll, Pitch)の計測を行い、MCU内で動揺周期とGMを計算し、その結果をクラウドもしくはマイコン内で立ち上げたWebサーバー上にアップロードする仕組みになっている。本研究では開発したシステムについて船舶上での動作確認を行った。

キーワード：測位技術 IMU IoT 船体動揺 復原性

1. はじめに

十分な復原力を確保することは、船舶の安全運航上重要であり、通常は十分に確保されていることをコンディション計算にて確認している。しかしながら、復原力は航行中の清水・燃料の消費や、波浪による水線面積の変化によって減少する恐れがある。波浪との出会い周期などが船体動揺の固有周期と等しくなると共振が生じるといった危険も存在する。前報⁽¹⁾では産業レベル及び低価格帯の Micro-Electro-Mechanical-System Inertial Measurement Unit (MEMS-IMU)を利用して、汐路丸を対象に横揺れ周期を計測し、どちらの機器でも誤差10%未満で自由水影響を考慮した横メタセンタ高さ (G_0M)を推定できることを示せた。

そこで、本研究では低価格帯のMEMS-IMUを内蔵したマイクロコンピューター(マイコン)端末を利用して自動的に船の動揺周期とGM推定値(以後 G_0M も単にGMと記す。)を計算し、これを船内ネットワークもしくはクラウド上で確認できるようなシステムを開発した。スマートフォン及びサーバーアプリを用いた同様のシステムは濱地ら⁽²⁾によって既に開発されているが、本研究では市販品及びクラウドサービスを利用し、オープンソース型のプログラムとすることで導入やメンテナンスにかかる手間を軽減し、カスタマイズしやすくした。全体的な構成を図1に示す。

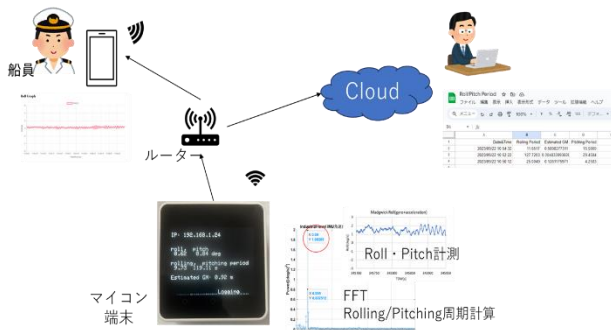


図1 船体動揺監視 IoT システムの構成

2. システムの構成と動作

2.1 マイコン端末

本研究では M5Stack 社のマイコン端末である”M5Stack Core2”を利用した。この端末には表1に示すパーツが搭載されており、本システムに必要な機能を備えている。

表1 マイコン端末に搭載されているパーツ

パーツ	用途
6-axis IMU	角速度・加速度の計測
Micro Controller Unit (MCU)	Roll/Pitch、動揺周期の計算
Real Time Clock	計時(タイムスタンプ)
SD Card	設定の書き込み 記録データの保存
Wi-Fi 通信モジュール	データのアップロード サーバー立ち上げ
Liquid Crystal Display	船体傾斜・動揺周期、GM推定値の表示

2.2 IMUによる計測

マイコン端末に搭載されているIMU(TDK-InvenSense製”MPU-6886”)で3軸の角速度及び加速度を計測して、MCU内でMadgwick Filter⁽³⁾によるセンサーフュージョンを行うことでRoll, Pitchを計算するようにした。



図2 マイコン端末のIMU(黄枠内)

2.3 時間スペクトル解析手法

計測した Roll, Pitch に対して短時間フーリエ変換(STFT)を MCU 内にてリアルタイムで実施した。フーリエ変換の計算には ArduinoFFT⁽⁴⁾ ライブラリを利用した。このライブラリではスペクトル解析の結果、パワーが最大となった周波数とそれに隣接する周波数で式(i)のように内挿された値をフーリエ変換の結果(周波数の代表値)としている。

$$\delta = \frac{\{ps(i_{max} - 1) - ps(i_{max} + 1)\}}{2 * \{ps(i_{max} - 1) - 2 * ps(i_{max}) + ps(i_{max} + 1)\}}$$

$$f_{interpolated} = \frac{(i_{max} + \delta) * f_{sample}}{N_{sample}} \quad (i)$$

$ps(i)$: パワー i_{max} : 最大パワーの index

f_{sample} : サンプリング周波数 N_{sample} : サンプル数

GM 推定値は式(ii)⁽⁵⁾を用いて計算した。

$$GM = \left(\frac{2 * k * B}{T_r} \right)^2 \quad (ii)$$

T_r : 横揺れ周期 k : 慣動半径の係数 B : 船幅

2.4 クラウドへのアップロード方法

Rolling/Pitching 周期や GM 推定値を以下に示すような JSON 形式のデータにして Google Drive へアップロードする。

```
{“Period”:[11.65,15.58],
```

```
“GM”:.063}
```

アップロードされたデータから動揺周期と GM を抜き出して Google Spread Sheet へ書き込む処理は Google App Script によって記述し、Google のサーバー上で動作させる。

2.5 Web サーバーの立ち上げ

マイコン端末に搭載されている Wi-Fi モジュールを使用して、Web サーバーを立ち上げた。ルーターによってマイコンには IP アドレスが割り振られており、そこにアクセスすることで動揺周期や、船体傾斜を確認できる。グラフ表示は chart.js⁽⁶⁾ ライブラリを利用して行った。

3. システムの動作方法

3.1 設定の書き込み

表 2 に示す設定項目は text ファイルに書き込んでおく。ファイルは SD カードに保存しておき、プログラム実行時に読み込むようにした。

表 2 設定項目

用途	項目
WiFi 接続	SSID Password
クラウド接続	Google Spread Sheet へのアクセス URL
GM 計算	船幅 慣動半径の係数

3.2 動揺データの確認方法

このシステムのデータ出力/upload 先は表 3 の通りである。Google Drive のスプレッドシートにアクセスすることで、陸上にいる運航管理者等が遠隔で監視することができるようになっている。船員は船内ネットワーク内で Web サーバーにアクセスすることで船体傾斜・動揺周期や GM 推定値を確認することができる。

表 3 データの出力先

出力先	データ
SD カード	時刻(タイムスタンプ) 角速度、加速度計測値 Roll/Pitch Rolling/Pitching 周期
Google Drive	時刻 Rolling/Pitching 周期 GM 推定値
マイコン端末で立ち上げたサーバー	時刻 Roll/Pitch Rolling/Pitching 周期 GM 推定値

4. システムの動作実験

4.1 実験 1「マイコン端末内部での動揺周期計算」

4.1.1 実験方法

マイコン端末を東京海洋大学の汐路丸船内に設置し、計測した Roll に対して端末内部でスペクトル解析を行って、結果を SD カードへ出力した。実験の詳細は表 4 に、スペクトル解析の条件は表 5 に示す通りである。

表 4 実験 1 詳細

実験日時	2023 年 8 月 5 日 15:05~16:50
使用船舶	汐路丸 豊海ふ頭停泊中
機器設置場所	汐路丸教室内

表 5 スペクトル解析(STFT)条件

フーリエ変換手法	高速フーリエ変換(FFT)
サンプリング周期	0.5[s]
スペクトル解析を行うデータ個数/時間窓長	256sample/128[s]
周波数分解能	0.0078[Hz]
窓関数	ハミング関数
何秒毎にスペクトル解析の計算を行うか	128[s]

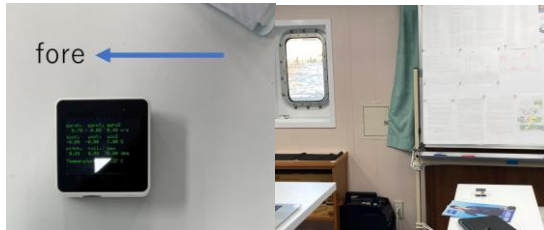


図 3 汐路丸教室内に設置したマイコン端末

マイコン端末で計測した Roll を図 4 に示す。マイコン端末内部ではこのデータに対し、リアルタイムにスペクトル解析を行う。SD カードに記録された Roll のデータに対して数値計算ソフト MATLAB を用いて同条件で後処理解析した結果と比較することで、マイコン端末の計算結果が正しいか判定する。

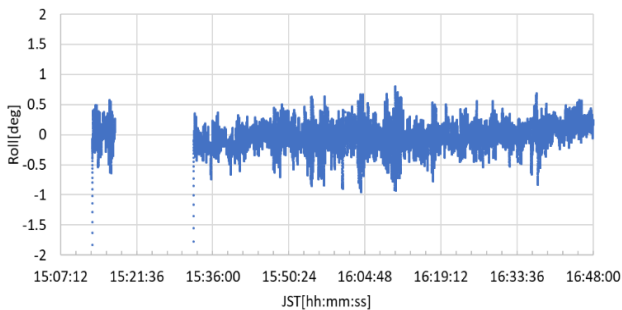


図 4 マイコン端末で計測した Roll

4.1.2 実験結果

スペクトル解析の結果を図 5 に示す。青線で示したものがマイコン端末内でリアルタイムに計算した横揺れ周期、橙線で示したものが同じ Roll データを数値計算ソフトにより後処理でスペクトル解析して求めた横揺れ周期である。両結果とも周期 20 秒以下の範囲では、周期の分解能(10 秒付近で 0.8s)より小さい 0.2s 以内で一致しており、端末内部でのスペクトル解析結果はほぼ正しいと言える。0.2 秒以内の差は、計算環境の違いによって生じる数値差だと考えられる。

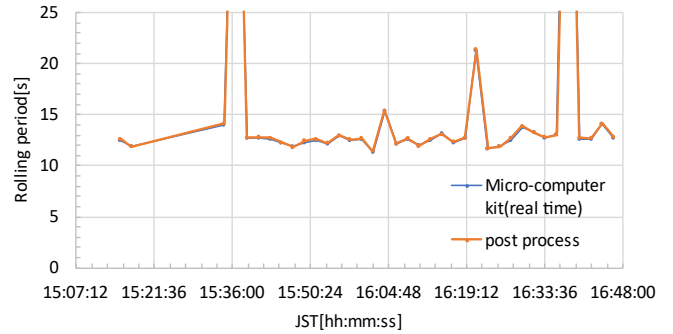


図 5 スペクトル解析結果

4.2 実験 2 「Cloud 上へのアップロード」

4.2.1 実験方法

マイコン端末を実験 1 と同様に汐路丸教室内に設置し、マイコン端末内部で動揺周期を求めた上で、Google Drive へアップロードした。実験日時は 9 月 22 日の 10:10~11:00 である。

4.2.2 実験結果

マイコン端末内部で計算された Roll・Pitch を図 6 に、これらの周期を図 7 に示す。当日はほとんど動揺していなかったため、動揺周期の数値自体は信頼できない。

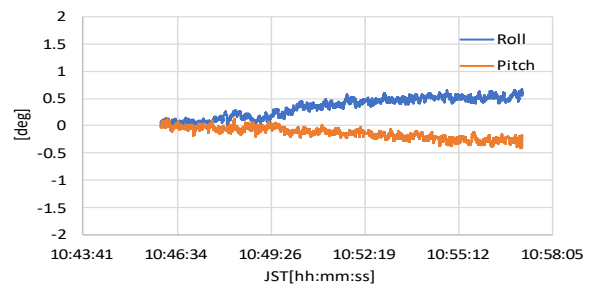


図 6 SD カードに出力された Roll・Pitch

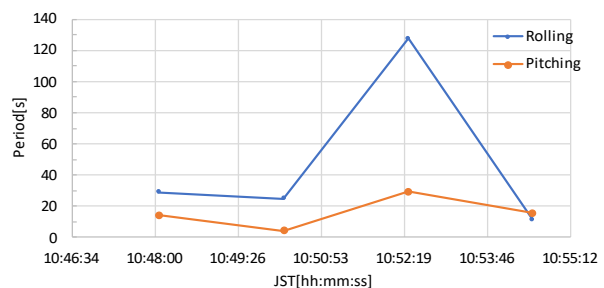


図 7 SD カードに出力された Rolling・Pitching 周期

実際に Google Spread Sheet へ書き込まれた値を図 8 に示す。計算結果が正常にアップロードされていることが分かる。

	A	B	C	D
1	Date&Time	Rolling Period	Estimated GM	Pitching Period
2	2023/09/22 10:54:32	11.6517	0.5808277311	15.5669
3	2023/09/22 10:52:22	127.7203	0.00483399360E	29.4584
4	2023/09/22 10:50:12	25.0049	0.1261175971	4.2583
5	2023/09/22 10:48:03	29.0829	0.09322888959	14.1127

図 8 Spread Sheet に書き込まれた動揺周期・GM 推定値

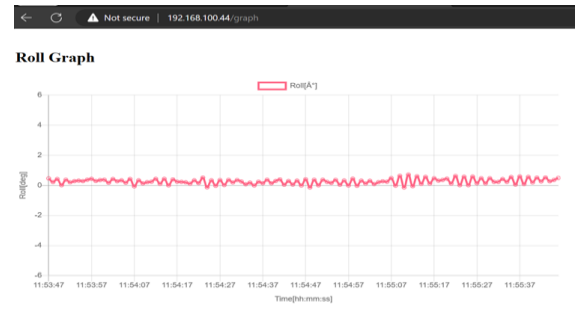


図 11 Web ページに表示された Roll

4.3 実験3「Web サーバーでの船体傾斜・動揺周期の表示」

4.3.1 実験方法

マイコン端末を東京海洋大学の小型船舶らいちょう I 船内に設置し、計測した Roll・Pitch 及び Rolling・Pitching 周期をマイコン端末上の Web サーバーに表示するようにした。

表 6 実験3 詳細

実験日時	2024年1月11日 11:40~12:20
使用船舶	らいちょう I 越中島キャンパスポンド内停泊中



図 9 らいちょう I と cabin に設置した端末

4.3.2 実験結果

一部時刻において計測・SD カードへ出力された Roll を図 10、Web サーバー上に表示された Roll を図 11 に示す。両方ともグラフが一致しており、問題なく Web ページ上にグラフが表示されていることが分かる。

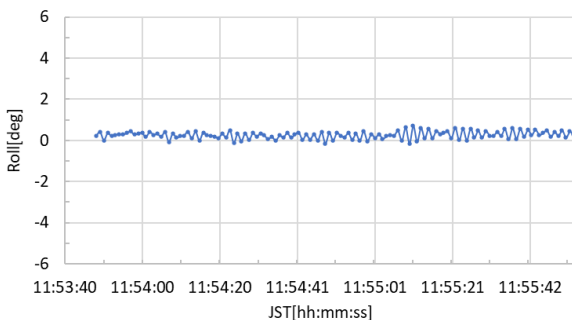


図 10 SD カードへ出力された Roll

5. まとめ

今回はマイコン端末を使って船体動揺監視 IoT システムを試作し、この端末で正しく動揺周期を計算できること及び、リアルタイムに船体傾斜、動揺周期、GM 推定値が確認できることを船舶での実験を通じて確認した。

今後は、復原力低下時などに船員へ通知する機能の実装にむけて、実運航データを収集・分析したうえで Alert limit の策定や効果的な通知方法を検討していきたい。

6. 謝辞

本研究の遂行にあたって、船舶での実験機会を設けて下さった汐路丸鹿島船長と東京海洋大学清水教授に、この場を借りて御礼申し上げます。

7. 参考文献

- (1) 小森健史・久保信明:「IMU を用いた船体横揺れ周期の計測と GM の推定」、日本航海学会講演予稿集, Vol.11, pp35-38,2023.10.18.
- (2) 濱地 義法・江崎 修央・木村 佳嗣・石田 邦光:「船体傾斜及び横揺れ周期モニタリングシステムの試作」、日本航海学会論文集 第 129 巻, pp87-92,2013.12.27.
- (3) Sebastian O.H. Madgwick: An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays (internal report),2010.4.30.
- (4) Enrique Condes: arduinoFFT, <https://github.com/kosme/arduinoFFT>,2023.10.13.
- (5) IMO: RESOLUTION A.562(14) RECOMMENDATION ON A SEVERE WIND AND ROLLING CRITERION (WEATHER CRITERION) FOR THE INTACT STABILITY OF PASSENGER AND CARGO SHIPS OF 24 METRES IN LENGTH AND OVER,1985.11.
- (6) Chart.js ver.2.9.4, <https://www.chartjs.org/>,2023.12.7.

データ駆動ベイジアンネットワークを用いた船舶輻輳海域における海難事故分析

正会員 鮫島 拓也（海上保安大学校）

要旨

海難事故を誘発するリスク影響要因（Risk Influence Factors: RIFs）の解明において、データ駆動ベイジアンネットワークの一つである Tree Augmented Naive Bayesian Network（TAN）を用いた分析の有用性に関心が高まっている。本研究では、日本の輻輳海域において発生した海難事故に焦点を置き、海上保安庁が業務上の目的で作成する「海難事故調査票」から TAN を用いて RIFs の構造について同定、感度分析によるモデル評価を行った。結果として、19 の RIFs のうちから 6 つの重要な RIFs が同定され、RIFs 間の相互作用について有用な示唆を得ることができた。

キーワード：事故解析、海上交通、ベイジアンネットワーク、Tree Augmented Naive Bayesian Network (TAN)

1. はじめに

社会という複雑なシステムの中で発生する「事故」については、その発生メカニズムに関する理論モデルが提示されており、システムを構成する様々な要素の相互作用の結果が「事故」であり、その要素の一つでも変化させるまたは取り除くことで、その発生を防ぐことができるとされる⁽¹⁾⁽²⁾。海上で起こる船舶事故（衝突・座礁・乗揚げ・転覆・浸水・火災・爆発・運航不能を含む。以下、「海難事故」）の発生メカニズムについても、同様の観点から追究がなされており、主に船舶要因（船齢、型式、旗国、トン数など）、環境要因（気象、海象など）、人的要因（疲労、作業負荷、精神状態など）などを含む Risk Influence Factors（リスク影響要因、以下 RIFs）間の相互作用解明に焦点が置かれている⁽⁴⁾。これら RIFs の分析には、多様な計量的アプローチが適用されてきた⁽³⁾。代表的なものとして、順序ロジスティック回帰モデル（ordinal logistic regression model）、フォルトツリー解析（Fault Tree Analysis: FTA）、階層分析法（Analytical Hierarchy Process: AHP）、イベントツリー解析（Event Tree Analysis: ETA）、ベイジアンネットワーク（Bayesian Network: BN）などが挙げられる。その中でも、BN は、RIFs とその RIFs 間の相互依存関係を包括的に捉えることができ、また、海難事故発生メカニズムに対して、データ駆動に基づく機械学習アプローチという新たな視点で捉えることができるという点で近年関心が高まっている⁽⁵⁾。

本研究においては、この BN、特にデータ駆動 BN

モデルの一つである Tree Augmented Naive Bayesian Network（TAN）を使用し、海上保安庁が業務上の目的で作成する「海難事故調査票」から海難事故に関連する RIFs の構造について同定、感度分析によるモデル評価を行う。

2. 分析手法

2.1 Tree Augmented Naive Bayesian Networks (TAN)

BN を基礎とし、ノード間の関係性についても配慮する TAN モデルを用いた構造学習が、海難事故の実態に即した BN 構造を特定する上で優れたモデルであるとされる⁽³⁾。Naïve Bayes Networks (NBN) は、ノード（変数）間の条件付き相互依存性を考慮せず、各ノードは互いに独立であると仮定する。そのため、複数のノードが相互に関連し、その結果として生じる海難事故の性質を的確に捉えているとは言い難い。一方、TAN は、ノード間の独立仮定を緩和し、NB よりも多くの関係性を捉えることができる。

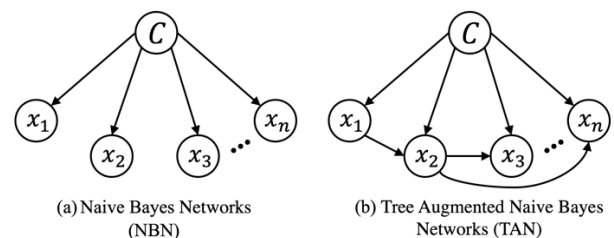


図1 NBN と TAN のネットワーク構造

（出典：Li et al.(2023)を参考に作成）

例えば、確率変数 U の集合を $U = \{X_1, \dots, X_n, C\}$ とし、変数 X_1, \dots, X_n を RIFs、 n を RIFs の数、 C をクラ

ス変数（事故類型）とする。このとき、 X_1, \dots, X_n 上の関数 π は、 $\pi(i) = 0$ となる i （つまり tree の根）が 1 つだけ存在し、 $i \leq j < k$ で $\pi(ij) = i_{j+1}$ となる配列が存在しない（サイクルが存在しない）場合に tree を定義できる。このとき、ノード間の関係を以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \Pi X_i &= \{C, \dots, X_{\pi(i)}\} & \pi(i) > 0, \\ \Pi X_i &= \{C\} & \pi(i) = 0 \end{aligned}$$

こうした前提のもと、TAN 構造の構築は、相互情報の最適化問題として次の関数で定義される。

$$I_P(X_i, X_j | C) = \sum_{x_{ii}, x_{ji}, c_i} P(x_{ii}, x_{ji}, c_i) \log \frac{P(x_{ii}, x_{ji} | c_i)}{P(x_{ii} | c_i) P(x_{ji} | c_i)} \quad (1)$$

ここで、 I_P は条件付き相互情報（conditional mutual information）、 x_{ii} は X_i の i 番目の状態、 x_{ji} は X_j の i 番目の状態、 c_i は事故類型の i 番目の状態である。最適化問題は、対数尤度が最大になるような、 X_1, \dots, X_n 上の tree を定義する関数 π を特定することである。

このように、TAN モデルを用いることで特定の事故タイプに関連する最も可能性の高いシナリオを定量的に説明することができ、さらに、様々な事故シナリオの可能性を予測し、特定の条件下で発生する事故結果を外挿することができる利点がある。

2.2 使用データ

本稿では、海上保安庁が業務上の目的で作成する「海難事故調査票」を分析に用いる。同調査票は、海上保安庁が対応にあたったすべての海難事故について、航行安全行政の専門家である海上保安官の視点で、調査項目が 50 以上にもなる詳細な事故情報が記録されており、データ駆動による BN 構築において最適なデータセットとなる。

本稿においては、2005 年 1 月から 2022 年 12 月までに日本の国内海域で発生した 40,386 件の海難事故の中から、船舶交通の輻輳海域を海上交通センターの情報提供可能海域として、東京湾、名古屋港、伊勢湾、大阪湾、備讃瀬戸、来島海峡、関門海峡海域内で発生した 3,302 件の海難事故データを分析の対象とし、衝突、乗揚、転覆・浸水、火災・爆発、運航不能の事故類型を目的ノードとして設定する。

次に、これらデータとして記録されている事故の詳細情報から RIFs となる要因を抽出する。BN を用いた先行研究⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾を参考に、発生月、曜日、発生時間、船種、全長、総トン数、船籍、発生海域、天

候、視程、風速、波高、船員数、AIS 搭載の有無、そして海難事故に遭遇した操船者の性別・年齢・経験年数・乗船通算年数、人為的ミスの有無といった 19 の RIF を抽出した（表 1）。

表 1 目的ノードと RIFs の定義

ノード(RIFs 含む)	定義	値
事故類型 (class) : 目的ノード	衝突 (単独衝突含む)、乗揚、転覆・浸水、火災・爆発、運航不能	collision, stranding, capsized/flooding, fire/explosion, inoperability
発生月 (month)	1 月、2 月、3 月、4 月、5 月、6 月、7 月、8 月、9 月、10 月、11 月、12 月	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
曜日 (day of week)	月、火、水、木、金、土、日	mon, tue, wed, thu, fri, sat, sun
発生時間 (time)	0000-0359, 0400-0759, 0800-1159, 1200-1559, 1600-1959, 2000-2359	1, 2, 3, 4, 5, 6
船種 (ship type)	旅客船、貨物船、タンカー、漁船、作業船、プレジャーボート (遊漁船含む)、その他	passenger ships, cargo ships, tankers, fishing boats, workboats, pleasure boats, other
全長 (length)	10m 未満、10m 以上 50m 未満、50m 以上 100m 未満、100m 以上 200m 未満、200m 以上	1, 2, 3, 4, 5
総トン数 (gross tonnage)	20t 未満、20t 以上 100t 未満、100t 以上 300t 未満、300t 以上 500t 未満、500t 以上 3000t 未満、3000t 以上 10000t 未満、10000t 以上	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
船籍 (flag state)	日本籍、外国籍	japan, foreign nationality
発生海域 (area)	東京湾、名古屋港、伊勢湾、大阪湾、備讃瀬戸、来島海峡、関門海峡	tokyo-bay, nagoya-port, ise-bay, osaka-bay, bisan-seto, kurushima-strait, kanmon-strait
天候 (weather)	晴れ、曇り、雨、雪、霧、その他	sunny, cloudy, rainy, snowy, foggy, other
視程 (visibility)	1km 未満、1km 以上 5km 未満、5km 以上 10km 未満、10km 以上	1, 2, 3, 4
風速 (wind)	3m/s 未満、3m/s 以上 5m/s 未満、5m/s 以上 10m/s 未満、10m/s 以上 20m/s 未満、20m/s 以上	1, 2, 3, 4, 5
波高 (sea state)	0.5m 未満、0.5m 以上 1.0m 未満、1.0m 以上 1.5m 未満、1.5m 以上 2.0m 未満、2.0m 以上	1, 2, 3, 4, 5
船員数 (crew)	1 人以下、2-5 人、6-10 人、11 人以上	1, 2, 3, 4
AIS 搭載 (AIS)	あり、なし	yes, no
性別 (gender)	男性、女性	male, female
年齢 (age)	20 歳未満、20 歳以上 30 歳未満、30 歳以上 40 歳未満、40 歳以上 50 歳未満、50 歳以上 60 歳未満、60 歳以上	1, 2, 3, 4, 5, 6
同船同職での経験年数 (experience)	1 年未満、1 年以上 3 年未満、3 年以上 6 年未満、6 年以上 10 年未満、10 年以上	1, 2, 3, 4, 5
乗船通算経験 (onboard experience)	1 年未満、1 年以上 3 年未満、3 年以上 6 年未満、6 年以上 10 年未満、10 年以上	1, 2, 3, 4, 5
人為的ミス (human error)	あり、なし	yes, no

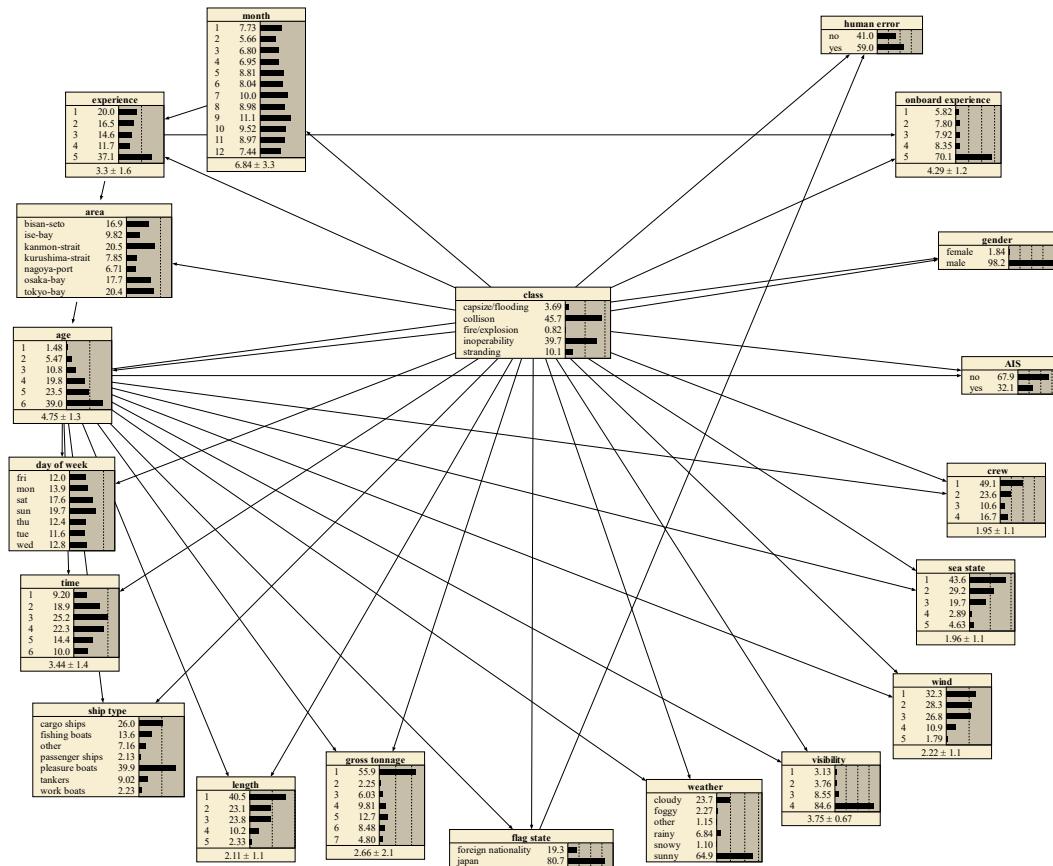


図2 船舶輻輳海域で発生する海難事故の TAN モデル

また、欠損値など不完全な記録等をスクリーニングし、最終的に 2009 年 1 月から 2022 年 12 月までに船舶交通の輻輳海域である東京湾、名古屋港、伊勢湾、大阪湾、備讃瀬戸、来島海峡、関門海峡海域（海上交通センターの情報提供可能海域）内で発生した 2,192 件の海難事故データベースを構築した。

3. 分析結果

3.1 データ駆動による TAN 構造の構築

処理したデータおよび式(1)に基づき、RIF 間の条件付き相互情報量を算出、図 2 に示す TAN モデルを構築した。また、図 2 で示される TAN モデルに基づき、すべてのノードについて、データから条件付き確率表(conditional probability table: CPT)を学習し、事後確率を算出した。その結果、事故類型としては、衝突 (45.7%)、運航不能 (39.7%)、乗揚 (10.1%) が多く、船舶要因についてみると、最も事故が多い船種はプレジャーボート (39.9%) であり、次いで貨物船 (26.0%)、漁船 (13.6%) となった。

3.2 感度分析

次に、相互情報値(mutual information value)を求め

る。相互情報値は、2 つの確率変数間の感度レベルを表し、値が高いほど、目的ノードに対する影響要因の感度が高いことを示す。これにより、目的ノードである事故類型への影響度の高い順に優先順位を付すことができる。

表 2 事故類型と RIFs の相互情報量

Node	Mutual Information	Entropy Reduction Percent	Variance of Beliefs
class	1.61101	100.00	0.40269
human error	0.46513	28.90	0.10095
ship type	0.10834	6.72	0.02365
length	0.10324	6.41	0.02336
gross tonnage	0.07299	4.53	0.01512
crew	0.04575	2.84	0.00948
AIS	0.04139	2.57	0.00857
onboard experience	0.03967	2.46	0.00526
time	0.03279	2.04	0.00552
month	0.02634	1.64	0.00375
weather	0.02473	1.54	0.00141
day of week	0.01676	1.04	0.00298
visibility	0.01574	0.98	0.00100
age	0.01560	0.97	0.00071
gender	0.01440	0.89	0.00048
wind	0.01344	0.83	0.00109
sea state	0.01313	0.82	0.00091
experience	0.01234	0.77	0.00202
area	0.01154	0.72	0.00101
flag state	0.00884	0.55	0.00105

表 2 によると、人為的ミスは、事故類型に対して

最も感度の高い RIFs であり、相互情報値は 0.46513 であった。また、船種、全長、総トン数といった船舶固有の値、そして、船員数、AIS 搭載の有無、乗船通算経験といった船舶の運航面に関する RIFs が、事故類型に大きく影響することが明らかになった。

次に、これら相互情報値の大きい 6 つの RIFs について、その影響度合いを詳細に検討するため、追加の感度分析を実施した。TAN 構造内の各変数の各状態の確率を順次 100%に増加させ、それぞれの同時確率を求めた。その結果を、表 3 に示す。

表 3 同時確率

		collision	stranding	capsize/ flooding	fire/ explosion	inoperability
	initial	45.70	10.10	3.69	0.82	39.70
human error	yes	72.80	13.70	2.85	0.26	10.40
	no	6.79	4.76	4.90	1.62	81.90
passenger ships	passenger ships	41.10	18.00	8.51	5.87	26.50
	cargo ships	61.70	10.40	1.16	0.70	26.10
	tankers	64.50	8.51	2.01	0.92	24.10
ship type	fishing boats	61.30	6.48	5.33	0.71	26.20
	work boats	41.20	10.30	13.60	3.73	31.20
	pleasure boats	26.20	10.40	4.09	0.31	59.00
	other	45.80	13.40	5.06	1.75	34.00
length	1	26.00	9.20	5.17	0.39	59.20
	2	55.80	10.90	3.59	0.68	29.00
	3	64.10	9.95	1.44	0.86	23.60
	4	57.80	10.80	2.06	1.70	27.70
	5	46.30	14.30	9.04	5.32	25.00
gross tonnage	1	34.70	9.20	4.38	0.25	51.50
	2	37.00	22.20	9.41	4.33	27.10
	3	60.90	10.20	5.00	1.61	22.30
	4	65.50	12.10	1.85	0.99	19.50
	5	59.90	9.68	1.43	1.20	27.70
	6	60.80	9.05	2.14	1.31	26.70
	7	53.70	12.80	3.77	2.60	27.10
crew	1	36.20	8.22	4.34	0.37	50.90
	2	50.50	13.50	4.35	0.76	30.90
	3	56.90	10.70	2.50	1.85	28.10
	4	59.80	10.30	1.58	1.56	26.80
AIS	yes	60.80	10.30	1.21	1.45	26.20
	no	38.60	9.93	4.86	0.52	46.10
onboard experience	1	16.20	13.70	9.62	2.04	58.50
	2	29.40	12.20	6.48	1.98	49.90
	3	35.80	8.56	6.44	1.24	48.00
	4	41.60	13.70	5.40	1.85	37.50
	5	51.60	9.25	2.37	0.42	36.40

表 3 においては、選択された RIFs が特定の状態に設定されたとき、各事故タイプの確率がどのように変化するかを示し、特に、事故類型に与える影響が最も大きい状態を太字・下線で示している。

したがって、例えば、船舶固有の値に焦点を置くと、船種がタンカーの場合、衝突事故に遭遇する確率が最も高く (64.5%)、さらにこれが全長 50m 以上 100m 未満、総トン数 300t 以上 500t 未満になると衝突事故に遭遇する確率は大幅に高まる (86.6%)。また、運航面に焦点を置くと、操船者乗船通算経験が 10 年以上の場合、衝突事故に遭遇する確率が最も高く (51.6%)、さらに AIS を搭載し、船員数が 11 人以上になると衝突事故に遭遇する確率が高まる (75.7%) 可能性が示された。

5. おわりに

本研究では、2009 年から 2022 年までの 2,192 隻の船舶を対象とした海難事故調査報告書に基づいて、TAN モデルを構築、海難事故類型と関連するリスク影響要因 (RIFs) との関係を分析した。結果として、人為的ミス、船種、全長、総トン数、船員数、AIS 搭載の有無、乗船通算経験の 6 つの重要な RIFs が同定された。さらにこれらの RIFs について感度分析によるモデル評価を行い、RIFs 間の相互作用についてデータに基づく有用な示唆を得ることができた。

本研究は、日本の船舶交通ふくそう海域における海難事故データに対して、BN を用いて要因間の相互作用を統合的・包括的に捉えるこれまでにない分析を試みた。今後の展開として、海難事故データをさらに詳細に細分化し、局所的な政策議論に機能する分析を実施していく予定である。

6. 謝辞

本研究の一部は「日本財団海上保安研究基金」の支援を受けたものです。また、本研究に際して、海難事故データをご提供いただく等、ご理解ご協力をいただいた海上保安庁交通部安全対策課および海上保安庁総務部教育訓練管理官の皆様にご感謝申し上げます。

7. 参考文献

- (1) Hänninen, Maria: Bayesian networks for maritime traffic accident prevention: Benefits and challenges, *Accident Analysis & Prevention*, Volume 73, pp.305-312, 2014.
- (2) Leveson, Nancy: A new accident model for engineering safer systems: *Safety Science*, Volume 42(4), pp.237-270, 2004.
- (3) Li, Huanhuan, Xujie Ren, Zaili Yang: Data-driven Bayesian network for risk analysis of global maritime accidents, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 230, 108938, ISSN 0951-8320, 2023.
- (4) Cao, Yuhao, Xinjian Wang, Yihang Wang, Shiqi Fan, Huanxin Wang, Zaili Yang, Zhengjiang Liu, Jin Wang, Runjie Shi, Analysis of factors affecting the severity of marine accidents using a data-driven Bayesian network, *Ocean Engineering*, Volume 269, 113563, ISSN 0029-8018, 2023.
- (5) Rawson, Andrew, Mario Brito, A survey of the opportunities and challenges of supervised machine learning in maritime risk analysis, *Transport Reviews*, Volume 43, Issue 1, pp.108-130, ISSN 0144-1647, 2023.

海洋構造物調査無人化を目指した 機能開発用 UUV プラットフォームの構築

学生正会員○ 天野 倅希（東海大学） 正会員 渡邊啓介（東海大学）

要旨

日本においても 2050 年までに GHG 排出量ネットゼロに向けた目標のもと、EEZ における洋上風力発電が活発化しつつある。洋上での風力発電では、プラットフォームが沖合であることから、移動アクセスが容易でなく、メンテナンス作業全体の低コスト化が大きな課題である。低コスト化のためには無人化が望ましく、特に水中心点検作業においては UUV（Unmanned Underwater Vehicle）の活用が期待される。しかし、UUV 運用には水密の確保、超音波装置利用、海洋環境という厳しい環境下での位置制御等、多くの工学的要素があり、実海域においてトライアルアンドエラーを繰り返しながら、機能開発を行う必要がある。本稿では、比較的 low コストで機能開発を繰り返せるようにするため、UUV プラットフォームを構築したので報告する。

キーワード：洋上風力発電、メンテナンス、船員教育、UUV、AUV

1. 研究の背景と目的

近年、世界的に風力発電の開発が拡大しており、陸上風力発電の建設地が十分でないため、洋上風力発電の開発が進んでいる地域がある。例えば、欧州では陸上風力発電用地の飽和により、EU が 2030 年までに約 100GW の洋上風力発電容量の達成を目指すという条件のもと、洋上風力企業の設置容量は今後も増加すると予想されている。⁽¹⁾

日本では、2050 年までに温室効果ガス排出量を実質ゼロにするカーボンニュートラルを実現するという目標が閣議決定された。2020 年、政府は「2050 年カーボンニュートラル実現に向けたグリーン成長戦略」を発表し、ネットゼロ社会の実現に向けて日本の産業界が取り組むべき 14 の重点分野を定めた。この戦略の下では、風力発電は非常に重要であると考えられており、2030 年までに 10GW、2040 年までに 30~45GW の洋上風力発電を導入するという目標を掲げ、14 の行動計画の一つとして設定されている。この高い目標を達成するためには、洋上風力発電の開発を加速させる必要があり、多くの洋上プラットフォームが日本列島の沖合に設置されることになる。⁽²⁾

これらの洋上風力発電プラットフォームは海岸から遠く離れた場所にあり、多くのプラットフォーム

ムへのアクセスは容易ではない。一般に、洋上風力発電施設を保守管理する際には、CTV（乗組員輸送船）を使って、専門の乗組員をプラットフォームに移動させなければならない。仮に 1 基のプラットフォームで 10MW の発電が可能だとすると、40GW の目標を達成するためには約 4000 基のプラットフォームを設置しなければならない。その場合、事業者はそれらのプラットフォームを巡回する CTV を雇わなければならない、メンテナンス費用が膨大になることは想像に難くない。現在、海中構造物の調査方法として、潜水士に代わって、ROV による点検⁽⁴⁾が使用されており、オペレータが水中カメラ画像を監視しながらシステムを操作する手法がとられている。しかし、ROV による調査では、ケーブルの引っ掛かり、操縦者への負担などが課題であり、万能とは言い難い状況である。⁽⁴⁾⁽⁵⁾

そこで筆者らは、各プラットフォームに無人点検ロボットシステムを常駐させ、水中構造物から水上構造物までの画像を基本データとして撮影し、陸上に送信して遠隔監視する方法を実現することを目指し、USV/UUV 複合型プラットフォームの開発を行っている。本稿では、そのうち、UUV 部分の構築と実海域での軌道追従実験によって、基本的な機能確認を実施したので、報告する。

2. システム構成

AUV の形状と各装備の配置、寸法を Fig.1、Fig.2 に示す。本体には二つの耐圧容器が備えられており、上部にはボードコンピューター、GNSS とカメラが搭載され、下部にはバッテリーが配置されている。スラスターはサージ、スウェイ、ヒープ方向に各二基ずつ合計六基を搭載している。浮力材は上部耐圧容器の左右に二つずつ取り付けている。前方と左右にはソナーを取り付けられており、障害物を検知するために用いる。本体底部には DVL が取り付けられており、音波を用いた海底からの距離計測や対地速度、耐水速度を計測することができる。これを利用し浮上時には GNSS による座標航行を行い、潜水時には DVL によるデッドレコニングを基本として、自律航行を行う。本体の重量は 15kgf となっており、持ち運びを簡易にするため側面に車輪を取り付けている。テザーケーブルを取り付けることで ROV としても運用することが可能である。

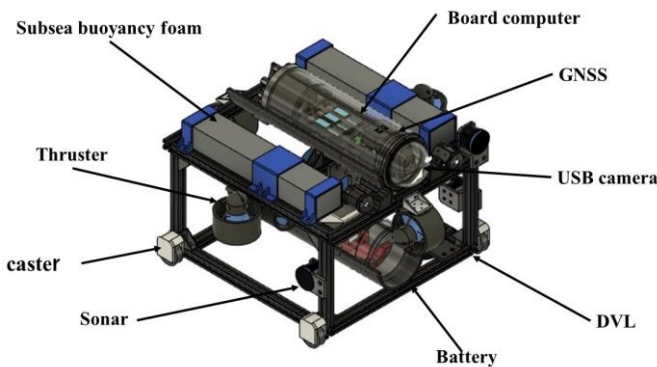


Fig.1 External view of AUV

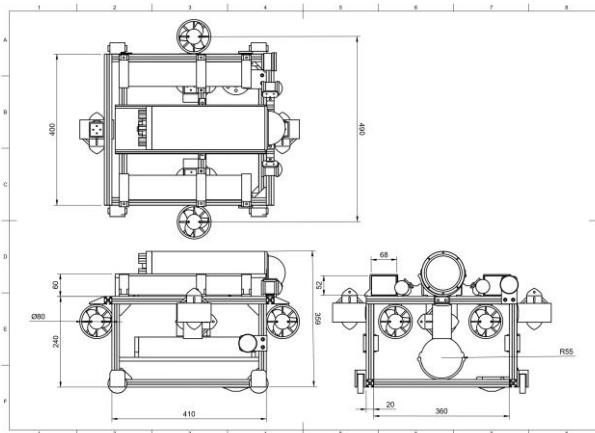


Fig.2 Dimension of the AUV

内部システムは Fig.3 に示すようにボードコンピューターが二台搭載されている。一台のコンピューター

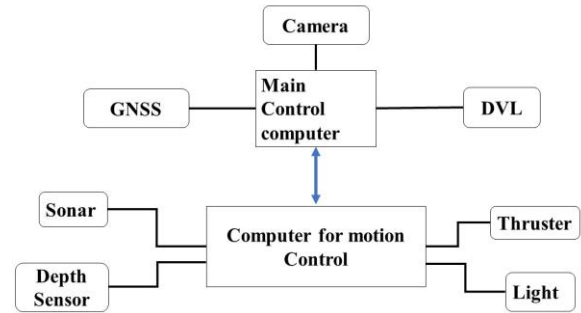


Fig.3 Schematic of control hardware

ターは主にスラスターやセンサーの入出力を行っており、もう一台は軌道制御アルゴリズムの計算、カメラからの画像処理などを行う構成とした。

3. DVL と GNSS の位置誤差の確認実験

実海域での軌道追従実験を行うにあたって、推測航法の精度は重要になる。そのため DVL と GNSS の性能比較をするための実験を行った。実験場所を Fig.4 に示す。

実験の結果を Fig.5 に示す。Fig.5 の左図は緯度経度の記録、右図はそれをスタート地点を原点として距離換算した(X,Y)座標の結果である。DVL と GNSS において、2～3メートル程度の誤差が生じるが、現状では、筆者らの行う制御目的には許容範囲と言える。比較実験の結果から、DVL が水中位置を比較的精度よく推定できることを確認することができた。

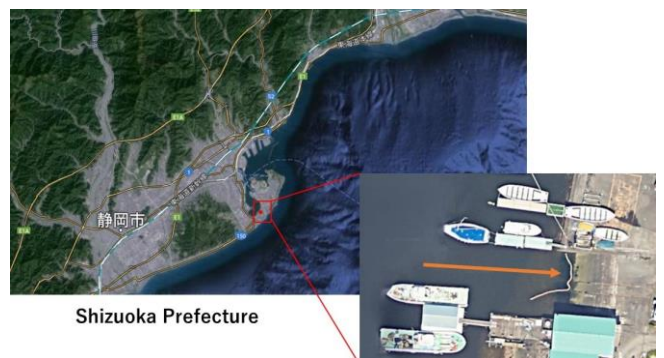


Fig. 4 DVL vs GNSS comparison experiment site

4. 深度と軌道の追従制御実験

次に、深度と与えられた軌道を追従する航行制御実験を実施した。実験場所は透明度が高い沖縄件宜野湾漁港で行った。実験場所を Fig.5 に示す。AUV の制御では、制御モードを設定し、条件が達成されるとモードが遷移する方式でプログラムを構

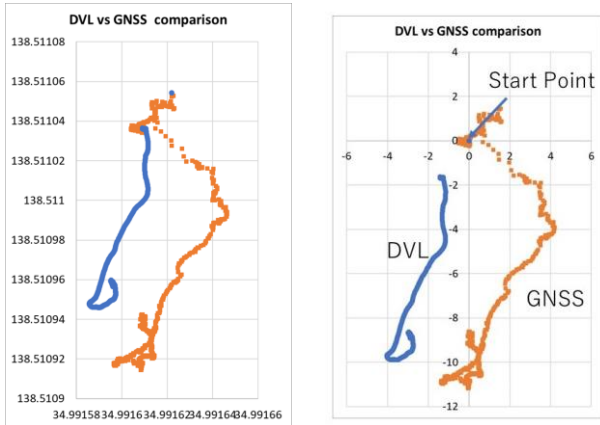
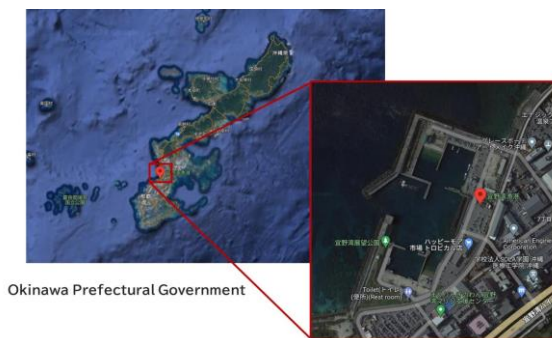


Fig.5 DVL vs GNSS position results



Okinawa Prefectural Government

Fig.6 AUV marine experiment station Okinawa

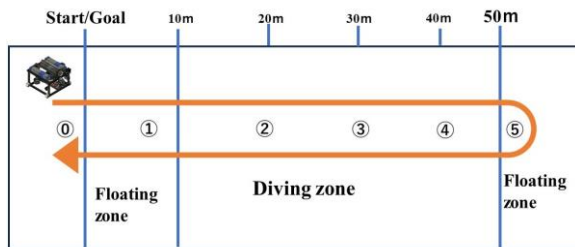


Fig.7 AUV control modes and its course

築した。設定した制御モードを Table.1 に、動作概要を Fig.7 に示す。スタート地点①から浮上したまま地点①まで航行し、ここで指定の深さまで潜航する。その後、地点②～⑤を航行し、地点⑤で一旦浮上してから 180 度方向転換して、再潜航し、同じ地点を戻ってきて、最後に地点①で浮上する。

実験の結果を Fig.8 から Fig.13 に示す。Fig.8 のグラフは DVL が推定した緯度・経度の変化をグラフ化したものである。Fig.9 はスタート地点を原点として、北方向に X 軸、東方向に Y 軸を取り、ロボットが緯度経度を距離に変換して位置制御に用いている座標を表したものである。Fig.10 は DVL から得た緯度・経度のデータを元に、地図上に軌道を表

したものである。実験を行った海域と DVL が示したデータが一致していることから、正確に位置情報の取得が出来たことが確認でき、Table.1 に示す制御モードが機能したことが確認できた。

Table1. Control mode table

Mode	Setting program
0	After GPS data income, start in 20 seconds.
1	The coordinates at the start are used as the origin. ①and setting
2	Heading to the 10m point ①and seting
3	Heading to the 20m point .Dive 0.5m after arrival. ② and setting
4	Heading to the 30m point ③ and seting
5	Heading to the 40m point ④ and setting
6	Heading to the 50m point ⑤ and setting
7	Surfaced, 180 degree turn. Dive when the direction is 10 degrees to the origin.
8	Heading to the ④point
9	Heading to the ③point
10	Heading to the ②point.
11	Heading to the ①point
12	Surfacing while heading to the ①point
13	Termination

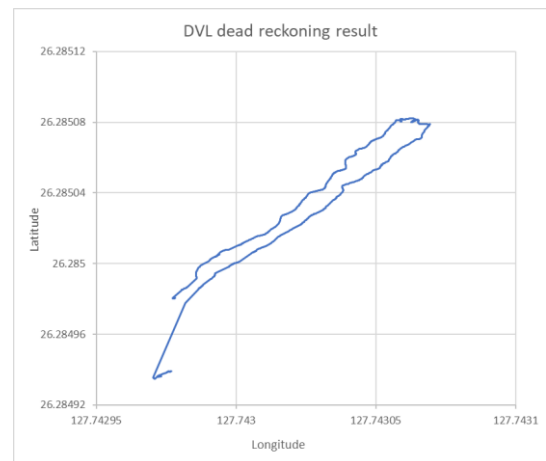


Fig.8 DVL dead reckoning coordinate (Lat,Lon)

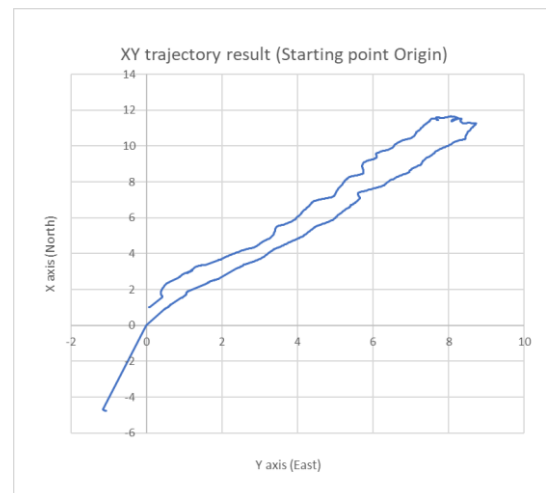


Fig. 9 DVL dead reckoning coordinate result (X,Y)



Fig.10 AUV trajectory in actual sea area

Fig.11 は AUV 本体の水深を表したものであり Fig.12 は海底からの高度を表したものである。

本実験では、Fig.5 のように浮上区域と潜水区域を設定しており、グラフから浮上航行時と潜水航行時の動きがグラフから見て取れる。深度センサーは本体上部耐圧容器の中央部に取り付けられており、AUV 浮上時の初期水深は約 0.25m にあり 0.5m 潜行という制御モード通りの動きを確認出来た。

Fig.13 は船首方向の変化を表したものである。実験開始時、角度は約 30 度方向を向いていたが -150 度に角度が変化しており、制御モード通りに 180 度転進したことが読み取れる。これらの結果から AUV の機能は正確に動作することが確認でき、制御モードの状態遷移も機能したことが確認できた。

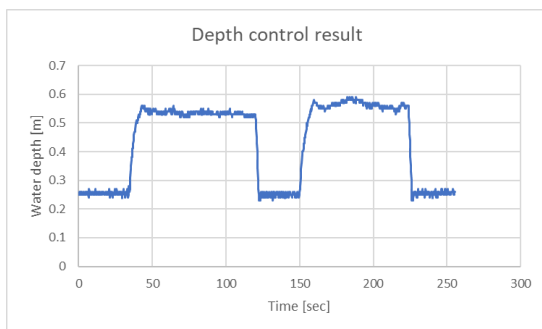


Fig.11. Depth control result

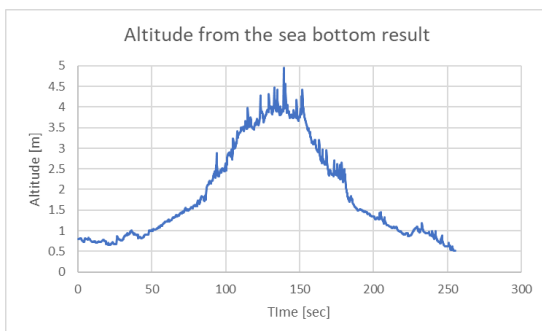


Fig.12 Altitude from the sea bottom

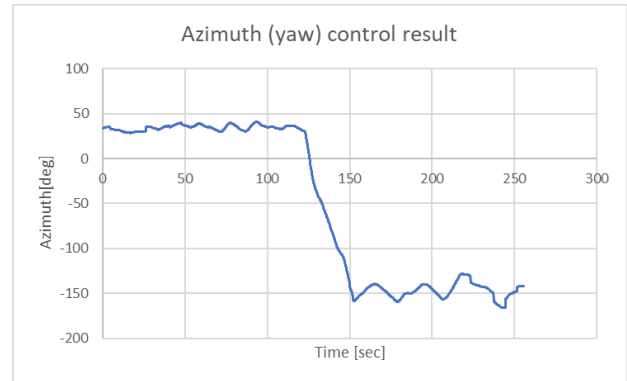


Fig.13 Azimuth angle control result

4. 結論

本研究では、洋上風力発電等の海洋構造物のメンテナンス作業無人化を最終目標として、比較的 low コストで機能開発を繰り返せるようにするため、UUV プラットフォームを構築し、サブシステムの機能確認実験を実施した。その結果、軌道追従、方位制御、深度制御等の基本機能が全てスムーズに機能し、waypoint を追従しながら航行可能であることが確認できた。今後は、海中構造物の画像取得を実施しながら、USV と合わせて洋上・水中での点検作業自動化手法の開発を実施していく予定である。

参考文献

- (1) E.P. Soares-Ramos, L. de Oliveira-Assis, R. Sarrias-Mena, L.M. Fernández-Ramírez, “Current status and future trends of offshore wind power in Europe”, *Energy*, Vol.202, 2020, 117787.
- (2) K. Iwata, S. Kyoi, Y. Ushifusa, “Public attitudes of offshore wind energy in Japan: An empirical study using choice experiments”, *Cleaner Energy Systems*, Vol.4, 2023, 100052.
- (3) Capocci R, Dooly G, Omerđić E, Coleman J, Newe T, Toal D. “Inspection-Class Remotely Operated Vehicles—A Review”, *Journal of Marine Science and Engineering*. 2017; 5(1):13.
- (4) 野上 周嗣, 加藤 絵万: 港湾構造物の目視調査への水中ドローンの活用に関する検討, *インフラメンテナンス実践研究論文集*, 2022 年 1 巻 1 号 p. 94-99
- (5) 喜多 司, 田中 敏成, 鈴木 博善: 港湾構造物点検用水中ロボットの自動航行についての検討, *日本船舶海洋工学会講演会論文集 2022*, 第 35 号 p. 457-460

パラメトリックロールを避けるための ウェザールーティングに関する一考察

正会員 ○藤本 航（一般財団法人日本海事協会）

非会員 武田 勝利（一般財団法人日本海事協会）

非会員 石橋 公也（一般財団法人日本海事協会）

要旨

パラメトリックロールを回避するためには、パラメトリックロールのリスクが高い波条件・船舶状態を示すポーラーチャートを活用することが有効である。今回、パラメトリックロールを回避するためにポーラーチャートをウェザールーティングにどう組み込めばよいかについて考察した。パラメトリックロールによるロール角に従って、航行に伴うコストを増大させることで、パラメトリックロールを回避するような航路を得られる。パラメトリックロールは、波長が長い波条件で生じやすく、北太平洋・北大西洋で起こりやすい。こういった海域でウェザールーティングするためには、アンサンブル予報が有効である。

キーワード：ウェザールーティング、パラメトリックロール、ポーラーチャート、アンサンブル予報

1. 緒言

大型コンテナ船において、大規模なコンテナ流出事故が相次いでいる。Luthy (2023)が、コンテナ船のコンテナ流出事故の事例を整理したところ、多くの事故事例ではパラメトリックロールがその原因として疑われている⁽¹⁾。パラメトリックロールを避けるためには、パラメトリックロールの危険性が高い針路・船速等をマッピングしたポーラーチャートを参照することが有効である。日本海事協会は、2023年2月に「パラメトリックロール対策に関するガイドライン」を発行し、その中でポーラーチャートの作成方法について述べている⁽²⁾。

このポーラーチャートを活用すれば、予定航路上でのパラメトリックロールのリスクを出航前に推定できる。また、そのリスクを最小化するように航路計画を立てることもできる。本研究においては、パラメトリックロールを避けるために、どのようにポーラーチャートを有効活用すればよいかについてケーススタディを行う。

2. パラメトリックロールとポーラーチャートの概要

パラメトリックロールは、船体の復原力が波浪によって周期的に変化し、その変化の周期がロール固有周期の半分程度である際に顕著になる。なお、シンクロナスロール（同調横揺れ）は、波浪による船体の強制動揺の周期が、ロール固有周期と一致する

場合に顕著になるため、パラメトリックロールとはメカニズムが異なる。船首部に大きなフレア形状や顕著なトランサムスターンを持つコンテナ船や自動車運搬船では、波の山・谷によって水線面積が大きく変化する。そのためこういった痩せ型船型では復原力変動が大きくなりやすく、パラメトリックロールのリスクが大きい。

パラメトリックロールの応答値を求めるための1自由度の支配方程式は式(1)で表すことができる。

$$\ddot{\phi} + 2\alpha\dot{\phi} + \gamma\phi^3 + \omega_0^2 f(\phi, t) = 0 \quad (1)$$

ここで、 ϕ はロール角、 α 、 γ はそれぞれ減衰に関する1次及び3次の係数、 $f(\phi, t)$ は非線形の復原力項でGMとGZ（復原てこ）の変動成分が含まれる。この1自由度の運動方程式に基づき、数値シミュレーションすれば、パラメトリックロールによる横揺れ角を求められる。数値シミュレーションによって得られた横揺れ角とGrimの有効波理論⁽³⁾を短波頂に拡張した梅田ら^(3,4)の方法を適用すれば、ポーラーチャートを作成することが可能である。詳細は参考文献^(2,4)に譲る。

様々な積付状態、有義波高、波周期、船速、針路で上記のシミュレーションを行えば、パラメトリックロールのリスクが高い状態を示すポーラーチャートが得られる。図1にポーラーチャートの例を示した。赤い領域は、パラメトリックロールによるロール角の最大値が大きい針路・船速を表している。

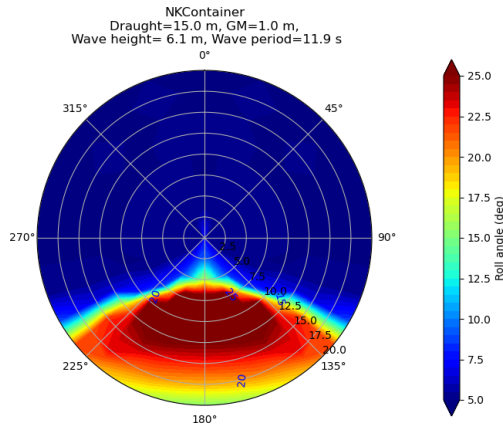


図 1 パラメトリックロールのポーラーチャートの例

3. ウェザールーティング手法

ウェザールーティングを、陸地を考慮した最短経路問題と捉える。グラフ理論において、グラフとはノード（節点）とエッジ（辺）からなる図形であり、最短経路問題ではあるノードから別のノードまでの最短経路となるエッジの組み合わせを求める。今回、地形データにおいて海上や運河に該当する格子点をノードとすれば、船舶の航行を表現できる。ノード間のエッジのコストとして、大圏距離を割り当てた。得られた航跡を十分滑らかにするためには、針路方向の分割を細かくする必要があり、本研究では約 8° 刻みの分割とした。本研究では、最短経路問題の解法として、ダイクストラ法⁽⁶⁾を適用した。

グラフ上のエッジのコスト $D(i, j)$ を、有義波高に従い増大させた上で最短経路を求めることで、有義波高が高い海域を避けるような経路を作る。

$$D(i, j) = L(i, j)f(\text{Roll}(i, j))$$

ここで、 i, j はノードのインデックス、 L は大圏距離である。 $f(\text{Roll}(i, j))$ はコスト増大関数であり、以下の式とした。

$$f(\text{Roll}(i, j)) = \max(1, \max(\text{Roll}_{\text{threshold}}, \text{Roll}(i, j))) \quad (1)$$

$f(\text{Roll}(i, j))$ は折れ線状の関数であり、有義波高が閾値 $\text{Roll}_{\text{threshold}}$ を超えた場合に線形に増大する。 $\text{Roll}(i, j)$ は、ノード i からノード j に航行する際に遭遇する海象パラメータ、針路、船速に基づき、ポーラーチャートから求める。

有義波高は時間に依存するため、厳密にはグラフ上のエッジのコストを時間変化させる必要があるが、

そうした場合には計算コストが大幅に増大する。そのため、空間+時間の問題を、空間の問題に帰着させる。荒天回避有りの航跡は、荒天回避無しの針路とおよそ垂直方向に変化するため、割り当てられた海域内を通る時間はおよそ同じと考える（図 2）。この手法は 2DDP と呼ばれる^(5,6)。その時刻については、全海域の有義波高を参照する必要はなく、その割り当てられた海域のみを考慮すればよい。そこで、提案方法では次のような手順で荒天回避を考慮するためのグラフを作成する。

- ① まず有義波高を考慮せずに（荒天回避無しで）経路を求める
- ② 海域の各格子点から最も近い経路上の点を求め、その時刻を海域に割り当てる
- ③ 海域の各格子点の座標とその時間から、有義波高を抽出する
- ④ 異なる時刻で抽出した有義波高のマップを一つのマップに合成することで、空間+時間の有義波高の分布が、空間の分布に帰着される
- ⑤ 有義波高からグラフ上のコストを計算する

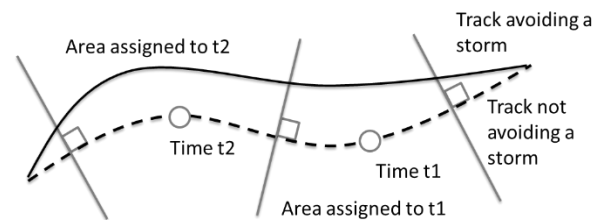


図 2 2DDP における海域の通過時間の割り当て。

4. ケーススタディ

前述した Luthy (2023) で述べられている事故事例のうち、あるケースでは、2021 年 1 月 3 日～2021 年 1 月 18 日ごろにかけて、東京沖からハワイ沖にかけて 10kt 程度で航行したところ、ロール角 25～30 度を記録し、多数のコンテナを流出した。この事例を参考にケーススタディを行う。まず、全くウェザールーティングをしなかった場合にパラメトリックロールのリスクがどの程度になるかを示すために、この出発地と到着地を大圏航路で航行した場合を考慮する。なお、これは実際の事故事例における実際の航路とは別の仮想的な航路であり、本ケーススタディは実際の事故原因を直接示すものではない。船型データは、本事故船に類似した本会独自の 14,000TEU 相当の仮想コンテナ船の船型及び要目を用いた（表 1）。満載状態、船速約 10kt、GM=1m を仮定して、ポーラーチャートを作成した。

表 1 試計算に用いた仮想コンテナ船の要目⁽⁷⁾

Length (L_{pp})	352.0m
Breadth	50.0m
Draft	15.0m
C_b	0.676
Bilge keel (length)	From S.S.3.95 to S.S.6.0
Bilge keel (width)	0.4m

ECMWF の波浪追算値 ERA5⁽⁸⁾に基づきこの大圏航路上 (図 3) での海象パラメータを抽出し、ポーラーチャートからロール角を予測した (図 4)。それによれば、ロール角は 25 度程度に達している。なお、図 3 で示しているコンターは、2DDP で得られた ERA5 による有義波高マップであり、大圏航路上で各ステージに割り当てた時刻で抽出した波高を、一つのマップに表示している。波浪追算値は実際には事後的に得られるもので、出航前には得られないデータである。出航前にパラメトリックロールを予測するには波浪予報を使うしかないが、ECMWF の決定論的波浪予報値 HRES-WAM の予報期間は 10 日であり、今回の航海には不足している。そのため、予報期間が 15 日あるアンサンブル予報値 ENS-WAM を用いた。アンサンブル予報値に基づく海象パラメータとポーラーチャートからパラメトリックロールを予測すれば、パラメトリックロールのリスクを確率的に評価できる。例えば、今回のケースでは、ロール角の閾値 20 度を超えるアンサンブルの数は 44 個であった。これを全アンサンブル数で割れば、ロール角が 20 度を超える確率は 88% と評価できる。

アンサンブル予報から、予めパラメトリックロールを避けるような航路を計画したい。アンサンブル予報では $N_{ens} = 50$ 個ほどのアンサンブルが得られるため、それぞれでパラメトリックロールによるロール角 $\text{Roll}(i, j)_k$ ($k = 1 \dots N_{ens}$) が得られるので、それらを平均して得られるロール角

$$\overline{\text{Roll}}(i, j) = \frac{1}{N_{ens}} \sum_{k=1}^{N_{ens}} \text{Roll}(i, j)_k$$

を基にダイクストラ法による最適航路を求める。その結果が図 3 の黒実線に示した。参照値として、波浪追算値 ERA5 に基づく最適航路も赤点線に示している。アンサンブル予報に基づく最適航路は、波浪追算値 ERA5 に基づく最適航路よりも南下しており、高波高域を避ける保守的な航路となっている。得ら

れた最適航路上で、改めて ERA5 より海象パラメータを抽出し、パラメトリックロールによるロール角をポーラーチャートから推測したのが図 5 である。アンサンブル予報 HRES-WAM に基づく最適航路で航行すれば、ロール角は 5 度以下となり、非常に小さく抑えられているということがわかる。

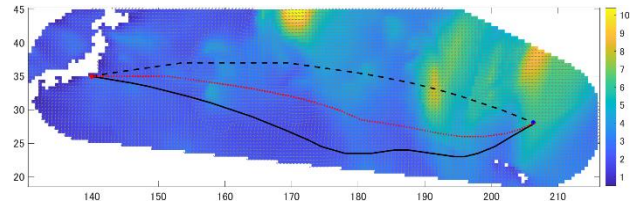


図 3 東京沖からハワイ沖にかけての大圏航路 (破線)、波浪追算値 ERA5 に基づいた最適航路 (赤点線)、アンサンブル予報 ENS-WAM に基づいた最適航路 (黒実線)。コンターは 2DDP で得られた ERA5 による有義波高マップ。

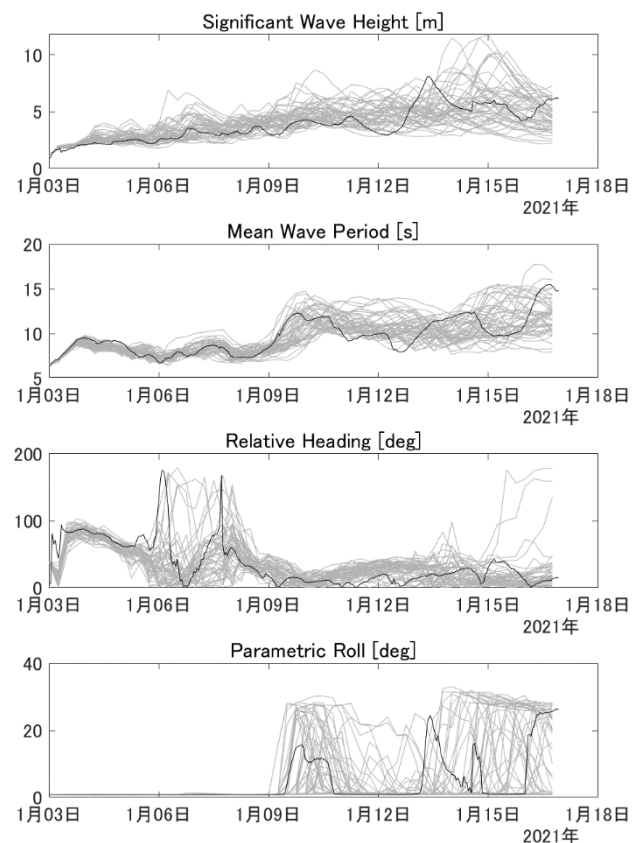


図 4 波浪追算値 ERA5 (黒線) とアンサンブル予報値 ENS-WAM (グレー線) に基づき大圏航路上で抽出した海象パラメータ、およびポーラーチャートから推定したパラメトリックロールによるロール角。

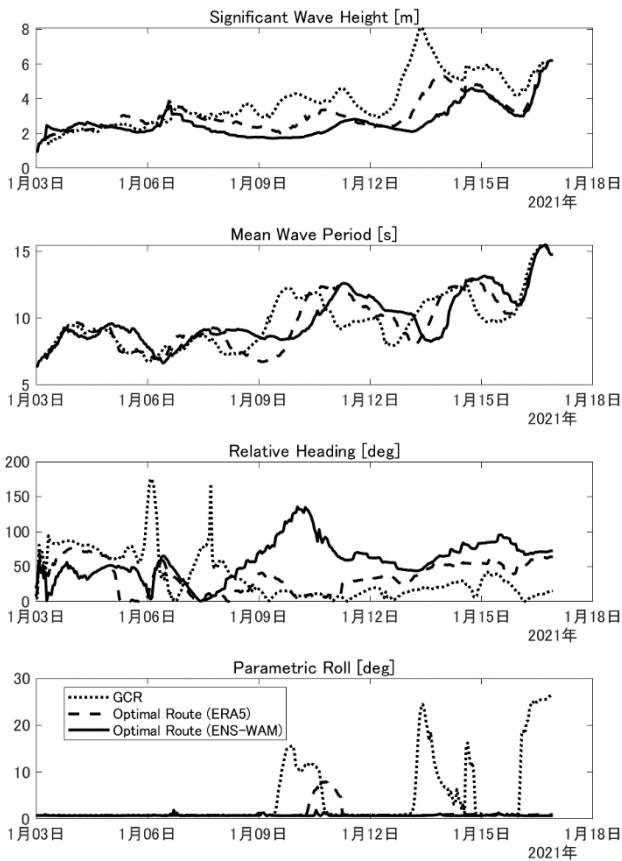


図 5 大圏航路（点線）と、波浪追算値 ERA5 に基づく最適航路（実線）と、アンサンブル予報 HRES-WAM（破線）に基づく遭遇海象パラメータと、予測されたパラメトリックロールによるロール角。

5. 結言

パラメトリックロールは、大型コンテナ船に対してコンテナ流出事故の原因になる。今回、パラメトリックロールによるロール角を予測するポラーチャートをウェザールーティングに活用し、パラメトリックロールを回避するような航路を計画する手法について考察した。北太平洋は波長が長い波が生じやすく、パラメトリックロールの危険性がある海域だが、北太平洋を航海するには 10 日以上長い予報期間が必要となる。通常決定論的予報では予報期間が不足するため、アンサンブル予報を活用することが有効である。アンサンブル予報により、パラメトリックロールに遭遇する確率を計算できるほか、パラメトリックロールのリスクを最小限に抑えるような航路を計画することができる。

本研究の限界としては、船速の変化を考慮していない点が挙げられる。また、ロール角のみに着目しており、燃費性能を考慮していない。今後は、パラ

メトリックロールのリスクと燃費性能のバランスを考慮したウェザールーティング技術の開発が期待される。また、実際の航海のように、更新され続ける波浪予報値を参照するように本手法を改良する予定である。

6. 参考文献

- (1) V. Luthy: *Probability of Occurrence of Parametric Roll on a Predefined Sea State*.
- (2) 日本海事協会: パラメトリックロール対策に関するガイドライン, 2023.
- (3) O. Grim: Beitrag zu dem Problem der Sicherheit des Schiffes in Seegang, *Schiff Hafen*, 6, pp.490-497, 1961.
- (4) 梅田直哉 et al.: パラメトリック横揺れを防止するための簡易操船ガイドランス, *ClassNK 技報*, Published online 2023/2023.
- (5) C. de Wit: Proposal for Low Cost Ocean Weather Routing, *Journal of Navigation*, 43, pp.428-439, 1990.
- (6) S. Calvert et al.: A Dynamic System for Fuel Optimization Trans-Ocean, *Journal of Navigation*, 44, pp.233-265, 1991.
- (7) K. Sugimoto et al.: Non Linear Effect on Wave-Induced Loads for Hull Structural Design: Bulk Carrier, Container Carrier, Vehicles Carrier, *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 2A-2020, 2020.
- (8) H. Hersbach et al.: The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, pp.1999-2049, 2020.

漁業実習船におけるプロペラ材質変更の効果に関する研究

正会員○清水 健一（長崎大学） 正会員 山脇 信博（長崎大学）
 正会員 森井 康宏（長崎大学） 非会員 山本 匡也（長崎大学）
 非会員 筒井 英人（長崎大学） 非会員 井上 俊之（ナカシマプロペラ株式会社）
 非会員 林 和也（ナカシマプロペラ株式会社） 非会員 山磨 敏夫（ナカシマプロペラ株式会社）

要旨

近年、船用プロペラにCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic:以下「CFRP」)製を搭載した船舶が導入されており、長崎大学水産学部の漁業実習船長崎丸でも2023年1月期のドックにおいてCFRP製に換装した。しかしこれまで実船での効果の検証はほとんど行われておらず、本研究では実船でその効果を水中放射雑音、船内騒音・振動環境、および燃料消費量から比較した。このうち、水中放射雑音は深度20mにおいて小型メモリー式ハイドロフォンで計測し、同時に騒音と振動を船内7か所で測定した。さらに燃料消費量を同一温度(15°C)での1L当たり航走距離で比較した。その結果、換装後に、①水中騒音は平均2dB低くなり、100-150Hzのピーク周波数が不明瞭となった、②船内騒音は換装前からIM0船内コードの基準値を下回っていたが、さらに低減された区画があった、③振動は上下方向の100-150Hzの領域で明確な減衰が認められた、④電動機出力が最大10%減少し、それに伴い1L当たりの航走距離が最大23%増加していた、ことが明らかとなった。

キーワード：船舶、推進性能、CFRPプロペラ、漁業実習船

1. はじめに

2010年頃から船用プロペラにCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic:炭素繊維強化プラスチック)を用いた船舶が導入されている。CFRP素材は金属製と比較して、軽量、高弾性、錆び難い、高い振動減衰性能などの特徴がある⁽¹⁾。これにより燃費の向上やCO₂の削減、振動や騒音の低下による居住環境改善、水中騒音の低減などが期待されるが、導入時のコストの問題もあり、これまでの導入実績は少なく、2019年時点でフェリー等の一般商船、漁船、調査船など内航船15隻にとどまる⁽²⁾。例えば、海洋調査船に搭載することで水中放射雑音の低減効果による観測データの質向上が期待されるが、これまで実船搭載例が少なく、実船での効果の検証は行われていない。

一方、2018年3月に竣工した長崎大学水産学部の漁業実習船長崎丸は観測時の操船性向上、居住環境の改善、水中放射音低減等のため、電気推進方式により建造されているが、このたび、2023年1月期のドックにおいてプロペラを従来の金属製からCFRP製に換装した。そこで本研究では同一船舶において、金属製とCFRP製のプロペラ両方で水中放射雑音や居住環境、燃料消費量を比較し、CFRP製プロペラの導入効果を実船で検証することを目的とした。

2. 材料と方法

2.1 対象船舶の概要

調査対象とした水産学部漁業実習船長崎丸の主要目は全長68.93m、幅12.30mで、連続最大出力は2000kW×210.8rpm(以下、この組み合わせ「高速モード」とする)、600kW×140.5rpm(以下、「調査観測モード」とする)、主発電機は定格出力800kWが4台となっている。必要な電力を賄うために、調査観測モードでは主発電機を2台、高速モードでは4台すべてを稼働させる必要がある。また、プロペラは換装前の金属製が直径3100mm、換装後のCFRP製が直径3200mmとなっており、いずれもハイスキュー型である。換装後は空中重量でブレード1枚当たり約3%軽量化されている。換装前後のいずれも4翼可変ピッチプロペラ1基である。表1に各プロペラピッチに対するおよその速力を示す。

表1 各モードとCPP翼角とおよその速力

作動状態	プロペラ 回転数 (rpm)	CPP翼角(°)	船速
調査観測モード①	140.5	12.9~14.2	8kt
調査観測モード②	140.5	18.1~18.6	10kt
高速モード	210	18.5~19.2	MAX

2.2 水中騒音計測

過去の文献³⁾を参考に、図1に示すように水中ハイドロフォン（以下、「水中騒音計」）を垂下したブイの周りを一定の速力で航走することで水中騒音を計測した。水中騒音計設置ブイの概要を図2に示す。ブイには携帯型GPS端末（Garmin社製、Garmin etrex 20x）を取り付け、1秒ごとに位置情報を収録した。さらに、ブイに結んだ長さ20mのロープ下端の金属製フレーム内にアクアサウンド社製の水中騒音計AUSOMS-micro（録音レベル:80-150dB(0dB re 1 μ Pa), 録音周波数範囲:100Hz-20kHz, サンプル周波数:48kHz)を取り付け、水中騒音を計測した。得られたデータは市販の解析ソフト（spectraPLUS-SC）により、周波数解析を行った。

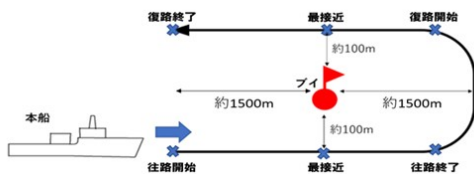


図1. 水中騒音計測の様子

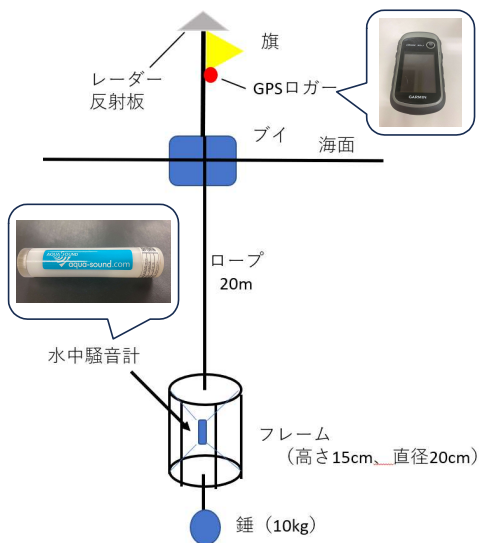


図2. 水中騒音計測ブイ

なお、金属製プロペラ計測時においてブイの位置に「ずれ」がみられたため、作図により位置を補正した。まず、図3に示したように本船の計測開始位置、最接近位置を往路、復路ともに記載し、その航跡を線AB、線FEで結ぶ。その後、航跡に対して最接近位置BおよびEから進行方向左側に垂線を引く。ブイの最接近時間での位置を往路、復路ともに入れ、航跡を線CDで結んだ。その後、ブイの航跡CDを

本船からの垂線と重なるように平行移動させ、線分C'D'とした。点C'、点D'からそれぞれ線AB、線FEに垂線を下ろし、線ABとの交点を点G、線FEとの交点を点Hとした。線分C'G、およびD'Hの長さがブイと本船との相対距離を示す。本研究ではこのようにして補正したブイの位置と本船位置から平面航法の算式を用いて相対距離を算出した。

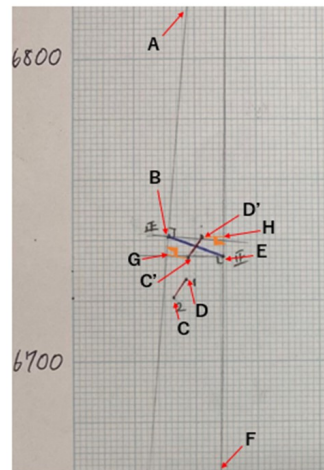


図3. GPS位置補正の一例

2.3 船内騒音・振動計測

船内騒音はCENTER社製の322 SOUND LEVEL METER（測定可能音圧:30~130dB）を用いて計測した。図4に示す通り、プロペラ換装前後で同じ場所で計測することとし、①ブリッジ、②士官室前通路、③サロン前、④講義室兼食堂、⑤談話室、⑥機関室内、⑦プロペラ軸直上の7か所で行った。このうち、船内騒音計測についてはJIS Z 8731に基づき、扉は閉めた状態で1分間計測し、最大・最小音圧を求めた。また、測定時はA特製音圧レベル、動特性はFASTとした。一方、振動計測はリオン社製振動計(VA-12)により、上記の騒音計測時に同時に同じ場所で行った。一か所につき、上下、左右、前後の3方向加速度を計測した。

2.4 燃料消費量計測

水中騒音の計測時において、計測開始から終了までの間6分間の燃料消費量(L)、推進電動機出力(kW)、FO取込温度(°C)を求めた。燃料消費量は、温度による膨張を考慮して同じ温度での使用量で比較するため、FO取込の平均温度(°C)を利用して日本産業規格の燃料油の温度に対する容量換算係数表を用いて、燃料油が15°Cの際の容量に換算した。

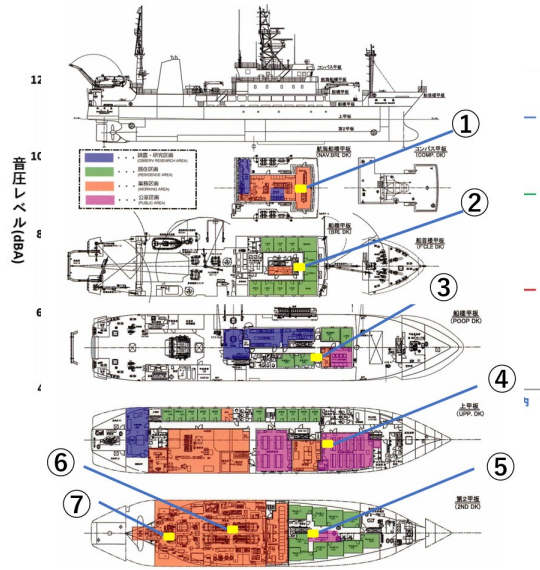


図 3. 船内騒音・振動計測場所

3. 結果

3.1 水中騒音計測結果

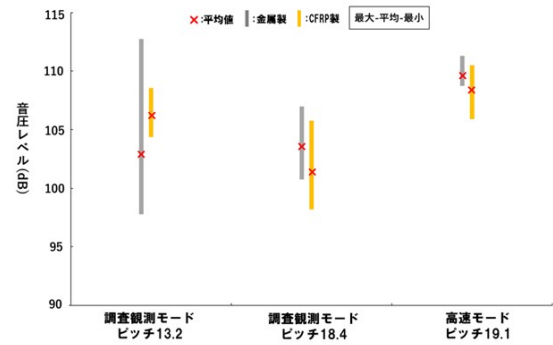
表 6 に各船速における最接近距離を示す。概ね 100m 以内まで接近していたが一部には 100m を少し超えたところがあった。

表 6. 計測時のブイとの最接近距離

		調査観測モード ピッチ13.4	調査観測モード ピッチ18.4	高速モード ピッチ19.1
金属製プロペラ の最接近距離	往路(m)	80	72	89
	復路(m)	85	68	111
CFRP製プロペラ の最接近距離	往路(m)	110	109	75
	復路(m)	117	125	71

また、図 5 は金属製プロペラ(灰色)と CFRP 製プロペラ(黄色)の水中騒音測定結果を比較したもので、横軸に各条件、縦軸に距離 1m に基準化した音圧レベル(dB)を示す。図から調査観測モードのプロペラピッチ 18.4°と高速モードでは、平均値が金属製プロペラのほうが大きい値となった。一方、調査観測モードのプロペラピッチ 13.4°では、最大値は金属製プロペラのほうが大きい値となったが、平均、最小は CFRP 製プロペラのほうが大きい値となった。これについて、今回の計測では表 6 に示す通り金属製プロペラの計測時に本船がブイに 120m ほどしか近づけていないことから、プロペラの騒音をうまく拾えていなかった可能性が考えられる。

続いて、もっとも振動が大きかった高速モードでの各プロペラの周波数解析結果を図 6 に示す。図は横軸に周波数、縦軸に CFRP 製装着時の計測時の最



接

図 5. 各モードでの水中騒音音圧レベルの比較

接近距離を基準とした音圧でプロペラごとに色分けしたものである。図から、金属製プロペラではいずれの場合も 100~150Hz に周波数のピークを示した一方、CFRP 製プロペラではこれらの周波数のピークがいずれの速度でも不明瞭となっていた。

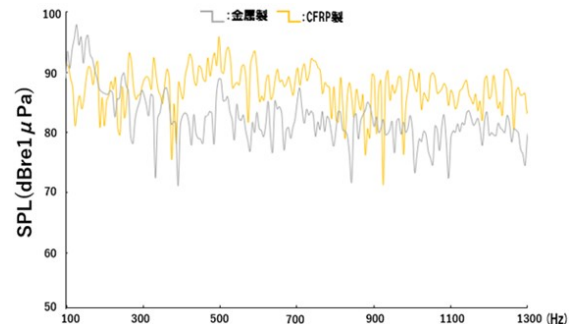


図 6. 高速モードでの水中騒音 FFT 解析結果

3.2 船内騒音・振動計測結果

高速モードにおける船内騒音レベルの測定結果について、図 7 に示す。図は各測定場所の船内騒音を、プロペラ材質ごとに色分けしている。図には IMO の騒音コードにおける最大許容音圧レベル⁽⁴⁾も併記している。図より、船内騒音の平均は金属製、CFRP 製ともにいずれも IMO 船内コード基準値を下回っていたが機関室内を除いてすべての区画において金属製プロペラのほうが大きい値となっていた。

また、振動計測の結果として、最も明確に現れた高速モードでの上下方向の FFT 結果を図 8 に示す。図より、金属製プロペラ装着時と比べて特に CFRP 製プロペラへの換装後には 70-120Hz で山なりに出ている振動が大きく下がっていることが分かった。図 6 で示したように、水中騒音の FFT 解析結果で

CFRP 換装後に 100~150Hz の周波数でピークが不明瞭となっていたのはこの効果が考えられる。

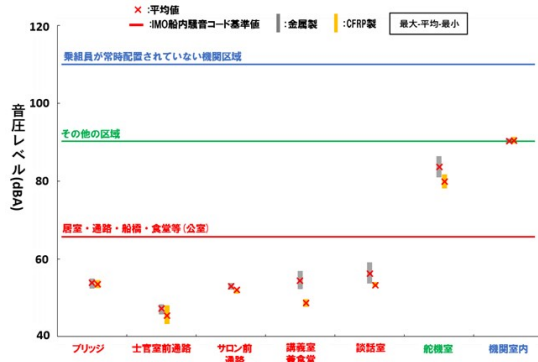


図 7. 高速モードでの船内騒音計測結果

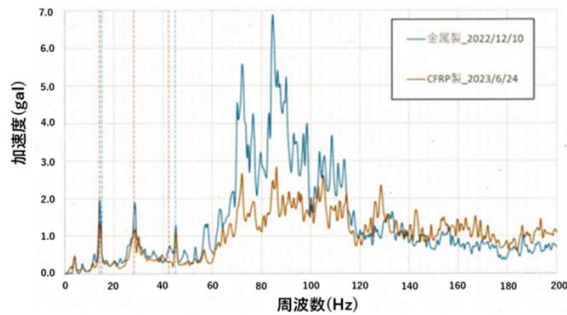


図 8. 高速モードでの船内振動計測結果

3.3 燃料消費量測定結果

表 7 に各回転数、プロペラピッチにおける、1L あたりの航走距離(m/L)、平均速力、および平均推進電動機出力を示す。まず、平均推進電動機出力ではすべての回転数、プロペラピッチで、CFRP 製プロペラの方が金属製プロペラより低くなっており、最大では 11%下がっている。CFRP 製プロペラには高弾性によるプロペラへの負荷低減効果が期待されている⁽²⁾ことから、これにより平均推進電動機出力の値が低くなったと考えられる。また、1L あたりの航走距離(m/L)は、どの条件においても、CFRP 製プロペラの方が金属製プロペラより大きい値となっており、最も明確な変化が見られた調査観測モードのピッチ 13.2°では 23%向上していた。この違いについて、観測時の気象条件はいずれもほぼ同じであり、さらに、船底の汚染状況についても金属製プロペラ時のドック上架時と CFRP 製プロペラの換装時のドック上架時でいずれも船底汚染はあまり見られなかった。以上から船底汚染の影響を無視できるとすると、1L あたりの航走距離が増加したのは CFRP 製プロペラに換装に伴い、推進効率の向上を反映した結果といえ

る。この結果を利用すると、例えば調査観測モードにおいて長崎から沖縄・那覇まで直線距離で約 423 マイルの間を航走した場合には従来の金属製プロペラと比較して約 1700L の燃料使用削減効果が期待できる。

表 7 各モードでの燃料消費量の比較

	調査観測モード ピッチ13.4		調査観測モード ピッチ18.4		高速モード ピッチ19.1	
	金属製	CFRP製	金属製	CFRP製	金属製	CFRP製
1Lあたりの航走距離 (m/L)	89.5	110.4	85.5	105.3	42.1	45.3
平均速力 (kt)	8.1	7.9	10.1	10.3	13.4	13.6
平均推進電動機出力 (kW)	500	447.5	677.7	634.9	2155	2051.5

5. まとめ

本研究ではプロペラ材質を従来の金属製から新素材の CFRP 製に換装したことに伴い、同一船舶においてその効果を水中騒音、船内騒音、燃料消費量から比較した。その結果、水中騒音に関しては、音圧値で平均 2dB 減少し、周波数では 100-150Hz のピークが不明瞭になっていた。船内騒音は換装前から基準値を十分満たしていたがさらに改善された。燃料消費量に関しては、調査観測モードのピッチ 13.2°において、平均推進電動機出力は最大 11%減少し、1L 当たりの航走距離(m/L)が最大 23%程度増加していた。以上より、金属製プロペラから CFRP 製プロペラに換装したことで、水中騒音や船内騒音・振動の抑制、推進効率の改善効果が得られたと言える。

参考文献

- (1) 山磨敏夫・櫻井貴哉：CFRP プロペラの研究開発, マリンエンジニアリング学会誌, 52 巻, 第 2 号, p15, 2017.
- (2) 山磨敏夫・櫻井貴哉：CFRP プロペラの研究開発, 日本船舶海洋工学学会誌, 第 16 号, p12, 2019.
- (3) 楠本成美・八木光晴・木下幸・山脇信博・森井康宏・清水健一:長崎丸が発する水中騒音の特製: 速力と距離が音圧および周波数に及ぼす影響, 長崎大学水産学部研究報告, 第 98 号, p12, 2017.
- (4) 高尾陽介・松本知哉:騒音コードの概要及び NK の取り組み, 日本船舶海洋工学学会誌, 第 58 号, p9, 2015.

最新気象予報技術を活用した運航判断-4

- 強風遭遇リスクを考慮した離着棧可否評価 -

正会員○濱地 義法（神戸大学）

正会員 大澤 輝夫（神戸大学）

正会員 林 美鶴（神戸大学）

要旨

本研究では、気象庁 AMeDAS 観測値及びメソ数値予報モデル格子点値（MSM-GPV 約 5km）の風向風速データを用いて、離着棧時の大型船舶が強風に遭遇する危険性を調査した。大阪湾に位置する神戸、神戸空港、関空島の AMeDAS 観測点における最大瞬間風速値を調査した結果、MSM 格子点値の風向や風速により強風遭遇リスクが大きく変化することが分かった。観測点直近の MSM 格子点値が風速 7~10m/s を示す場合、陸に近い観測点では、沖合にある観測点よりも強風遭遇リスクが高く、神戸の AMeDAS 観測点では、風向 ENE で最大瞬間風速 15m/s を超える確率は 51%に達した。神戸空港と関空島の AMeDAS 観測点では、風向 SSW で強風遭遇リスクが高く、警戒が必要であることが分かった。

キーワード：気象、海難防止、運航判断、数値予報、AMeDAS

1. はじめに

今日、クルーズ客船の巨大化が進み、旅客定員 5,000 名を超える船も出現し、日本にも度々寄港している。巨大クルーズ客船が寄港すると、港湾収入の他、観光消費や関連産業に大きな経済効果をもたらすため、全国各地の港湾でクルーズ客船の寄港誘致が活発化している。しかし、巨大クルーズ客船にとって、特に地方の港湾は、港内の操船水域が相対的に狭い事が多く、風潮流の影響を受けやすい。また、待機するタグボートの隻数も少ない。さらに、巨大クルーズ船の受入には、船客の交通手段や歓迎イベント等、関連する様々な手配や手続が生じる。入港予定の巨大クルーズ船が、強風等の影響により急遽、着棧不可との事態になれば、乗客や船社だけでなく関連産業に与えるダメージは大きい。このように、船長等が行う離着棧可否判断は、事故防止だけでなく経済活動の上でも非常に重要である。

本研究は、「最新の気象予報技術を活用した運航判断」と題した一連の研究の第 4 部となる。これまでの研究では、海難事例から海技従事者が学ぶべき気象教育⁽¹⁾、観測地点や風向による突風率の差異⁽²⁾、そして、MSM 格子点値と観測値の風速の相関⁽³⁾等を調査してきた。先の研究⁽³⁾では、堺 LNG 棧橋に設置された風向風速計の観測値とその近辺の MSM 格子点値との相関や、それぞれの風向風速出現頻度を調査した。この研究の中で、関空島や堺 LNG 棧橋など大

阪湾の海上に開けた場所では、MSM 格子点値と観測値の相関は概ね 0.8 を超えており、実用的にも参照し得る精度である事が分かった。しかし、稀に MSM 格子点値を大きく上回る強風が観測され、また、風向によってその相関が異なることも指摘している。

そこで本論では、船長等の離着棧可否判断に役立つ資料の提供を目的として、神戸、神戸空港、関空島の 3ヶ所の AMeDAS 観測値を用いて、MSM 格子点値が示す風向と風速に応じて変化する強風遭遇リスクの評価を試みた。

2. MSM の概要と観測地点

MSM は、日本とその近海を計算領域とし、全球モデル(GSM: Global Spectral Model)より細かい水平格子間隔 5km で、1日 8回(3時間毎)、78時間先(00, 12UTC 初期値のみ)または 39時間先までの予測計算を行っている⁽⁴⁾。MSM は、北緯 47.6 度、東経 120 度を原点として、南に 0.05 度毎に 505 個、東に 0.0625 度毎に 481 個の格子数で予報されている。

京大大学生存圏研究所では、MSM の元データである初期値(解析値)を中心にして再構成を行い、研究目的で利用できるように NetCDF 形式で提供している⁽⁵⁾。つまり 3時間毎の MSM の初期値を順番に並べ、各時刻の間を直前の初期値からの予測値で埋めることで、過去の大気の状態を時間解像度 1 時間で最もよく推定したアーカイブとなっている。

本研究では、このMSMの地上面データを使用した。図1にMSM格子点と本研究で使用したAMeDAS観測点の位置を示す。図中、①が神戸、②が神戸空港、③が関空島を示す。

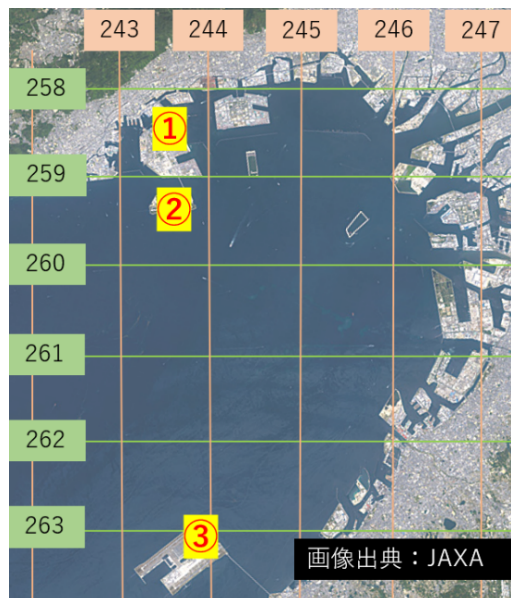


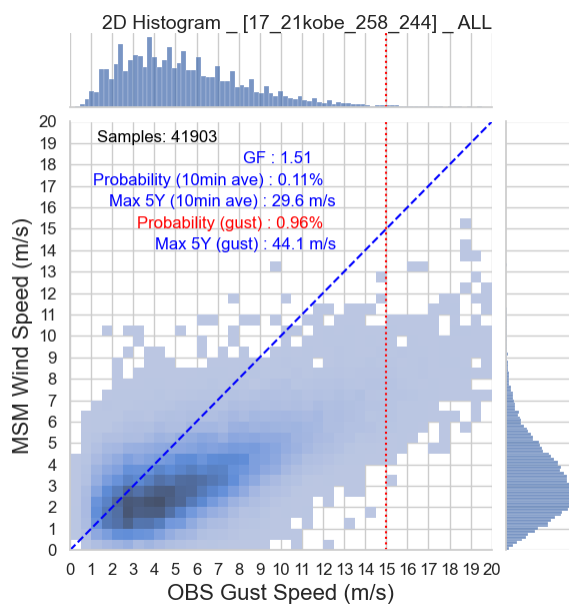
図1 MSM格子点と風向風速計設置場所

3. 結果

3.1 MSM風速とAMeDAS最大瞬間風速の関係

図2は、AMeDAS（神戸）観測点（図1①）について、横軸に2017年～2021年（5年間）の最大瞬間風速（毎正時）、縦軸に同時刻のAMeDAS観測点直近のMSM格子点値（格子番号：緯度258、経度244）の風速をプロットした2次元ヒストグラムである。風速0.5m/s毎の各ビンに含まれるサンプル数を青色の濃淡で表現している。GFは、AMeDAS観測値から求めた平均風速に対する最大瞬間風速の線形近似直線の傾き、すなわち突風率を示す⁽²⁾。グラフの横軸15m/sに示した赤点線は、任意に設定したもので、この赤点線より右側の領域は、AMeDAS最大瞬間風速が15m/sを超えたことを示す。大阪湾水先区水先人會では、阪神港における運航中止基準を、「最大風速15m/s（平均12m/s程度）」と設定していることから、今回、任意の閾値（赤点線）を15m/sとしたが、この値は、各係留施設の場所、船種、操船者の技量等によって適宜設定すべきものである。グラフ内の、「Probability(10min ave)」は、AMeDAS平均風速が設定した閾値15m/sを超える確率を示し、「Probability(Gust)」はAMeDAS最大瞬間風速が閾値15m/sを超える確率を示している。

図2で示したAMeDAS（神戸）では、MSM格子点値



Samples: 標本数
GF: 突風率
(AMeDAS 最大瞬間風速 / AMeDAS 平均風速)
Probability (10min ave):
AMeDAS 平均風速が閾値を超える確率
Max 5Y (10min ave):
AMeDAS 平均風速の5年間最大値
Probability (Gust):
AMeDAS 最大瞬間風速が閾値を超える確率
Max 5Y (Gust):
AMeDAS 最大瞬間風速の5年間最大値

図2 AMeDAS（神戸）観測値とMSM格子点値の2次元ヒストグラム（全風向）

表1 AMeDAS観測点と強風(15m/s以上)発生頻度

No.	AMeDAS	GF	10min ave		Gust	
			Probability	Max 5Y	Probability	Max 5Y
①	神戸	1.51	0.11%	29.6m/s	0.96%	44.1m/s
②	神戸空港	1.34	0.23%	34.5m/s	1.34%	45.3m/s
③	関空島	1.31	0.40%	33.7m/s	2.83%	44.8m/s

が4m/sを超えた付近から最大瞬間風速が15m/sを越える風速が発生していること等が読み取れる。また、5年間の観測期間中にAMeDAS平均風速が15m/sを超えた頻度は0.11%、AMeDAS最大瞬間風速が15m/sを超えた頻度は0.96%であった。

神戸空港（図1②）と関空島（図1③）についても同様の調査をし、その結果を表1に示した。GFについては、先行研究⁽²⁾の通り、陸に近い観測点ほど高い結果となった。全風向風速を対象とすると、最大瞬間風速が15m/sを超える確率は、関空島が2.83%と最も高く、次いで神戸空港1.34%、神戸0.96%と沖合の観測点ほど高い結果となった。

3.2 風向による強風遭遇頻度

MSM を活用し、係留施設付近の風予測を行うためには、MSM 格子点値が示す予測値と係留施設で観測される実測値との関係を理解する必要がある。先の研究⁽³⁾では、風向（16 方位）毎に AMeDAS とその直近 MSM 格子点値との相関を調査した。その結果、風向によって相関は大きく異なることが分かった。そこで、MSM 格子点値で得られた風向により強風遭遇リスクがどう変化するかを確認するため、図 1①～③の AMeDAS 観測点 3 ヶ所について、MSM 格子点値の風向別に、図 2 と同様の 2 次元ヒストグラムを描いた。図 3 は、その一例で AMeDAS（関空島）とその直近の MSM 格子点値（格子番号：緯度 263、経度 244）の風向 SSW のデータを用いて描いた 2 次元ヒストグラムである。先の研究⁽²⁾で、関空島付近の風向 SSW の風については、警戒が必要であると指摘しているが、今回の解析でも風向 SSW では、風速 15m/s 以上の最大瞬間風速に遭遇する可能性は 8.55%と、警戒が必要であることが示された。

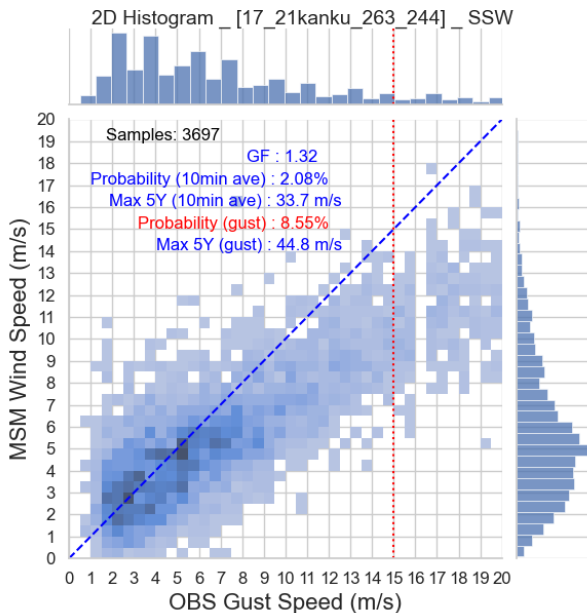


図 3 AMeDAS（関空島）観測値と MSM 格子点値の 2 次元ヒストグラム（風向：SSW）

表 2 は、AMeDAS 観測点 3 ヶ所について平均風速 (Ave) と最大瞬間風速 (Gust) が閾値 (15m/s) を超える確率 (%) を MSM 格子点値の風向 16 方位別にまとめ、最小値～最大値を寒色～暖色で色付けした。Gust に着目すると、ほとんどの風向、観測点で 15m/s 以上の強風に遭遇する可能性は、1%未満であるが、関空

島の風向 WNW で 9.31%を示すほか、神戸空港と関空島の風向 SSW で、また、神戸の風向 ENE で強風遭遇リスクが高くなっている。このように、強風遭遇リスクの高い、特定の風向が存在することが分かった。

表 2 風向別の強風発生確率（15m/s 以上）

風向	① 神戸		② 神戸空港		③ 関空島	
	Ave	Gust	Ave	Gust	Ave	Gust
North	0.16	0.47	0.06	0.18	0.07	0.35
NNE	0.10	0.29	0.03	0.14	0.06	0.83
NE	0.11	0.93	0.02	0.28	0.08	0.38
ENE	0.69	4.53	0.14	1.57	0.13	1.01
East	0.32	1.05	0.31	0.74	0.07	0.36
ESE	0.14	0.41	0.27	0.27	0.16	0.16
SE	0.00	0.30	0.00	0.35	0.34	0.51
SSE	0.15	0.15	0.17	0.51	0.00	0.42
South	0.00	0.53	0.58	1.46	0.31	2.90
SSW	0.04	1.04	2.21	6.11	2.08	8.55
SW	0.03	0.28	0.12	0.49	0.11	0.70
WSW	0.00	0.41	0.06	0.34	0.10	0.91
West	0.00	1.54	0.32	4.42	0.68	5.43
WNW	0.00	0.78	0.07	2.53	0.97	9.31
NW	0.04	0.21	0.05	0.10	0.06	2.75
NNW	0.04	1.28	0.00	0.58	0.09	2.09

3.3 任意の風向風速に対する強風遭遇頻度

MSM 格子点値がある風速を予測した場合の、AMeDAS 観測点での強風遭遇リスクを調査するため、風向（16 方位）毎に MSM 格子点の風速の範囲を変えながら 2 次元ヒストグラムを描いた。ここでは、阪神港における運航中止基準の「最大風速 15m/s (平均 12m/s 程度)」を下回り、通常であれば離着陸可能と判断する風速 7～10m/s の風速帯を対象とし、その結果を表 3 に示す。AMeDAS 観測点の最大瞬間風速 (Gust) が 15m/s を超える確率 (%) と抽出されたサンプル数に応じて、最小値～最大値を寒色～暖色で色付けした。風向によっては、サンプル数が 20 未満と不十分なものがあり、括弧書きと灰色で色付けした。

表 3 に示すように AMeDAS（神戸）の風向 ENE で 15m/s の強風に遭遇する確率は 51.23%と 3 ヶ所の観測点で最も高かった。沖合に位置する AMeDAS（関空島）と比較して陸に近い AMeDAS（神戸）では、MSM 格子点値の風速が 7～10m/s を示した場合に、最大瞬間風速が 15m/s を超える確率が高くなることが分かった。この原因として、AMeDAS（神戸）直近の MSM 格子点値（格子番号：緯度 258、経度 244）は、海陸の境界付近に位置しており、地表面粗度の影響により、AMeDAS 観測値よりも低い風速を示していると考えられる。

図4は、AMeDAS（神戸）について、その直近のMSM格子点値（格子番号：緯度 258、経度 244）で風向ENE、風速7~10m/sを示す場合に最大瞬間風速が15m/sを超える確率が51.23%に達することを示した事例の2次元ヒストグラムである。例えば、MSM格子点値の風速が7m/s以上を示した場合、最大瞬間風速10.5m/s以上の強風に遭遇する確率は100%に達すること等がこのヒストグラムから読み取れる。

表3 MSM格子点値の風速を限定（7~10m/s）した風向別の強風発生確率（15m/s以上）

風向	① 神戸		② 神戸空港		③ 関空島	
	Gust(%)	Samples	Gust(%)	Samples	Gust(%)	Samples
North	3.51	57	0.00	293	0.00	446
NNE	9.62	52	0.00	637	0.00	1024
NE	35.30	76	0.00	591	0.00	831
ENE	51.23	162	1.02	490	0.63	318
East	18.75	32	2.25	89	2.22	45
ESE	(33.33)	(7)	(0.00)	(16)	(0.00)	(4)
SE	(50.00)	(2)	(7.69)	(13)	(0.00)	(6)
SSE	(0.00)	(4)	0.00	20	0.00	35
South	17.39	23	6.32	95	4.52	509
SSW	7.19	153	6.76	355	10.40	644
SW	3.45	58	0.53	375	2.72	257
WSW	14.29	35	0.00	234	2.47	162
West	14.05	185	4.98	603	2.34	427
WNW	10.17	236	2.27	1191	0.56	898
NW	(21.43)	(14)	0.00	226	0.82	976
NNW	25.45	55	1.56	256	1.16	604

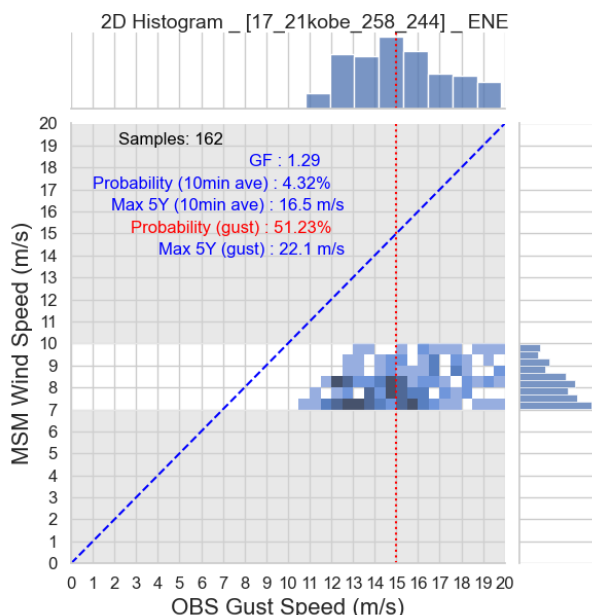


図4 AMeDAS（神戸）観測値とMSM格子点値の2次元ヒストグラム（風向ENE）
MSM格子点値を風速7~10m/sに設定

4. まとめと今後の方針

本論では、気象庁メソ数値予報モデル格子点値が示す風向風速に対して、AMeDAS観測点で強風に遭遇する可能性を示した。主な結果を以下に列挙する。

- (1) 5年間の全風向風速データを対象にすると陸に近い観測点よりも沖合の観測点で強風遭遇リスクは高い。また、AMeDAS（神戸）では、MSM格子点の風向がENEで強風遭遇リスクが高く、AMeDAS（神戸空港）とAMeDAS（関空島）では、風向SSW、West、WNWで強風遭遇リスクが高い。
- (2) MSM格子点の風速が7~10m/sを示した場合を抽出すると、陸に近いAMeDAS（神戸）では、沖合にあるAMeDAS（神戸空港）やAMeDAS（関空島）よりも強風遭遇リスクが高い。

本論では、これまで船長等の経験値への依存が高かった離着棧可否判断について、過去のデータに基づいた、客観的な意思決定のための資料を示した。しかし、実用化には、係留施設等に観測器を設置し、品質の高い長期間の風向風速データの収集によりサンプル数を増やす必要がある。許容される強風遭遇リスクは、船型や港湾事情、操船者の技量等々を考慮し、船主や荷主も交え慎重に決定すべきで問題である。そうすることで、もし、離着棧可否判断が「空振り」となった場合でも、潜在している強風遭遇リスクを関係者が共有していれば、長期的視点で冷静にその機会損失を受け入れることができる。

5. 参考文献

- (1) 濱地義法・大澤輝夫・圓尾太朗：最新気象予報技術を活用した運航判断 -海難事例からの考察-, 日本航海学会論文集, No. 147, pp. 66-72, 2022.
- (2) 濱地義法・大澤輝夫・林美鶴・石井快・真鍋大雅：最新気象予報技術を活用した運航判断-2 - AMeDAS風況解析による考察-, 日本航海学会論文集, No. 148, pp. 58-64, 2023.
- (3) 濱地義法・大澤輝夫・林美鶴：最新気象予報技術を活用した運航判断-3 - MSM格子点値と観測値の比較-, 日本航海学会講演予稿集, 11巻1号, pp. 20-23, 2023.
- (4) 気象庁：メソモデル・局地モデル,
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-6.html>, 2024. 2. 14
- (5) 京都大学 生存圏研究所：グローバル大気観測データ, <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/glob-atmos/>, 2023. 3. 3

両舷に搭載された風向・風速計による船上風計測特性の把握

正会員○林 美鶴（神戸大学） 非会員 増田 千輝（神戸大学）
非会員 廣川 綜一（神戸大学）

要旨

船舶搭載の2基の風向・風速計で計測したデータを元に、船上風の計測特性を明らかにした。風向・風速とも、平均的には両舷機は一致したが、風向特性が示唆された。風向については、いずれの風向においても風上側に比べ風下側ではやや横風を示す傾向があった。船尾からの風には、公称精度を超える風向差が見られた。風速は、船首方向と正横から後方にかけての風は風下側で小さくなり、斜め前方と船尾方向の風は風下側で大きくなる特性が見られた。船体影響を受けた風向による計測特性が見受けられた。

キーワード：環境、船上風、船体影響

1. はじめに

一般商船においても船内LANが整備されつつある現在、船舶運航データの活用が進んでおり、自然環境情報の収集に利用する事例も出て来た。SOLAS条約及び気象業務法に基づく船舶気象観測で得られたデータは、日本においては1880年代から「神戸コレクション」として旧神戸海洋気象台が収集・管理していた。現在は米国海洋大気庁(NOAA)が、The International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (ICOADS)として、世界中のデータを収集・管理・公開している。海上風の情報は、船舶の運航のみならず⁽¹⁾⁽²⁾、防災分野、自然環境分野、水産分野、エネルギー分野など、多方面で必要とされている。海上での実測データとして船舶観測データは貴重であり、船内LANやリアルタイム自動観測・通報が普及すれば、分単位で膨大な海上風データを獲得することができる。

神戸大学大学院海事科学研究科付属練習船「海神丸」は2022年3月に竣工し、メインマスト左右に2基の風向・風速計（ANEOS製、N-363D型プロペラ式風向風速計、以降、風速計と呼ぶ）が搭載されている。どちらかの測定値が自動選択されて出力されるのが基本仕様で、その選択アルゴリズムや、どちらからの出力値かは不明である。船舶で計測される風（以降、船上風と呼ぶ）データの多方面での利用にあたっては、その精度や計測特性を把握しておくことが望ましい。本研究の目的は、海神丸で計測する船上風の計測特性や船体影響を把握することである。本来は海上風との比較により行うべきだが、本研究では両舷の船上風の比較による把握を試みた。正確且つ純粋な海上風を計測することや、データ処理・

比較は技術的に難しいが、2基の比較は取り組みやすい。最近建造されている練習船のほとんどで、両舷に風速計が搭載されている。データの相互比較や利用のためには、計測特性評価項目を統一することが望ましいことから、検討方法の一つとして提案する。



図1 海神丸の外観と風速計や構造物の配置

2. 方法

図1に海神丸の外観とコンパステッキより上部の平面図を示す。風速計はメインマスト後方足場の外側に、3m間隔で設置されている。メインマストは風速計より高い。この前方の下段にレーダーアンテナが2基設置されている。右舷側のアンテナの方が、回転半径が大きく、上の位置に設置されている。回転方向は時計回りである。コンパステッキ後部には

ハウジングがあり、その後に後部マストがある後部マストは風速計よりも高い。左舷後方にはファンネルがある。ブリッジデッキ前方はコンパスデッキより一回り大きく、これより前方にデッキとフォクスルが突き出ている。

風速計の分解能は、風速 0.1 m s^{-1} 、風向 1 度である。公称精度は、風速 10 m/s 以下では $\pm 0.5 \text{ m s}^{-1}$ 以内、これ以上では 5% 以内で、風向は ± 5 度以内である。プロペラが停止状態から回り始める起動風速は 2 m s^{-1} である。これ以下の風速ではプロペラが十分に回転せず、不正確な計測になることがある⁽³⁾。また、プロペラ式風向風速計の特性として、低風速では回転不足で低めの風速を低く測定し、高風速では回転し過ぎて大きめに測定する。また風向の変動が大きいと追従が遅れ、これによって風速を低く測定する⁽⁴⁾。

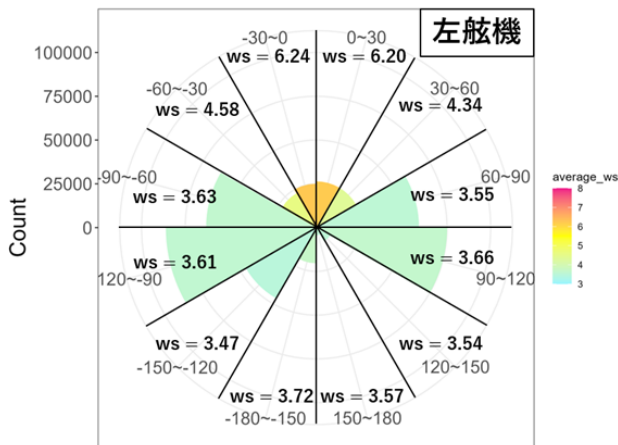


図2 左舷機で測定した風の風配図
30度に分け、データ数を外向きの軸で、色により平均風速を表した。

船内 LAN で保存されているデータから、2022年5月～2023年8月の16ヶ月間の1秒瞬時値を入手した。相対風向、相対風速、緯度、経度、対地速力を使用し、1分平均値と10分平均値を求めた。風向は船首を 0 度として ± 180 に変換した。+は右舷機が風上、-は左舷機が風上である。両舷機のどちらかで 2 m s^{-1} 未満を計測した時のデータは使用しなかった。両舷機の風向差は、(風向差)=(左舷機風向)-(右舷機風向)で求めた。風向差が正であることは、風下側では風上側よりも船尾側から風を受けていることを意味する。風速差は、(風速差)=(風上側

風速)-(風下側風速)で求めた。風速差が正であることは、風下側では風上側よりも風速が小さいことを意味する。

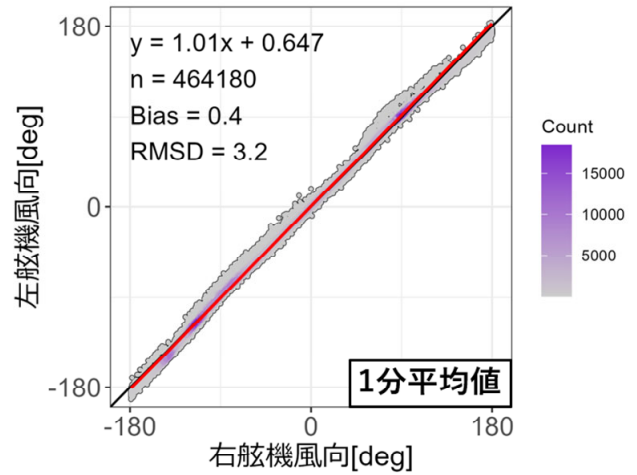


図3 1分平均値による両舷機の風向の散布図

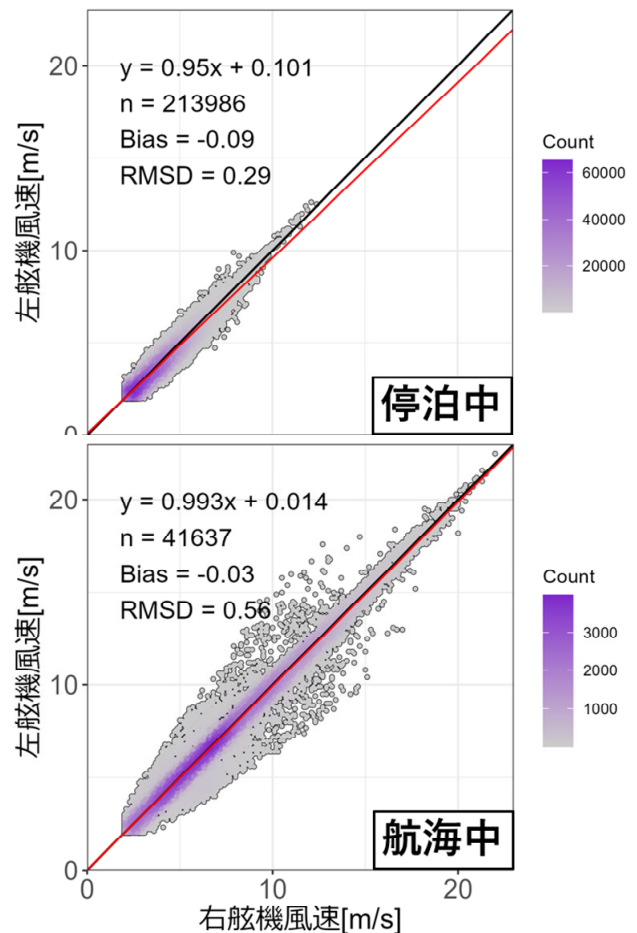


図4 1分平均値による停泊中と航海中の両舷機の風速の散布図

3. 結果

図2に1分平均値の風配図を示す。両舷機とも船

首からの風が強く、側方からの風は、頻度は多いが、平均風速は船首からの風の半分程度だった。後方からの風は、頻度、平均風速共に小さかった。船首尾方向の平均風速の特徴は、航海中を表している。この方向のデータ数が側方より少ないのは、停泊日数に比して航海日数が少ないためである。一方、側方からの風は大学深江キャンパス内の専用岸壁停泊中の特徴を表している。先行研究で、深江では東北東と西北西からの風が卓越し、南北風は少ないことが示されている⁽⁵⁾。海神丸は船首を北北西に向けて停泊するため、風配図の傾向は先行研究と一致する。

図3に1分平均値による両舷機の風向の散布図を示す。両舷機の風向の一次近似関数の傾きは、ほぼ1で、バイアス、RMSD（平均二乗偏差）とも公称精度より十分小さかった。平均的には両機はほぼ一致すると言えるが、±90度付近で偏差が大きくなる傾向が見られた。図4に、航海中と停泊中に分けた1分平均値による両舷機の風向の散布図を示す。風速も近似線とバイアスの点からは、両舷で一致していたと言える。しかし航海中のRMSDは風速10 m s⁻¹以下での公称精度を越えていた。公称精度以上の差を示す場合が多くあり、風速が強くなるに従い偏差が大きくなる傾向が見られた。

4. 考察

風向特性を明らかにするため、1分平均値データを風向10度に区切り、図5の通り風向差と風速差の分布を求めた。折れ線グラフが示す平均風向・風速差は両舷で概ね対称であった。正船尾から両舷30度前寄り付近で風向差が負の極大、両舷正横から20度前方付近で風向差が正の極大となり、両舷正横から30度後方付近で風向差は極小となった。負の極大は公称精度を超えていた。風向差が極大の方向で風速差は極小となり、風向差が極小の方向で風速差は負の極大となった。この風速差の極大は、左舷側の方がやや大きかった。また、正船尾付近で風速差が正の極大となり、この方向の風向差はやや小さくなる傾向が見られた。一方、船首方向では風向差に若干の左右非対称性が見られ、風速差との逆位相の関係はなかった。正船首から右20度付近で風向差は極小となり、これよりも左舷側の風の方が風向差はやや小さい傾向が見られた。風速差は、船首から両舷40~50度の範囲では負で、60~70度で正の極大となった。これらを端的に述べると、風向については、いずれの風向においても風上側に比べ風下側ではや

や横風を示す傾向があると言える。風速は、船首方向と正横から後方にかけての風は風下側で小さくなり、斜め前方と船尾方向の風は風下側で大きくなる。

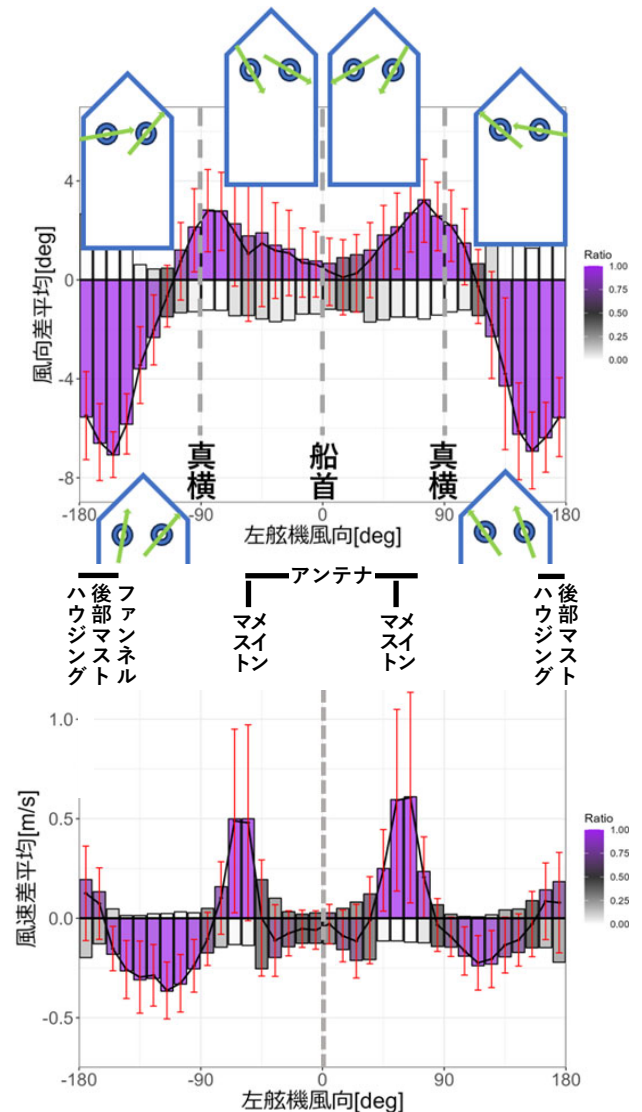


図5 1分平均値による停泊中と航海中の両舷機の風速の散布図

図1で示した船上構造物を風速計から見た方向を、図5の中央に示す。風速計に対する構造物の影響を、図6の通り推測した。後方からの風で風向差がより大きいのは、後部マスト、ハウジング、及びファンネルが影響したと推測される。船尾寄りの風では風上側の風速計でもこれらの影響を受けている可能性があるが、横方向の風では風上側への影響は小さい。構造物の影響が風上側では小さくなり、風下側には残る程度の風向で風向差が極大となり、船首側から回り込むように風向が変化すると推測される。風下

側への建造物の影響が小さくなる横からの風では、風が吹き抜けて風向差は小さくなるが、風速は風下側で小さくなると考えられる。正横から船首寄りではメインマストの影響を受け、風下側ではメインマストを船尾側に回り込んだ風を計測していると推測される。また、風下側から見てメインマスト方向からの風では、メインマストを回り込んだ風が風下側で合流することで風上側よりも強い風速になると推測される。船首側で左右非対称性を持つ構造物はレーダーアンテナしかなく、これが船首寄りの風に現れた風向差の非対称性に影響した可能性がある。船首方向は開けているため、メインマスト方向よりも船首側の風上風に対する影響は小さい。その中で両舷機とも影響が小さい方位は、やや右舷寄りになると考えられる。

5. おわりに

船上風については古くからについて検討が行われており⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾、船体影響を受けていることが知られている。本研究で行った両舷機からの比較によってもその可能性が示唆された。船上風のビッグデータ利用に向けて、洋上リファレンス局との比較によるデータ補正の検討も行われている⁽¹⁰⁾。本研究で行った解析を他船舶でも実施して、複数船舶の船上風計測特性の比較や、船体回りの数値流動実験結果の検証などを進めることで、船舶観測船上風データの利用価値を高めたいと考えている。

6. 参考文献

- (1) 濱地義法・大澤輝夫・圓尾太朗：最新気象予報技術を活用した運航判断 - 海難事例からの考察 - ，日本航海学会論文集，Vol17，pp. 66-72，2023. 10.
- (2) 濱地義法・大澤輝夫・林美鶴・石井快・真鍋大雅：最新気象予報技術を活用した運航判断 -2 - AMeDAS 風況解析による考察 - ，日本航海学会論文集，Vol18，pp. 58-64，2023. 7.
- (3) 小野木茂：地上風の測器，日本風工学会誌，Vo34，No. 3，pp. 314-321，2009. 7.
- (4) 中尾徹・加藤秀樹・臼井健：3 種類の風向風速計の応答特性，風エネルギー，Vo28，No. 2，pp. 56-61，2004.
- (5) 神戸市：新修神戸市史 歴史編 I 自然・考古第五章 神戸の気候・水・大気
<https://www.city.kobe.lg.jp/documents/56204/5.pdf>
- (6) J. K. S. Ching：Ship's Influence on Wind Measurements Determined from BOMEX Mast and Boom Data，Journal of Applied Meteorology and Climatology，Vol. 15，No. 1，pp. 102-106，1976. 1.
- (7) 二ツ寺暁郎・宮菌大樹・森内洋之・山口一・川村隆文・宮永大，船舶による洋上風応力計測に対する船体及び上部建造物の影響，日本造船学会論文集，Vol. 192，pp. 71-80，2002. 7.
- (8) 岩坂直人，マイクロ波散乱データを用いた船舶海上風観測値の誤差評価，海の研究，Vol. 12，No. 4，pp. 375-393，2003. 4.
- (9) 岩坂直人・鈴木貞治・小橋史明，船舶による海上風速計測について，海の研究，Vol. 15，No. 2，pp. 143-163，2006. 11.
- (10) M. HAYASHI・T. OHSAWA・M. SHIOYAMA・A. BURANAPRATHEPRAT・C. MORIWAKI：Correction of Shipboard Wind Speed and Direction toward the Utilization of Big Data，Transactions of Navigation，Vol. 5，No. 1，pp. 29-37，2020.

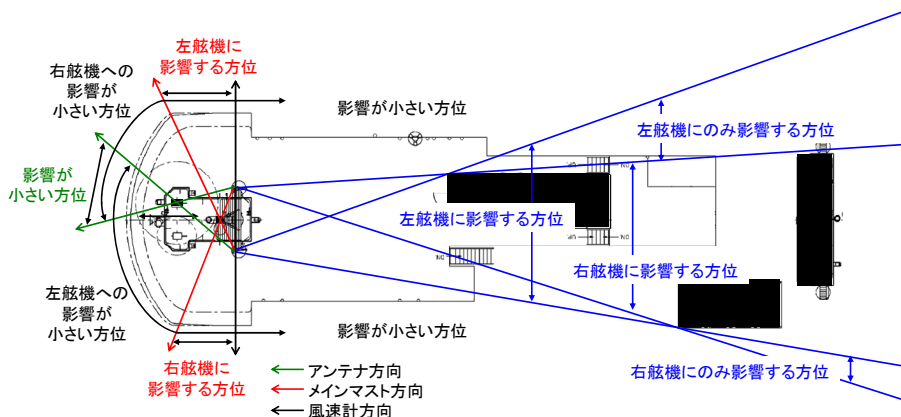


図6 建造物の配置に基づく風向への影響方位の推定

海事教育におけるアクティブラーニング型授業の 学習評価法に関する研究

正会員○布目 明弘（富山高等専門学校） 非会員 熊崎 萌来（富山高等専門学校）
正会員 國枝 佳明（富山高等専門学校） 正会員 竹本 孝弘（東京海洋大学）

要旨

本研究は船舶管理に関するプロジェクト型学習（PBL：Project Based Learning）の学習評価に使用される学習評価ツールの信頼性について調査し、学習評価ツールのメタ評価を通して改善のための方針を検討したものである。学習者が PBL の成果物として作成した作業計画書を評価対象として、4 段階のルーブリックとチェック型評価シートの 2 種類の学習評価ツールを用いて実際に評価を実施することによるメタ評価を実施した。富山高等専門学校商船学科および練習船若潮丸所属の教員 8 名に依頼し、7 名から回答を得た。その結果、評価者間信頼性を示す級内相関係数はルーブリックは $ICC(2,1)=0.36, ICC(3,1)=0.41$ 、チェック型評価シートは $ICC(2,1)=0.10, ICC(3,1)=0.11$ であった。

キーワード：教育訓練、PBL、船舶管理、学習評価

1. はじめに

近年、海事教育機関においては単に船員としての能力のみならず、関連分野で幅広く活躍出来る能力を有した「海技者」の育成が求められている。海事教育においては練習船での乗船実習が以前より行われてきた上、近年は席上課程の授業でも、単なる知識・技能の伝授に留まらない、幅広い資質・能力の育成を目指したアクティブラーニング（AL）型授業の採用が進んでいる。¹⁾²⁾

AL 型授業における学習評価の対象は一般的なペーパーテストに限らず、発表、成果物、ポートフォリオおよびレポートなどが採用されている。その評価方法として、ルーブリック等の学習評価ツールが広く使用されている。

しかしながら、その評価項目、評価尺度や評価基準の作成は個々の教員に委ねられている。学習評価ツールの作成には高度な専門性を要するが、海事教育における標準的なモデルケースは現状として存在しないため、学習評価ツールの信頼性や妥当性には疑問が残る。そこで本研究では、海事教育における AL 型授業の学習評価ツールを主に信頼性の観点から評価をする方法を検討する。特に今回は船舶管理に関連する科目で行われたプロジェクト型学習法（PBL：Project Based Learning）にて行われた成果物を対象として学習評価ツールの分析と改善を行った。

2. 学習評価ツールの妥当性

アクティブラーニングにおける学習評価には次に示す 3 つの要素が重要である。

2.1 信頼性

学習評価における信頼性とは、複数の評価者によるある評価対象の評価結果が一致する度合いと言える。成果物等は想起型試験のように正否が明確な事が稀であり、適切に評価基準を設けて到達度を判断する必要がある。

2.2 利便性

学習評価における利便性とは、評価の際に労力のかからない方法であると言える。1 つの項目について評価する際に複数の観点が盛り込まれていると判断に迷う事となり、結果として労力が増大するばかりでなく、前節の信頼性にも影響する。

2.3 妥当性

妥当性とは、評価内容が科目を通して学習者が身につけるべき知識・技能および醸成を目指している資質・能力と一致している事を指す。

3. PBL と学習評価ツール

2022 年度および 2023 年度、富山高等専門学校商船学科航海コース第 3 学年対象の「船体管理論 II」および「船体管理論 B」の授業にて、ヨットの修繕プロジェクトを行う PBL を実施した。これらの授業は船舶職員養成施設必要履修科目の運用に関する科目のうち、「一 船舶の構造、設備、復原性および損傷制御」の前 2 つに対応しており、主に船舶管理に関する事項を中心に扱う科目である。

高等教育において学習評価は、評価規準すなわち科目目標の一定水準に到達したことを示すために必要である。

表1 ルーブリック項目の一例

	優	良	可	不可
安全面への配慮	安全に関する注意書きが細かく書かれており、かつ作業する者が理解できるように具体的に書かれている	安全に関する注意書きが細かく書かれており、かつ作業する者が理解できるようにかかれている	安全に関する注意書きが書かれており、作業をする者が理解しやすい	安全に関する注意書きが不十分である
解釈度	計画書を一度読んだだけで内容をすぐに理解できる明瞭な計画書である	計画書を読めば内容を理解できるが、余分な情報も書かれていて明瞭ではない	計画書を読めるが具体的な理解に欠け、理解できるまでの時間がかかってしまう	計画書を読んで、内容を理解できない

表2 チェック型評価シートの項目とメタ評価結果

項目番号	内容	メタ評価結果
1	手書きであっても、パソコンであっても誤字や脱字なく書かれているか。	6
2	パソコンであれば、10~18くらいの大きさを文字が打たれているか。	7
3	レイアウトの工夫がされているか。（見出しを太字にしている、大きさを変えるなど）	4
4	誤解の招く表現を避け、明確な言葉を使っているか。	5
5	矛盾のない作業計画書であるか。（安全対策と作業方法の手順との矛盾ないか）	4
6	具体的な作業方法について手順を明確にして書かれているか。	5
7	作業計画書の目標に沿っているか。（事故防止のため船長に向けた作業の計画の書類（作業計画の核心がずれていないか）	3
8	特記事項について書かれているか。	5
9	視覚的に情報を伝えるために図や写真が用いられているか。	1
10	日時、場所、班、氏名などの必須項目がすべて記載されているか。	2
11	準備するものについて記載されているか。	6
12	具体的な表現や数値を用いて記載されているか。	4
13	安全面への配慮について記載されているか。	5
14	明確な使い方や取扱いの際に気を付けることが書かれているか。	5
15	取り扱いに注意すべきことがある場合はその理由と適切な使用方法について記載されているか。	3
16	起こりうる危険について回避のためにリスク軽減策について記載されているか。	2

PBL を通して醸成が期待される資質・能力は、宣言的知識や手続き的知識を回答するのみで測られるものではない。そのため、今回は船上における保守整備で使用される書類を模した複数の成果物を課題とし、学習評価による資質・能力の測定を試みた。今回はこの成果物のうち作業計画書を評価し、点数化するための学習評価ツール2種類について述べる。

作業計画書は不具合を改善するために実施される作業の手順やそれに必要な物品、および安全上の注意事項を

作業前に整理し、その情報について作業を含めた船内関係者と共有する目的で作成される。この作成にあたっては、作業に関する知識のみならず、上記の情報を記述するための表現力が必要となる。また、学習者が主体的にこれを作成することを通して、必要な知識を対話的に身につける姿勢が求められる。その他の成果物についても今回取り扱わないが同様の狙いがある。

学習評価ツールの役割は評価の際の基準を示すのみならず、学習者に対して学習の方向性を提示することも含まれる。すなわち、学習開始前に学習評価ツールを提示することにより、学習者自身による学習行動改善の動機付けとすることが期待される。

3.1 ルーブリック

ルーブリックとは評価項目と複数評価尺度毎の評価基準から成り立つマトリクス表形式の学習評価ツールである。

作業計画書を対象とする学習評価ツールとして、始めに4段階のルーブリックを作成した。そのうち内容に関する項目を表1に示す。この作成にあたっては、2022年のPBLにて提出された20部の作業計画書を参考とした。まず、主観に基づき順位付けした上で、上位グループと下位グループに2分し、それぞれの共通点や相違点を吟味した上で「図表」「構成」「安全への配慮」「字の丁寧さ」「文章量」「解釈度」の6つの評価項目を挙げた。そして、それぞれの段階に応じた適切な尺度間隔となることを意図して各ブロックに文章を記述した。

ルーブリックを使用する利点は、項目と評価の段階を明確に示す事ができる点である。欠点としては、評価の柔軟性が低いこと、および評価に主観が入る余地が多いことである。例えば、仮に作業計画書が実際の情報伝達という観点から十分な内容であっても、ルーブリックの評価項目の対象に当てはまるものが無い場合は減点される可能性がある。

3.2 チェック型評価シート

ルーブリックの欠点を解消するため、著者らは表2に示すチェック型評価シートを考案した。チェック型評価シートとはルーブリックの各項目を更に分解したチェック項目を設け、成果物を見て当てはまる項目にチェックを付け、チェックの数に応じて配点する方式である。

チェック型評価シートを使用する利点は、ルーブリックでは1つの評価項目に含まれていた要素を分解して評

価対象とすることが出来る点である。そのため、必ずしも全ての項目を満たしていなくても、総合的な観点から妥当なものであれば最大評価を得るような得点配分を行うことができる。また、各項目の要素がシンプルであることで、学習者の自己評価にも活用しやすいという点が上げられる。

デメリットとして、より幅広い観点や評価段階を盛り込む場合、評価項目が膨大するという点が挙げられる。

4. 学習評価ツールのメタ評価

今回作成した2種類の学習評価ツールの信頼性を評価する方法について述べる。今回はそれぞれの学習評価ツールを使用して実際に評価を行うことでメタ評価を行った。メタ評価の手順は、PBLにて作成された作業計画書の中から無作為に1つ選び、作業計画書を2種類の学習評価ツールで実際に評価するものである。これを同校の教員8名に依頼し、7名から回答を得た。さらに客観性と利便性に関するアンケート調査を実施した。

4.1 ルーブリックのメタ評価結果

ルーブリックのメタ評価結果を表3に示す。今回は4段階評価とし、評点は優を4点、良を3点、可を2点、不可を1点とした。空欄は未回答の項目を示している。

表4は項目毎の各評点に回答した人数の割合を示したものである。これを見ると、「字の丁寧さ」では83%の評価者が3点としており、比較的高い信頼性を示していると言える。一方、それ以外の項目では評点のばらつきが3段階に亘るものや、最大の割合が43%のものがあるなど、比較的低い信頼性を示していると言える。

4.2 チェック型評価シートのメタ評価

チェック型評価シートのメタ評価結果を表4に示す。一致度cは、チェックありを1点、チェックなしを0点として以下の式により計算した。

$$c = 2|\bar{a} - 0.5|$$

ここで、 \bar{a} はある項目における評価結果の平均値を示す。この場合、 \bar{a} は常に0以上1以下の値を取るが、0.5のとき最も大きなばらつきがあると言える。一致度cは最もばらつきの大きい場合、すなわち \bar{a} が0.5のとき0、対して完全に一致する場合、すなわち \bar{a} が0または1のとき1となるようにした指標である。

各項目についてのメタ評価結果、すなわちチェックをつけた人数を表2右欄に示す。これを基に計算した各項

表3 ルーブリックを使用したメタ評価結果

項目	評価者						
	A	B	C	D	E	F	G
図表	1	3	1	2	1	3	1
構成	2	3	2	3	2	3	3
安全面への配慮	1	1	2	2	2	1	2
字の丁寧さ	3	3		3	2	3	3
文章量	3	3	2	3	2	2	4
解釈度	3	3	3	3	2	2	4

表4 ルーブリックの評点別一致率

項目	評点			
	1	2	3	4
図表	57%	14%	29%	0%
構成	0%	43%	57%	0%
安全面への配慮	43%	57%	0%	0%
字の丁寧さ	0%	17%	83%	0%
文章量	0%	43%	43%	14%
解釈度	0%	29%	57%	14%

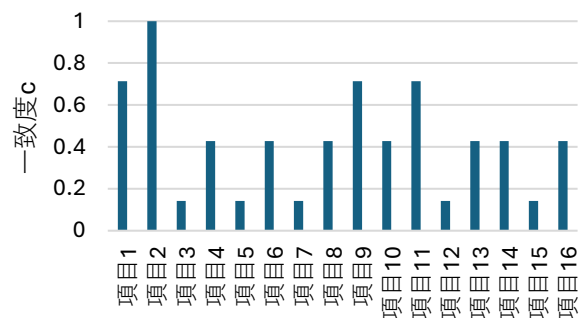


図1 チェック型評価シートの一緻度

表5 各学習評価ツールの級内相関係数

学習評価ツール	ICC(2I)	ICC(3I)
ルーブリック	0.36	0.41
チェック型評価シート	0.10	0.11

目の一緻度を図1に示す。

図1より、項目3, 5, 7, 12, 15は特にばらつきが大きく、項目2は評価者全員による評価が一致していることがわかる。

4.3 各学習評価ツールの信頼性

ここでは、2つの学習評価ツールの信頼性を一般的な指標を使用して比較する。大西⁹⁾が紹介する医療分野における学習評価手法のうち、今回は評価者間の信頼性を示す級内相関係数が適切であると考えられる。未回答の項目はその他の評価者による評価結果の平均値を使用して、

計算した結果を表5に示す。ICC(2,1)およびICC(3,1)の両方において、ルーブリックが比較的大きい値を示している。

4.4 アンケート調査結果

信頼性について尋ねた「4段階ルーブリックとチェック型評価シートでどちらの方が主観を入れずに判断できたと思うか」という設問に対する回答は、「4段階ルーブリック」という回答が3名、「チェック型評価シート」という回答が3名、「どちらでもない」が1名であった。また、利便性について尋ねた「4段階ルーブリックとチェック型評価シートでどちらの方が使いやすかったか」という設問に対する回答は「4段階ルーブリック」という回答が3名、「チェック型評価シート」という回答が3名、「どちらでもない」が1名であった。

アンケート結果からは信頼性と利便性ともにルーブリックとチェック型評価シートでは同率となり、どちらが優れているかについては示すことが出来なかった。

5. 考察

2種類の学習評価ツールのメタ評価を行い、それぞれの信頼性を示した。チェック型評価シートはルーブリックの欠点を補う目的で考案したものであったが、結果として級内相関係数はいずれもルーブリックが高い結果となった。また、アンケート結果からも信頼性と利便性はともに同率という結果となった。これらの原因は今回採用した指標の持つ特徴と今回のチェック型評価シートの各項目の構成および文章にあると考えられる。

5.1 級内相関係数の特徴

今回採用した級内相関係数は、二元配置分散分析を基に求めるものである。チェック型評価シートは取る値が0と1の二値であるため、項目要因に対する分散と誤差要因に対する分散の値が近い値を取りやすく、結果として級内相関係数が低く出やすい特徴があると思われる。そのため単純比較するとルーブリックの方が、信頼性が高い結果を示しているが、他の指標を用いて多角的に信頼性を検討する必要がある。また、今回使用した学習評価ツールの完成度を高めれば違う結果となる事が予想される。

5.2 チェック型評価シートの構成の問題点

チェック型評価シートでは各項目がそれぞれ独立した観点を示す文章として提示されるのに対し、ルーブリックでは各項目が短い言葉で示された上、各ブロックの文

章で具体的な観点が記載されている。今回のチェック型評価シートでは文頭に主語のない項目が散見されるため、観点がわかりにくかったと思われる。そのため、各項目の主語は可能な限り文頭に置かれた文章とした上で、評価項目をルーブリックの項目名と同等の分類でまとめる事で、利便性の改善を見込むことが期待される。

5.3 各項目の内容の問題点

チェック型評価シートにおいて一致度 c が高い項目と低い項目を比較すると、前者は観点が絞られているのに対し、後者は全体を通して判断することが求められている項目が多いことがわかる。例えば、項目2は文字の大きさという1つの観点で評価が可能であるが、項目7については計画書全体を見て内容を判断する必要がある。このことから、評価の際の観点が絞り込まれた項目の方が高い一致度を示すため、信頼性を高めるには観点の絞り込みが重要であると言える。全体的な評価を必要としている項目については、優れていると思われる作業計画書に共通する特徴をより詳細に分解し、限られた観点での評価を可能にすることが重要である。

6. おわりに

ルーブリックの欠点を改善するためにチェック型評価シートを考案し、それぞれメタ評価を実施して信頼性の比較を行った。級内相関係数による比較の結果、今回はルーブリックの信頼性が高いという結果であったが、他の指標では異なる結果を示す可能性がある。また、チェック型評価シートの構成や文章を改善することにより、信頼性や利便性が向上する可能性がある。

7. 参考文献

- (1) 國枝 佳明・布目 明弘・間島 良博・鹿島 英之：海事教育訓練に関する研究—自己評価、相互評価及び多段階評価について—，日本航海学会誌 NAVIGATION(223)，pp. 27-28，2023. 2.
- (2) 布目 明弘・金山 恵美・森井 直人・浦 恵里夏・牧田 祥子：船舶管理に関する教育改善—資質・能力の醸成を目指した探究型学習とプロジェクト型学習の導入—，富山高等専門学校紀要，Vol. 11，pp. 1-6，2024. 1.
- (3) 大西 弘高：「学習者評価の信頼性とは」，医療職の能力開発，Vol. 1，No. 2，pp. 78-82，2018. 5.

瀬戸内海地域産業史を取り入れた練習船乗組員による海洋教育の実践と効果

○正会員 清田 耕司（広島商船高等専門学校） 正会員 藪上 敦弘（広島商船高等専門学校）
正会員 岸 拓真（広島商船高等専門学校） 正会員 千葉 元（大島商船高等専門学校）

要旨

瀬戸内海中央部の芸予諸島周辺地域に育つ青少年への海洋教育として、練習船の運航による経験、海洋に関連した島嶼地域の地の利、造船で特異に発展した大崎上島の海事産業の調査とデジタルデータ作成を活用する離島にある高専だからこそ、取り組める新しい海洋教育を実践した。小中学校における、理科、社会科での学びの一助となるため、商専教育から海洋教育への展開と実践、練習船運航の実績、海運・海事産業の知見を深めるための公開講座の実績と近年の海洋教育で足りないものを考慮した新たな取り組みを目指した。

この一環として、地域の海事産業史調査では、大崎上島における造船、地場産業（マキハダ・舟釘）、行商船に関する資料収集・聞き取り調査・収集資料のデジタルデータ化・データ活用による郷土学習教材の作成を行い、これを利用して、出前授業、小型実習艇による体験航海と寄港地でのフィールドワークを組み合わせ、地域の地の利を活かした新たな海洋教育の実践に取り組んだ。

キーワード：教育・訓練、練習船、海洋教育、島嶼部

1. 研究の背景と目的

広島商船高等専門学校（以下、広島商船）では、本来の船員養成施設として海技教育に取り組むだけでなく、長年に渡り、島嶼部の高等教育機関として、図1に示す大崎上島周辺に群生する「アマモ」をテーマとした海洋教育、造船・地場産業などの産業史など地の利を活かした地域教育（郷土学習）について地域住民、国（中国運輸局）、図2に示す芸予諸島周辺地域にある地方自治体（大崎上島町、広島市、尾道市、呉市、三原市など）、地域協議会やNPO法人との連携や協力のもと取り組んできた⁽¹⁾。

1.1 地域教育とは

地域教育とは、地域史を学び、郷土への関心を高める学習である。郷土への関心を高めることは、将来の地域活性化や人口増につながる。学習指導要領で「総合的な学習の時間」が創設される以前から大阪市小学校教育研究会では、「生きて働く力を育成するためには、教科の枠を外し総合的に扱う授業が必要である」と考えられ、調査研究、実践事例や地域を学ぶ活動モデル⁽²⁾が示されている。これより、広島商船の柴山らによる、地域貢献活動経験による教育的成果について定量的な調査分析から、地域への愛着・関心が高まった取り組み⁽³⁾の実施例もある。

1.2 海洋教育とは

海洋教育とは、国民が海への理解を深めるよう取組まれているもので、2007年4月「海洋基本法」第28条で規定されている⁽⁴⁾。例えば、海洋環境の大きな指標である「沿岸部のアマモの生育状況」をテーマとした環境学習などを通して、海洋環境が保全されてこそ、より良い生活が送られることを青少年へ伝えることができる。これより、東京での太田によるアマモ場再生活動⁽⁵⁾など、多くの地域でアマモ再生活動は実施されている。また、各地で、地元の水産系の大学や高校と連携した、小中学生への海洋教育の取り組みも行われている。広島商船でも、アマモが群生する大崎上島において、長年に渡り、小学校との連携でアマモ再生活動を実施している⁽¹⁾。

1.3 海技教育とは

海技教育は、船員を目指す青年へ船舶の運航・管理等について知識（学術）、技能を継承するものであり、周囲を海に囲まれ、資源を輸入でほぼ賅う日本にとって海運は重要であり担い手の養成急務である。これは、各地の海技教育機関で様々な取り組みが行われ、また産業界からの支援として、（一社）日本船長協会「船長母校に帰る」⁽⁶⁾が、15年渡り、年間で約10回程度の講演が国内各地で実施されている。

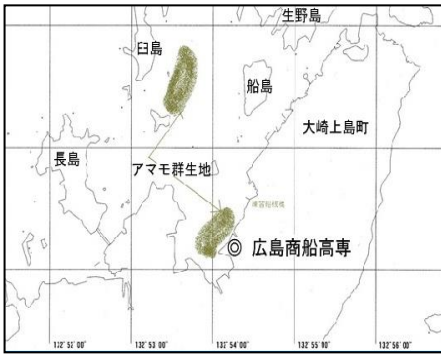


図1 小型舟艇を利用した海洋体験学習の海域図 大崎上島周辺海域におけるアマモ群生地を示す（海洋体験・アマモ観察）⁽¹⁾



図2 広島県・芸予諸島において、出前授業を実施した学校の所在地、体験航海、船上教室の実施した実績場所を地図上に示す（広島商船高専の所在地は、「大崎上島」右の赤丸印）

（出典：国土交通省国土地理院、地理院地図（テレビ国土 Web））

表1 広島商船高等専門学校における練習船を活用した体験学習（海洋教育）（抜粋 1997年～1999年）

年度	講座名	期間	対象者	時間数	募集人員	受講者(延べ数)	備考
H9 1997	海上教室・体験航海	7/16	中学生	3	3	178	大崎上島町、木江地区海上教室(木江中)、呉海上保安部木江分室、RCC、朝日新聞
	船上教室・体験航海	8/3～8/4	小学生以上	24	20	25	広島市要請、広島市地域魅力ツアー（宮島～呉）
	公開講座、瀬戸内体験航海「海と船」入門	8/5～8/8	中学生	10.5	20	25	船内泊、台風接近で多度津他を広島湾周遊へ変更、カッター実技、救命訓練、航海技術講座（操舵・海図・ロープワーク）
	海上教室・体験航海	7/29	小学生	3.5	3	39	尾道海事事務所、尾道市内小学生、海上教室
H10 1998	公開講座、瀬戸内体験航海「海と船」入門	8/5～8/8	中学生	24	20	25	船内泊、カッター実技、救命訓練、航海技術講座（操舵・海図・ロープワーク）、金刀比羅宮見学
	海上教室・体験航海	7/4	中学生	3	3	160	大崎上島町、木江地区海上教室、呉海上保安部木江分室
	海上教室・体験航海	7/19～7/20	小中学生	6.5	3	0	広島市、広島みなとまつり招聘 写生大会の協力
	海上教室・体験航海	7/21～7/23	小中学生	20.5	3	106	北九州市体験航海、親子での参加、午前午後2回
	「瀬戸内と船」体験講座	7/28～7/29	中学生	74	20	24	船内泊、カッター実技、救命訓練、生野島（水泳）、操舵、結索、海図、シーミング、船位、船の話
	公開講座、瀬戸内洋上講座	7/30～7/31	中学生	75	20	24	船内泊、操舵、講義、ロープワーク、寒霞渓登山、栗林公園見学、講義（「人間と地域」～内海諸国と郡界～）、操舵、海図、シーミング、カッター、救命訓練、交換会
H11 1999	海上教室・体験航海	9/9	中学生	3	3	55	大崎上島町、木江地区海上教室、呉海上保安部木江分室
	第1回 瀬戸内「夢」航海	8/7～8/9	小学生	6.5	3	74	竹原青年会議所共催、小学5、6年生対象、郷土学習
	海上教室・体験航海	7/13	中学生	3	3	133	大崎下島、木江地区海上教室、呉海上保安部木江分室
	海上教室・体験航海	7/23～7/25	小中学生	21	3	226	北九州市体験航海、親子での参加、午前午後2回
	海上教室・体験航海	10/17	小学生	5.5	3	39	三原市体験航海、親子での参加、糸崎港
	公開講座「海と船」	8/27～8/30	中学生	73	20	23	船内泊、カッター、救命訓練、工作（天体望遠鏡）、交歓会、航海技術講座（航海当直・結索・海図）、シーミング、消防訓練
	海上教室・体験航海	7月	小学生	3	3	70	大崎上島町、木江地区海上教室、呉海上保安部木江分室
第2回 瀬戸内「夢」航海	8/8	小学生	7.5	30	38	竹原青年会議所共催、小学5、6年生対象、郷土学習、荒天で期間短縮	
瀬戸内海海洋調査体験講座	8/25～8/29	青年	31	20	21	船内泊、江田島青年の家主催、基調講演「瀬戸内海の魅力」、操舵・船位について、気象学習（気象予報士）、瀬戸内海の海上交通の歴史、海洋調査	

これら、「地域教育」、「海洋教育」及び「海技教育」では、海や船をキーワードとして、複合した活動を行っていくことが望ましい。また、ここでは船の体験航海や海岸などでのフィールドワークや実習を多く含むことが重要であるが、特に小中学生を対象とした教育環境への安全管理に向けた整備がなかなかできていないといえる。そこで、これらを実施させるには、小中学生等に対する、海や船での活動における安全管理を熟知した講師が必須であり、また、それぞれの地域に併せた、地域教育・海洋教育・海技教育を融合させて教育を継続して実施していくことが重要であると考え。そこで、広島商船で、平成初期から実施してきた、地域史の研究と、練習船乗組員を中心に行ってきたアマモや航海体験を中

心とした公開講座をリンクさせた、海技教育機関ならではの、地域・海洋教育の実践例と効果を示す。

2. 広島商船高専が行ってきた小中学生に対する海洋教育

かつてより海事思想普及の名の下に海の記念日（現海の日）の行事としての体験航海は行っていたが、広島商船における小中学生を対象とした海洋教育講座は、1983年公開講座「ヨット・カッター教室」から始まり、カットアンドトライを行いながら体験型海洋教育を継続実施している。

2.1 練習船を活用した海洋教育

1997年1月に就航した練習船広島丸を活用した体

験型海洋教育を同年から公開講座等として、現在まで長年に渡り実施してきている。表1に、練習船広島丸を活用した体験型海洋教育の実績の一部を示す。

練習船を活用した海洋教育は、商船学科の新入生導入期のカリキュラムを基に、船内生活体験、航海体験、カッター等舟艇の漕艇などだけではなく、参加者全員でロープワークの実践として作成した筏に乗り込み、学校棧橋沖で潮流や風によって筏が流されることで、自然を体験させるなど、参加者の小中学生がより海に慣れ親しむような試行と改善を続けよりよい体験となるよう実施している。

2.1.1 船からより海へ誘う海洋教育

練習船による船中心の体験型海洋教育では、終了時の感想から「船が好きになった」等、船への関心が高まった様子を得ていた。しかし、講座や体験航海に参加した小中学生や引率の教員からの聞き取りより、1998年～2003年当時の学習指導要領では、小学校から高校生の社会科では海事に関する内容が、ほとんどなく、理科においても海洋について取り上げられていることが少ないことが判明した。そのため、船中心の海洋教育から大崎上島周辺海域を活かした内容へ発展させるべく、瀬戸内海の地域環境を生かして海洋環境への関心を持たせる観点から、環境の正の要因といえる「アマモ」観察から、「なぜ、この海域にアマモが群生しているのか？」など海を考える学習メニューを新たに盛り込んだ「海洋環境体験教育プログラム」による講座に取り組んだ⁽¹⁾。

この取り組みでは、講座の導入として、事前学習を教室で行い、実海域での体験までに、海を意識して眺めることを取り寄せた。体験航海、環境ワークショップとして、広島商船の練習船広島丸、実習艇ひかりにおいて「塩分、水温、透明度」などの観測、数箇所の海水、清水、生活排水(模擬)などの「透過り具合」の観察やパックテスト(COD:水質汚濁)を行った。アマモ場(図1)観察は、自らの力で観察場所へ向かい海を間近に観察するため、9mカッター、2名乗りシーカヤックなど小型舟艇による海洋体験学習を実施した。実施後は、各自の体験を感想文だけではなく、「ふりかえり」の場を設け、参加者それぞれの視点による感想を発表で共有して終えるように実施した⁽¹⁾。また、大崎上島周辺に生息する「スナメリ観察」を目的とした体験航海など近隣の小学校や地元NPO法人と共同で実施した実績もある。

2.2 大学COC事業での取り組みを活かした、

地域教育(郷土学習)への展開

2013年文科省大学COC事業(以下、COC事業)で、広島商船による、「離島の知の拠点形成—離島高専の教育研究と離島の振興・活性化—」が採択され、目的に「離島資源を活用した教育を行い、故郷や地域への関心・理解を深めるとともに、将来、地域に貢献できる人材を育成する。」とあり、大崎上島や芸予諸島における海事関連の調査に取り組んだ。

この調査は、聞き取り調査、画像などの資料収集から始めたが、大崎上島町(住民・役場)、大崎上島町教育委員会、大崎上島地域協議会など地域連携として取り組めたことから、多くの方々からの情報や大崎上島の歩みを伝える画像など膨大な資料を収集することが出来ている。この調査データの活用により、海洋体験学習での実績を土台にした新たな海洋教育への展開を目指し、生物、水産が中心であった、小中学校の理科、社会科、総合学習の時間への支援に向けて、地元に着した社会的な教育に取り組んでいる⁽⁷⁾。本校のCOC事業では、柴山らが広島商船高専の学生に対し、地域貢献活動が学生にどのような教育的成果をあげたのかについて報告している⁽³⁾。

2.3 地域教育(郷土学習)の取り組み

大崎上島町内の小中学校に向けた地域教育の支援の実績としては、2003年島内の旧3町が、大崎上島町に合併するまで、中学校3校、小学校4校があり、各校からの要望で、練習船への宿泊を伴う体験学習や船・海洋に関する出前授業を実施していた。地元に着した海洋教育(社会科)への展開として、造船等の海事産業に関する調査・資料収集(画像、聞き取り調査、地元地域協議会からの依頼で旧写真館にあった古いネガのデジタル化協力など)で入手したデータ展開として、大崎上島町内の小中学校などと連携して、同町で実施されている「大崎上島学」の一助となるべく、出前授業、体験航海による校外学習を「大崎上島の造船の歩み(海運の歴史)」をテーマとして実施している。出前授業では、島の造船史(図3)、昔と今の写真(図4)を教材とした⁽⁷⁾。大崎上島町内の小学校で使用されている東京書籍「新しい社会6」歴史編⁽⁸⁾から、

- ・身近な歴史を見つける(ページ3)(図3)
- ・複数の写真から読み取る(ページ143)(図4)

を示し社会科学習の予習を兼ねて授業を実施した。

また、授業では舟釘、マキハダ、錨ノミなどの特殊な船大工道具を持参して体験させた。



図3 1945年～1955年頃の大崎上島は、多数の造船所が存在し、人口が多かった事実を授業で示した。（広島商船大崎上島歴史文化研究会作成）



図4 大崎上島の旧写真館のネガ取込作業で発見した昭和30年頃の木江港（港内に停泊する大小の船と少し沖に仮泊中の練習帆船が見える）⁽⁷⁾

これらの地域教育の取組みは、1990年から長年の練習船運航の海技者だからこそ、陸上からだけではなく、海からの様子を知り得たこと、同様に長年の海事史や島内史の調査やデジタルデータ化があったからこそ、地域の子供達への郷土への関心を高める出前授業が行えられと考える。授業を通して、自分の居住地域に関心を持ってさらに知りたいという感想を生徒や教員から多く得ることが出来た。こうした子供達が海事産業にどれだけの興味を持ってくれるようになったかの定量的評価は今後の課題である。

3. まとめ

慣海性向上を命題として、船を活用した学習から、理科系のアマモによる海洋教育に取り組み、更に、島嶼地域から得た、海事産業史の情報を保存、発信することで次世代へ継承するべく、今後も船員教育はもとより、芸予諸島など瀬戸内周辺地域の子供達へ、海事・郷土への関心向上に役立てるように今後

も継続して取り組む計画である。

出前授業講師を高専生に手伝わせることより、学生が「教える」経験が勉強となることなどを含め、「地域教育」、「海洋教育」、「海技教育」を融合させた新しい海洋教育を今後もトライアンドエラーを繰り返して、「完成形の実践例」として、島嶼部で育つ次世代の青年達が、「将来、地元産業に目を向けてもらう」、「海事産業を目指してもらう」等と繋がるように今後も取り組んでいきたい⁽⁹⁾。

最後に、資料収集や提供、調査支援をいただいた、大崎上島町地域協議会、西卓男（マキハダ船「正寶丸」元船主）様、大崎上島町の皆様に感謝致します。

本研究は、JSPS 科研費 19K03132「消滅可能性離島に育つ子ども達への地域産業史の継承—地場産業と造船と行商船—」の助成を受けたものです。

参考文献

- (1) 清田ほか：練習船を活用した青少年への海洋体験学習の試み—アマモから瀬戸内海を考える海洋学習，高専教育，30， 527-532，2007.
- (2) 大阪市小学校教育研究会，21世紀の教育を創造する 大阪発『総合的な学習の時間』の試み，229-250，2000.1.
- (3) 柴山ほか：広島商船高専における地域貢献活動の成果の検討—学生と地域との関係に焦点をあてて，日本高専学会誌，24， 2，2019.
- (4) 内閣府：海洋基本法の概要，http://www8.cao.go.jp/ocean/policies/law/pdf/law_gaiyou.pdf，2024.4.13.
- (5) 太田絵里：沿岸域のパートナーシップ活動における海洋教育の役割に関する研究—東京湾のアマ再生事業を事例として—，日本環境教育学会関東支部年報，5，2011.
- (6) (一社)日本船長協会：「船長、母校へ帰る」～子供達に海と船を語って15年～，(一社)日本船長協会，2014.3.
- (7) 清田ほか：消滅可能性離島における海事産業史のデジタルデータ化とデータ活用方法についての一考察，日本航海学会論文集 145， pp.62-74，2021.12.
- (8) 東京書籍編：新しい社会6 歴史編，2019.3.
- (9) 東京大学海洋アライアンス海洋教育促進研究センター編，教育技術 MOOK 新学習指導要領時代の海洋教育スタイルブック 地域と学校をつなぐ実践，58-68，2019.3.

MMG モデルを用いた肥大船の操船制御に関する研究

正会員○井上 知哉（古野電気株式会社）
非会員 伊藤 翔（株式会社商船三井）

非会員 前野 仁（古野電気株式会社）
非会員 田中 辰喜（川崎重工業株式会社）

要旨

近年の船舶は肥大化が進んでおり、針路不安定特性を持つ船舶が多くなった。針路不安定性を有する船舶では、舵角が小さい範囲での操船を行う場合に操船者の意図と異なった応答をすることがあるため、操船難易度の上昇が問題となる。本研究では、不安定性を有する船舶の旋回性能について MMG モデルを用いて再現し、実海域航海での変針をシミュレーションすることで、不安定ループ幅が変針に与える影響について考察を行った。

キーワード：航路、針路不安定、肥大船、MMG モデル

1. 緒言

近年、船舶の肥大化が進んでいる。特に、L/B が 6 以下、かつ方形係数 C_b が 0.8 以上の船舶は肥大船に分類される。このような船舶においては、進路不安定性が操船制御において重要な問題となる。進路不安定性と操船に関する報告はこれまでも多数存在し、たとえば芳村⁽¹⁾らは、不安定ループ幅が大きい船舶ほど回頭角のオーバーシュートが大きくなることを数値シミュレーションにより示した。

本研究では、針路不安定特性をもつ大型タンカーを対象に操縦運動を MMG モデル⁽²⁾によって再現し、実海域での運航をシミュレーションすることで、進路不安定性が小舵角での変針時に及ぼす影響について調査し、考察を行った。

2. 操縦性能

本研究に用いた供試船は VLCC 船型である。主要目を表 1 に示す。 $C_b=0.82$ 、 $L/B=5.66$ であり、肥大船に分類される。

表 1 主要目

L_{pp} (m)	339.50
B (m)	60.00
d (m)	21.00
C_b	0.82
L/B	5.66

満載状態におけるスパイラル試験の結果を図 1 に示す。舵角を+20 度から-20 度へ切った場合と、舵角を-20 度から+20 度へ切った場合の 2 パターンを実施した。図 1 のグラフから、供試船の不安定ループ幅は 4.3 度であり、回頭方向によって左右非対称

な旋回性能を有する。また、舵角が±5~15 度付近において、2 種類の旋回特性を有することが確認できる。旋回特性が一つに定まらない原因について、小瀬ら⁽³⁾は肥大船における船尾部での流場の不安定性が関係していると述べている。斜航角と回頭角速度に対応した船体流体力に加えて、特異な流体力がランダムで生じることにより、複数種類の旋回特性が生じる。供試船も肥大船型であるため、同様の現象により流体力が一つに定まらず、複数の旋回特性が表れたものと考えられる。

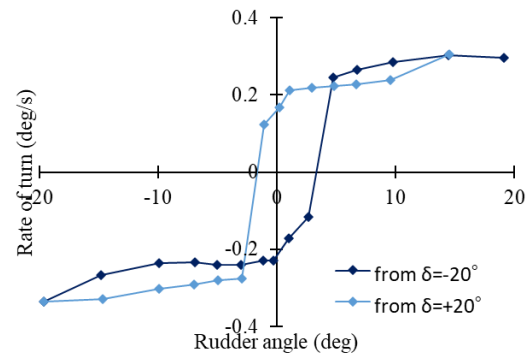


図 1 スパイラル試験

3. MMG モデル

MMG モデルでは、図 2 に示すような船体固定座標系と空間固定座標系の 2 種類を考える。船体の 3 自由度操縦運動方程式は、(1) 式の形で表す。

$$\begin{aligned}
 (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr - mx_G r^2 &= X_H + X_R + X_P + X_D \\
 (m + m_y)\dot{v} + (m + m_x)ur + mx_G \dot{r} &= Y_H + Y_R + Y_P + Y_D \\
 (I_{zz} + mx_G^2 + J_{zz})\dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) &= N_H + N_R + N_P + N_D
 \end{aligned} \quad (1)$$

外力およびモーメントについては、 X_H, Y_H, N_H ：船体流体力、 X_R, Y_R, N_R ：舵力、 X_p, Y_p, N_p ：プロペラ推力、 X_D, Y_D, N_D ：外乱の4種類を考慮した。

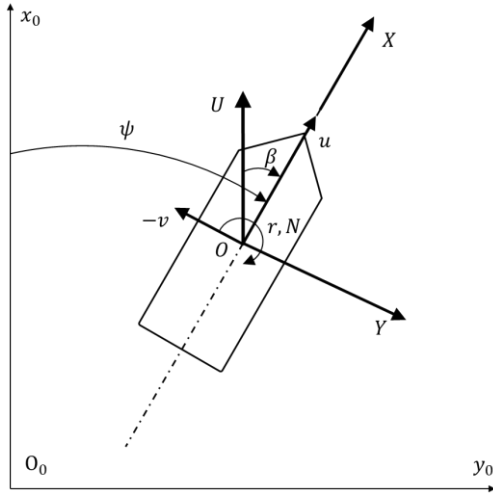


図 2 MMG モデル座標系

3.1 船体流体力

船体流体力は斜航角 β と無次元回頭角速度 r' の関数で、(2)式のように表す。

$$\begin{aligned} X_H &= q_H \{ X'_0 + X'_{\beta\beta} \beta^2 + (X'_{\beta r} - m'_y) \beta r' \\ &\quad + X'_{rr} r'^2 + X'_{\beta\beta\beta\beta} \beta^4 \} \\ Y_H &= q_H \{ Y'_\beta \beta + (Y'_r - m'_x) r' + Y'_{\beta\beta\beta} \beta^3 \\ &\quad + Y'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + Y'_{\beta r r} \beta r'^2 \\ &\quad + Y'_{rrr} r'^3 \} \\ N_H &= q_H L_{pp} \{ N'_\beta \beta + N'_r r' + N'_{\beta\beta\beta} \beta^3 \\ &\quad + N'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + N'_{\beta r r} \beta r'^2 \\ &\quad + N'_{rrr} r'^3 \} \\ q_H &= \frac{1}{2} \rho L_{pp} d U^2 \end{aligned} \quad (2)$$

U は船速を表す。

3.2 舵力

舵力は藤井の式⁽⁴⁾に基づき、(3)式のように表す。

$$\begin{aligned} X_R &= -(1 - t_R) F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1 + a_H) F_N \cos \delta \\ N_R &= -(x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta \end{aligned} \quad (3)$$

t_R, a_H, x_H は船体と舵の干渉を表す係数、 x_R はMidshipを基準とした舵位置、 δ は舵角を表す。また、舵直圧力 F_N は(4)式のように表す。

$$\begin{aligned} F_N &= \frac{1}{2} \rho A_R U_R^2 f_\alpha \sin \left(\delta - \tan^{-1} \frac{v_R}{u_R} \right) \\ f_\alpha &= \left(\frac{6.13\lambda}{\lambda + 2.25} \right) \\ U_R &= \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \end{aligned} \quad (4)$$

A_R は舵面積、 λ は舵のアスペクト比を表す。

舵面への船長方向の流入速度 u_R および横方向の流入速度 v_R は(5)式のように表す。

$$\begin{aligned} u_R &= \varepsilon (1 - w_p) u \\ &\sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left(\sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J_p^2}} - 1 \right) \right\}^2 + (1 - \eta)} \\ v_R &= U \gamma_R (\beta + l_R' r') \end{aligned} \quad (5)$$

ε は舵位置とプロペラ位置の伴流係数比、 w_p は有効伴流率、 η はプロペラ直径と舵高さの比、 κ は実験定数、 K_T はスラスト係数、 J_p はプロペラ前進定数、 γ_R は舵における整流係数を表す。

2章で述べたように、供試船は左右の旋回特性が非対称である。主な原因はプロペラ回転に起因する後流影響の非対称性と考えられる。プロペラの回転により生み出される非対称な後流が舵面に流入する流れに影響するため、舵角と斜航角がともに0度の直進状態であっても横方向の舵力が0にならない。本研究では、この影響を整流係数 γ_R の非対称性により再現することとした。流入角の方向によって整流係数に異なる値を用いた。

3.3 プロペラ推力

プロペラによる推力は(6)式のように表す。

$$X_p = (1 - t_p) \rho n_p^2 D_p^4 K_T \quad (6)$$

t_p は推力減少率、 n_p はプロペラ回転数、 D_p はプロペラ直径を表す。本研究で対象とする船速は10knot以上であり、緊急停止や低速航行は考慮しないことから、プロペラ横力の影響は小さく無視できるものとした。

3.4 外乱（風）

風抗力はBlendermann⁽⁵⁾の推定式を用いた。(7)式のように表す。

$$\begin{aligned} X_{air} &= -CD_l \frac{A_L \cos \psi_{air}}{A_F \left(1 - \frac{B_1}{2} \left(1 - \frac{CD_l}{CD_t} \right) \sin^2 2\psi_{air} \right)} \\ &\quad \times q_{air} A_L \\ Y_{air} &= CD_t \frac{\sin \psi_{air}}{1 - \frac{B_2}{2} \left(1 - \frac{CD_l}{CD_t} \right) \sin^2 2\psi_{air}} \\ &\quad \times q_{air} A_F \\ N_{air} &= \left\{ \frac{S_L}{L_{oa}} - 0.18 \left(\psi_{air} - \frac{\pi}{2} \right) \right\} Y_{air} \\ &\quad \times q_{air} A_L L_{OA} \\ q_{air} &= \frac{1}{2} \rho_{air} V_{air}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

CD_l, CD_t は抗力係数、 A_L は正面投影面積、 A_F は側面投影面積、 ψ_{air} は迎角（反時計回りを正）、 B_1, B_2 は船種によって決まる係数を表す。

4. 旋回性能の再現

海上で実施されたスパイラル試験およびZ試験の旋回特性についてMMGモデルを用いて再現することにより、供試船のモデル同定を行った。

図3はスパイラル試験におけるシミュレーション結果と海上公試運転の比較である。舵角を+20度から-20度へ切った場合と、舵角を-20度から+20度へ切った場合のそれぞれについて示す。定常旋回時の回頭角速度、不安定ループ幅の大きさと左右の非対称性が精度よく再現できている。

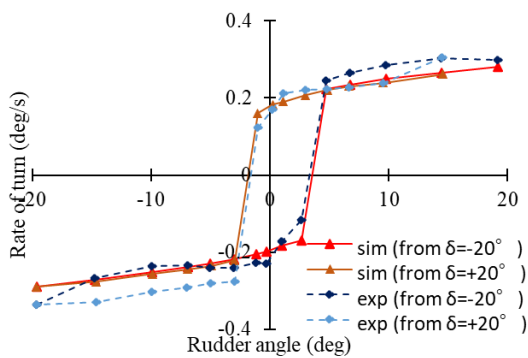


図3 スパイラル試験再現結果

図4は±10度/20度Z試験の比較を示す。いずれの場合においても、第1オーバーシュート角および第2オーバーシュート角が10%以内の誤差に収まっており、精度よく再現ができていると考える。

以上の結果より、MMGモデルを用いることで肥大船の操縦性能が高精度に再現できることが確認できた。さらに、針路不安定性および旋回性能特性の非対称性について、舵の整流係数の非対称性が有効に作用することを確認した。

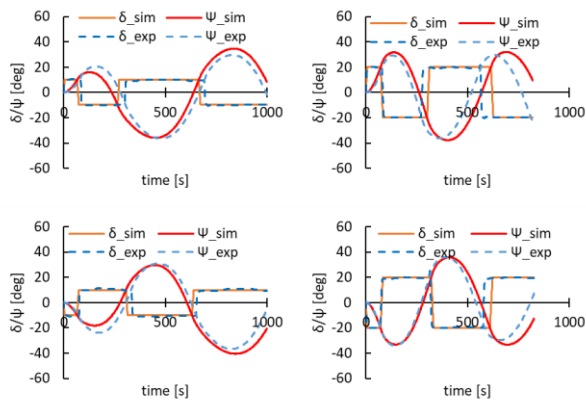


図4 Z試験再現結果

5. 実航海への適用

5.1 喫水と旋回特性

供試船は実海域の航行中、目標方位を数度~10度の範囲でしばしば変化させている。その時の舵角制御は±10度以内の範囲で変化していることが多い。進路不安定性が変針時の操船制御に及ぼす影響を調査するため、往路と復路で喫水が大きく異なる1航海分のデータを対象に、変針データの解析を行った。往路の喫水は9.5m（以下、バラスト状態と呼ぶ）であり、復路の喫水は19.3m（以下、満載状態と呼ぶ）であった。

まず、それぞれの喫水条件における左舷側に3度変針させた場合の舵角と船首方位の時系列を図5に示す。左側が軽荷状態、右側が満載状態である。

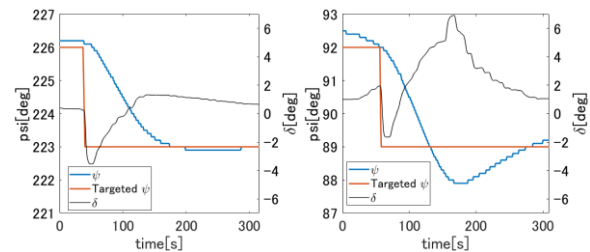


図5 3度変針時系列

バラスト状態では、変針方向に大きく舵を切った後のあて舵が2度以内範囲で回頭を止めることができおり、目標方位到達後のオーバーシュートがほとんど生じていないことがわかる。一方、満載状態では、あて舵を4度以上切っても回頭を止めることができず、さらに大きいあて舵を切った後に回頭が止まっている。供試船は左舷方向への回頭に対して3度の進路不安定性を有しており、不安定ループ幅内の操舵制御があて舵として適切に機能していないことが考えられる。結果として、回頭惰性が残ったまま目標方位に到達してしまい、1度以上のオーバーシュートが生じたものとみられる。

次に、各喫水状態における変針部を抽出し、オーバーシュート量を確認したところ、バラスト状態では1度以上のオーバーシュートが生じるのは全体の1割未満であったが、満載状態では全体の2割以上に増加していた。小舵角による微小な変針においても不安定ループ幅の影響を考慮することが重要であると考えられる。

5.2 シミュレーションによる変針の最適化

4章では、MMGモデルを用いて供試船の旋回性

能を高精度に再現した。このモデルを実海域航海にも適用し、満載状態における変針を再現した。図 5 の満載状態における変針について、MMG モデルでシミュレーションした結果を図 6 に示す。ただし、変針方向へ舵を切った直後から大きくあて舵を入れる直前までの操舵を入力している。波浪と潮流に関する計測データが存在せず、完全に実海域の海象を再現できているわけではないが、船首方位の挙動はかなり近いものとなっている。

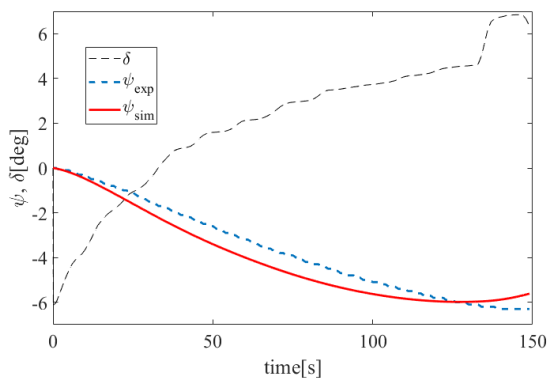


図 6 実海域航海変針の再現結果

図 7 は 3 パターンの操舵制御でシミュレーションした場合における船首方位の変化を示す。不安定ループ幅内の舵角(+3 度)を維持した操舵では、回頭特性が変化せずオーバーシュート量が大きくなる一方で、不安定ループ幅外の舵角(+4.5 度)を維持した操舵では、実際の操舵よりもオーバーシュート量を抑制できるという結果となった。このことから、不安定ループ幅内での操舵時間は最小化することが望ましいと考えられる。

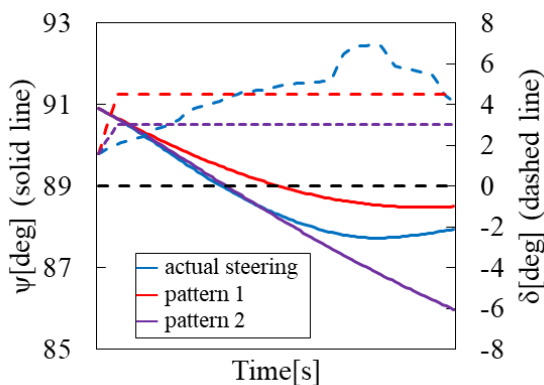


図 7 操舵パターンによる船首方位の挙動の比較

6. 結言

本研究から、以下の結果が得られた。

左右で非対称な不安定ループ幅を有する肥大船の操船特性を MMG モデルによって高精度に再現した。左右の非対称性はプロペラ後流の影響があるが、舵の整流係数に非対称性を生じさせることで再現が可能であることを確認した。

小舵角の範囲で操舵を行う変針において、針路不安定性は操船に影響を与える。特に、不安定ループ幅内の舵角では回頭を止める効果が小さく、この領域での操舵時間が長い場合に変針時のオーバーシュートが起きやすい傾向がある。

本研究で同定したモデルを用いて満載状態における変針をシミュレーションしたところ、不安定ループ幅外での舵角を維持した操舵パターンにおいて、オーバーシュートを抑制する結果となった。不安定ループ幅内での操舵時間を短縮することがオーバーシュート抑制に効果的であると考えられる。

参考文献

- (1) 芳村康男：船の操縦性能に要求されはじめた基準について，住友重機械技法，Vol. 40，pp. 55-59，1992.
- (2) 「船舶操縦性予測モデルの高度化に関する研究委員会」報告書，日本船舶海洋工学会，2014.
- (3) 小瀬邦治・松井志郎・川隅一道・仲渡道夫・山崎芳嗣：肥大船の特異な操縦性能に関する研究，西部造船会会報，54 巻，pp. 203-215，1977.
- (4) 藤井斉・津田達夫：自航模型による舵特性の研究，造船協会論文集，1961.
- (5) Blendermann W：Parameter identification of wind loads on ships，J. Wind Eng. Ind. Aerodyn，51 (3)，pp. 339-351，1994.

船員の疲労調査に関する研究

-PVT 計測と自覚症状調査による事例検討-

正会員○谷水 聖奈（鳥羽商船高等専門学校） 正会員 田村 祐司（東京海洋大学）
正会員 小島 智恵（鳥羽商船高等専門学校） 正会員 竹本 孝弘（東京海洋大学）

要旨

近年、海事産業における海上安全に対する取り組みでは、ハードウェアの対策に加えソフトウェアの要因であるヒューマンファクターに関与する改善が、安全対策を考える過程で主要な課題となっている。また、国際海事機関（IMO：International Maritime Organization）の海難事故調査コードでは、ヒューマンファクターへの対策として、操船者の適切な訓練と資格証明に加え、操船者の意思疎通、経験、疲労、状況認識、ストレス及び労働条件などの分野について検討する必要があるとの見解が示されている。⁽¹⁾そこで、本研究では、船員の疲労による海難事故の減少を目的とし、航空産業や医療分野で使用されている精神運動覚醒度検査（以下、PVT：Psychomotor Vigilance Test）と自覚症しらべ及びカロリンスカ眠気尺度を用いて、船員の疲労と作業、行動環境による疲労の調査を行い、疲労傾向の把握を試みた。

キーワード：船員、労働、疲労、睡眠、労働安全衛生

1. はじめに

IMO 第100回海上安全委員会（2018年）で承認

された船員の疲労に関するガイドライン⁽²⁾では、「海事活動における疲労に関連すると報告されている負傷や事故の事例は、多大な経済的、環境的、人的コストをもたらしており、疲労のリスクとその原因に対処することは不可欠である」と指針が示されている。

本研究では、船員の疲労に着目し、疲労を客観的に計測できるPVTを活用し、船員の疲労調査が可能かを検討した。さらに、疲労の主観的評価として、陸上労働機関にて使用されている自覚症しらべ及びカロリンスカ眠気尺度による調査を実施した。

2. 船員の職場環境の現状

2013年から2016年にわたって実施されたProject MARTHAの最終報告書⁽³⁾では、「ほとんどの船員において、疲労とストレスは航海の経過とともに増加し、モチベーションは減少する」ということが明らかにされている。

また、船員の労働環境及び生活環境は、船舶という閉鎖された環境で、刻々と変化する厳しい気象・海象の中、継続的に就労⁽⁴⁾し船内で食住をとにする、職住一体な環境である。海事産業は24時間365日稼働をしている産業であり、航空産業や医療業界などと同様に、複雑化したシステムの職場環境であ

ると言える。

3. 疲労の種類と要因

疲労とは、「肉体的・精神的活動の結果、とくに過度の活動の結果生じる機能低下状態を表す」⁽⁵⁾と定義されており、疲労には肉体的疲労と精神的疲労がある。『肉体的疲労』は立ち仕事やパソコンの長時間作業などにより、同じ姿勢を長時間続けているために、ある部分の疲労が蓄積し倦怠感が残ることで発生する。『精神的疲労』は仕事や人間関係などのストレスに加え、睡眠不足や過労が重なることにより、脳の疲労から発生する。人間は疲労した状態では、パフォーマンスが著しく損なわれる可能性があり、それにより意思決定、応答時間、判断力などのスキルや人間の能力に影響を及ぼすとされている。⁽²⁾

また、疲労はさまざまな要因によって引き起こされるが、前述した船員の疲労に関するガイドラインでは、主な疲労の要因として、睡眠不足、睡眠・休息の質の低下、体内時計のずれ、長時間の覚醒、ストレス、過度の仕事量（精神的及び/または肉体的な負荷）が挙げられている。

4. 疲労の調査方法

本研究では、日帰り内航船員2名（以下、被験者A、被験者B）を被験者とし、2024年2月2日から3月1日の期間にて、被験者の勤務日（計20日間）に

て疲労計測を実施した。

実施した疲労計測の調査項目は、客観的データ取得にPVT計測、主観的評価として自覚症しらべ及びカロリンスカ眠気尺度を用いて疲労度を調査した。また、被験者の1日の行動と疲労の傾向を把握するために、行動調査票の記入も併せて実施した。

4.1 PVT 計測手法と反応遅延について

PVTによる計測方法は、ディスプレイに赤い数字が表示されたら、できる限り早くボタンを押す、単純な作業を5分間繰り返すことで、反応時間を測定し解析すると、被験者の覚醒度やパフォーマンスに関する指標を得ることができる。

図1は、厚生労働省の長時間労働医師への健康確保措置に関するマニュアル⁽⁶⁾の慢性睡眠不足の影響による反応遅延回数と睡眠時間の関係を示したものである。3時間、5時間、7時間睡眠で7日間の睡眠制限を実施した場合、睡眠時間が短いほどPVTから得られる反応遅延（ラプス）回数が増加することが確認された。そこで、本研究では、0.5秒以上の反応時間であったものを反応遅延（ラプス）とし、ラプスの回数を疲労の指標として評価した。

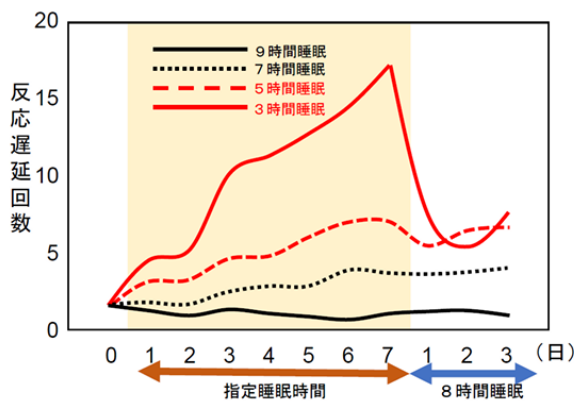


図1 慢性睡眠不足の影響⁽⁶⁾

4.2 PVT 計測によるラプス検出回数の結果

図2にPVT計測によるラプスの検出回数を示す。1日3回（作業開始後、昼食後、終業時）・20日間、合計60回のPVT計測を行ったところ、被験者Aで26回、被験者Bでは21回のラプスが検出された。また、ラプス検出なしは、被験者Aで34回、被験者Bでは、38回となり、被験者Bにおいては計測忘れが1回という結果となった。

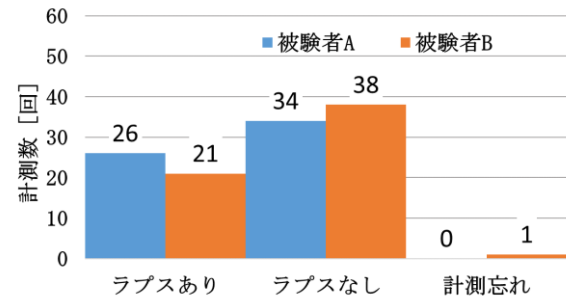


図2 PVT計測によるラプス検出回数

4.3 PVT 計測環境とラプス検出の結果

図3に両被験者のPVT計測によるラプス検出時の時間帯を示す。被験者Aのラプス検出時の時間帯は、昼食後が46%（12回）、次いで、作業開始後で39%（10回）終業時が15%（4回）であった。被験者Bのラプス検出時の時間帯は、昼食後が43%（9回）、次いで、作業開始後で33%（7回）終業時が24%（5回）であった。両被験者とも、昼食後で約4～5割、作業開始後が約3～4割、終業時で約2割、ラプスが検出される傾向であった。本結果より、就業時間の経過とラプスの検出には関連性がないと考えられた。

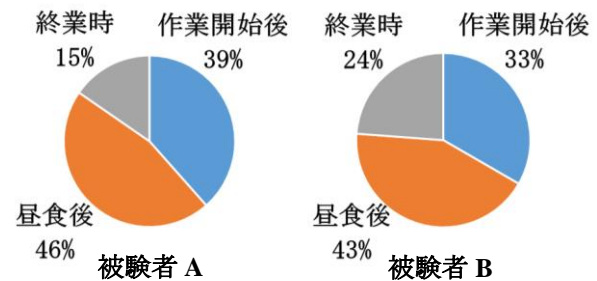


図3 PVT計測の時間帯とラプス検出

4.4 作業及び計測時間帯とラプス検出の結果

図4に作業及び計測時間帯とラプス検出の関係を示す。ラプス検出時における直前の作業を分類したところ、被験者Aにおける作業開始後の直前作業は、出港作業10件、昼食後では昼食11件、出港作業1件（計測後に昼食）、終業時では終業作業（船固め、水洗い）4件であった。被験者Bの直前作業については、作業開始後では出港作業が2件、車両積み降ろしが3件、通勤が2件、昼食後では昼食が9件、終業時では終業作業（船固め、水洗い）が5件であった。

作業開始後の分類結果より、被験者Aの作業開始後の作業は、出港作業が全てとなっており、被験者Bの作業開始後の作業は、通勤、車両積み降ろし、

出港作業に分類されることから、疲労には、役職や作業、行動環境が関連すると言える。

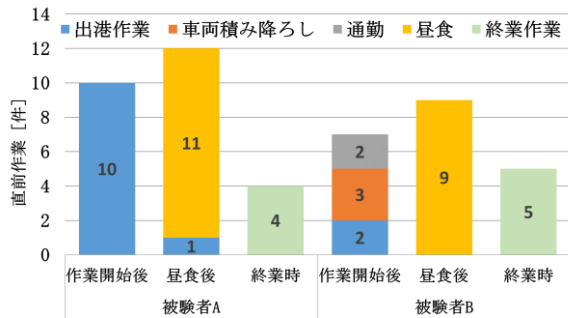


図4 作業、行動環境とラプス検出

4.5 PVT 計測の反応時間による疲労評価

PVT (全 60 回) 計測において、1 回の計測で得られる反応時間の平均を PVT 値とし、作業開始後から昼食後及び昼食後から終業時の PVT 値の増加比率より、 Δ PVT を求め、増加比率が 100% よりも高率の場合は、疲労ありと評価した。

Δ PVT は次式により求めた。

$$\begin{aligned} \Delta PVT [\%] &= \frac{\text{昼食後の PVT 値}}{\text{作業開始後の PVT 値}} \times 100 \\ &= \frac{\text{終業時の PVT 値}}{\text{昼食後の PVT 値}} \times 100 \end{aligned} \quad \dots\dots (1)$$

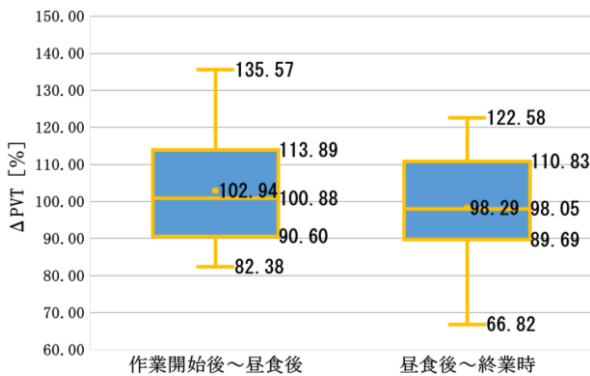


図5 被験者 A の Δ PVT による疲労評価

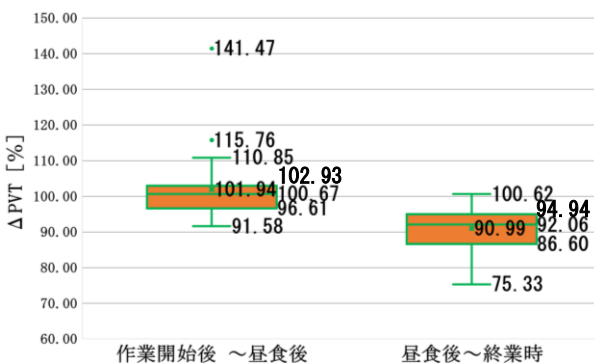


図6 被験者 B の Δ PVT による疲労評価

図5に被験者Aの作業開始後から昼食後及び昼食後から終業時の Δ PVTを示す。被験者Aの作業開始後から昼食後の Δ PVTの平均は102.94%、昼食後から終業時の Δ PVTの平均は98.29%であった。図6に被験者Bの作業開始後から昼食後及び昼食後から終業時の Δ PVTを示す。被験者Bの作業開始後から昼食時の Δ PVTの平均は101.94%、昼食後から終業時の Δ PVTの平均は90.99%であった。両被験者とも、作業開始後から昼食後の Δ PVTは100%を超え、疲労ありと評価された。また、昼食後から終業時の Δ PVTは100%を下回る結果となった。

なお、就業時間は、作業開始後から昼食後までは約2時間半から3時間、昼食後から終業時まででは約7時間の勤務であった。昼食後から終業時までの Δ PVTは100%を下回ったのは、昼食後から終業時までの時間帯に肉体労働が少なかったことに因るのではないかと考えられた。

4.6 作業時間と休息時間の割合と疲労傾向

PVT (全 60 回) 計測時における作業時間と休息時間の割合を図7に示す。被験者Aは、作業開始後から昼食後については、作業が約6割、休息が約4割、昼食後から終業時については、作業が約7割、休息が約3割の勤務体制となっていた。被験者Bは、作業開始後から昼食後については、作業が約7割、休息が約3割、昼食後から終業時については、作業が約8割、休息が約2割の勤務体制となっていた。この結果より、就業時間と作業、休息時間の関係について、時間の割合のみでは、疲労の傾向を把握するまでに至らなかった。

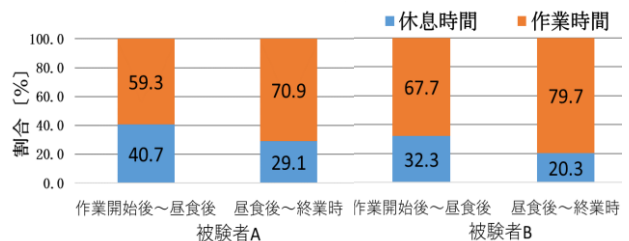


図7 休息時間と作業時間の割合

5. 眠気及び自覚症状調査

被験者の主観的疲労評価を、カロリンスカ眠気尺度調査及び自覚症しらべ調査で実施した。

5.1 カロリンスカ眠気尺度による眠気の計測

カロリンスカ眠気尺度は、1～9の9段階で自己の

眠気を評価する心理尺度である。数値が高いほど主観的眠気が強いことを示している。カロリンスカ眠気尺度による眠気の計測は、1日5回（作業開始後、昼食後、終業時、就寝時、翌朝起床時）・20日間、合計100回実施した。図8に計測時の眠気の平均値を示す。就業中（作業開始後、昼食後、終業時）においては、両被験者ともに昼食後が最も高く、被験者Aは1.20、被験者Bは6.45であった。また、昼食後の計測で最も高くなる点で、ラプス検出時の時間帯の傾向と同様であった。

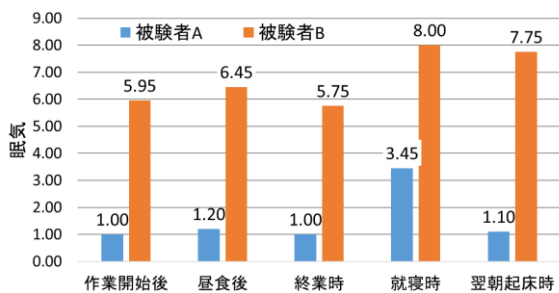


図8 各計測時間帯での眠気

5.2 自覚症しらべによる疲労の計測

自覚症しらべは、経時的に実施することで、作業や行動に伴う疲労を調査することができる。自覚症しらべには、25項目の質問があり、5段階で回答することで、自己の主観的疲労を評価することができる。数値が高いほど主観的疲労が強いことを示している。今回はねむけ感について分析した。自覚症しらべによる疲労の計測は、1日5回（作業開始後、昼食後、終業時、就寝時、翌朝起床時）・20日間、合計100回実施した。図9に計測時の「ねむけ感」の平均値を示す。就業中（作業開始後、昼食後、終業時）においては、両被験者ともに昼食後が最も高く、被験者Aは1.02、被験者Bは3.37であった。「ねむけ感」についても、昼食後の計測で最も高くなる点で、ラプス検出時の時間帯の傾向と同様であった。

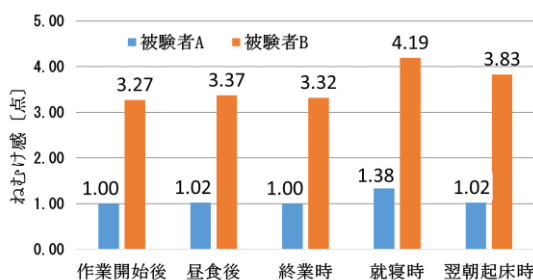


図9 各計測時間帯での「ねむけ感」

6. 結論

(1) PVT を活用した疲労の計測手法として、反応遅延によるラプスの検出による手法と Δ PVT を用いた反応時間の評価をすることで、船員の疲労を検出することができた。

(2) Δ PVT を用いることで、計測時間帯間の疲労傾向を把握することが可能となる。

(3) 作業及び行動環境による疲労の傾向について調査した結果、就業時間の経過及び特定の作業による関連性は見受けられなかった。

(4) 総就業時間及び作業時間と休息時間の割合が疲労に影響を及ぼす可能性があると考えられるが、把握するまでに至らなかった。今後、心拍数計測や作業行動などの詳細な調査を実施することで、これらの知見を把握できるのではないかと考える。

(5) 本研究は、2名の船員を対象とした事例研究であるが、客観的なPVT測定と2種類の主観的眠気調査により、航海時における船員の疲労の傾向を把握することができた。また、本研究の結果から、自覚症しらべやカロリンスカ眠気尺度による主観的疲労評価は、PVT計測のような客観的疲労評価の補完情報として意義があると考えられた。

参考文献

- (1) 高等海難審判所：IMO 海難調査マニュアル，p. 101，海文堂出版株式会社，2008。
- (2) International Maritime Organization：GUIDELINES ON FATIGUE，<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/HumanElement/Documents/MSC.1-Circ.1598.pdf>，2019.1.24。
- (3) Inter Manager：Project MARTHA - The Final Report，<http://ftp.elabor8.co.uk/martha/flipbook/martha/thefinalreport/index.html>，2017.7.3。
- (4) 国土交通省：船員の労働環境，<http://www.tb.mlit.go.jp/kobe/profile/27yوران-roudou.pdf>，2017.3.12。
- (5) 大村裕・渡辺恭良：脳と疲労 ー慢性疲労とそのメカニズム，p. 4，共立出版株式会社，2009。
- (6) 厚生労働科学研究事業：長時間労働の医師への健康確保措置に関するマニュアル，<https://www.mhlw.go.jp/content/10800000/00677260.pdf>，2020.9.30。

船底塗料の剥離作業の効率化に関する研究

～塗料の付着力調整の検討～

○学生会員 佐藤 次郎（大島商船高等専門学校海洋交通システム学専攻）

正会員 千葉 元（大島商船高等専門学校） 正会員 村田 光明（大島商船高等専門学校）

要旨

船舶は長期間海上で係留、航海することにより汚損する。汚損により船体速度の低下などにつながるため、一般的に船底塗料は一定期間ごとに塗り替えられる。船底塗料の再塗装に必要な剥離作業は、手作業で行う必要があるため労力を必要とする課題がある。そこで、剥離作業の効率化を目指すため、付着力の異なる塗料の重ね塗りを提案する。本研究では、プルオフ法によって、重ね塗りした塗料の膜厚比による付着力変化を明らかにする。明確となった付着力と膜厚の関係から、実際の船舶に長期間利用できる必要な付着力を維持しながら必要な時に剥がせる状態の膜厚比を新たに提案する。

キーワード：船舶, 船体整備, 剥離作業, 船底塗料, 付着力

1. 研究の背景と目的

1.1 船底塗料の必要性

船舶は長期間海上で係留、航海することにより、船底に藻や海苔などの海藻類、牡蠣やフジツボなどの貝類が付着する（以下、これらを海洋生物とする）(図1)。海洋生物が付着することにより、水との摩擦抵抗が増加し、船舶の燃費の悪化、船体速度の低下につながる。船速は小型船の場合全速の2/3程度に減速するとも言われている⁽¹⁾。船底に付着する海洋生物などを防止することを目的として、船底塗料が利用されている。船底塗料は、船体の抵抗を抑え船速を維持、燃料消費量の増加を防いでいる。しかし船底塗料は、年数の経過、紫外線、外部からの衝撃などで劣化する。船底塗料が劣化するため、船舶が運航して一定期間経過した後、一般的に船舶へ塗装されている塗料の塗り替えが行われている⁽²⁾。

1.2 塗装の塗り替え作業

一般的な船底塗料の塗り替え作業は、入渠した後、清水洗浄作業、海洋生物除去作業、塗膜剥離作業、塗装面整地作業、再洗浄および脱脂・乾燥したのち、塗装作業といった流れとなる。船体に対して海洋生物が根を張っているため、高圧洗浄機等で簡単に落とすことができない。海洋生物を落とすには、スケラー(コテ)で掻き落とす必要がある。塗料面に根を残してしまうと新しい塗膜が平坦でなくなり、船体抵抗増加などの可能性があるため、塗装面整地作業にて塗装面を整地した上で新しく船底塗料を塗装する流れとなる。塗料の剥離作業には手作業で行うことが多くあるため、時間と労力がかかってしまう課題がある⁽³⁾⁽⁴⁾。本研究では、サンドブラストなどの利用も難しく、手作業の剥離作業が必須と言えるFRP素材を使用した小型船の剥離作業の効率向上に、特に着目した。

1.3 剥離可能塗料

本研究では塗料全体を手で剥がすことができ、後に残らないといった、特殊な付着力および剥離性能をもっている剥離可能塗料に着目した。この剥離可能塗料を船体に直接塗装することで、船舶用塗料の一部として応用できた場合、一定の付着力を保ちながら、入渠時に高圧洗浄機などを用いた剥離作業時のみ、容易に塗装全体を綺麗に剥がすことができると考えられる。

1.4 剥離作業を効率化する塗装方法の提案

本研究では、1.3 節示した剥離可能塗料を利用した、剥離作業を効率化できる塗装方法を提案する。提案する塗装方法は、特殊な付着性の剥離可能塗料と一般的な船底塗料の2種類の塗料を使用し、重ね塗りする方法である(図2)。

船体に重ね塗りをする際の塗料は、上塗り塗料と下塗り塗料に大別される。上塗り塗料は、下塗り塗料に付着し、直接海水に触れることになる。下塗り塗料は、直接船体および上塗り塗料に付着することになる。船舶に塗料を重ね塗りする際、上塗り塗料に求められている一般的な性能は、海洋生物の付着を防止することである。本研究で提案する塗装方法においても、海洋生物付着防止効果のある一般的な船底塗料を塗装する。下塗り塗料に求められている一般的な性能は、船体や上塗り塗料に対して高い付着力をもっていることや、錆防止など船体を保護できることである。付着力の調整が可能である塗料として、剥離可能塗料を塗装する。本研究における付着力以外の下塗り塗料に必要な性能を示す。FRP素材に塗装可能であること。水や日光に対する耐久性があることである。まず、塗膜が海水中において防汚剤を定常的に溶出すること、次に長期間防汚効果を発揮できること、さらに乾燥が早く、日光や風雨

によく耐えることである。

本実験で利用する塗料は、剥離可能塗料として、大洋塗料株式会社に開発された水系ストリップブル塗料を使用する。水系ストリップブル塗料は、工業用塗料として使用されており、塗装後簡単に塗装を剥がせる塗料と言われている。成分は水系エマルジョン樹脂塗料である。他の性質として、防水性があることから、水中に应用できると考えられる⁽⁵⁾。一般的な船底塗料として、中国塗料株式会社に開発された Seajet033 ブルーを使用する。主に小型船で利用されており、乾燥が早く日光や風雨に耐える性質や防汚性に優れている⁽⁶⁾。また、船底塗料が海水に溶けだし水流により海洋生物とともに流れる、防汚塗料として、船体を綺麗に保つ性能もある。

1.5 目的

これまでに重ね塗りを行った結果により、塗膜の厚さで塗料の付着力が変化する可能性が示唆されている⁽³⁾。本研究は、FRP 素材の小型船における剥離作業の効率を向上させるために、2 つの塗料の性能が発揮できる利用的な塗料の膜厚比を提案することである。実用化に向けて本研究では、膜厚比による付着力の変化を明らかにすることを目的として行う。

2. 実験

2.1 付着力検討の流れ

船舶の入渠時など船底塗料を必要なときだけ剥がせるようにするためには、付着力を調整する必要がある。本実験では、2 種類の塗料性能が発揮できる適切な塗料の膜厚比等(上塗り塗料膜厚/下塗り塗料膜厚)を検討する。適切な塗料の膜厚比を分析するため、膜厚と付着力の校正曲線を作成する必要がある。付着力の評価方法として、付着力を詳細に数値化できる JIS 試験のプルオフ法(JIS K 5600-5-7)を実施する⁽⁷⁾(図 3)。

プルオフ法を行う前の予備実験として、一般的に船舶に塗られている塗料の膜厚(約 300 μm)程度のムラの無い塗装が、本研究で提案する手法を用いても再現できていることを確認する必要がある。膜厚が均一であることおよび異なることを示すため、指定した 3 種類の塗膜パターンで塗装した塗料の膜厚に対して t 検定を行う。t 検定は、t 分布を使った仮説検定の 1 つで、母集団から抽出した標本の平均値に対して検定が行える。帰無仮説として異なる標本の有意差がないとした時に、有意水準を決めて計算した結果、仮説が棄却された場合は異なる標本と考えられる。仮説が棄却されない場合は同様の標本である可能性が高いといえることができる。また、プルオフ法が付着力測定方法として、クロスカット法(JIS K 5600-5-6)と同様に関連性があることを示すこと。および提案する塗装方法であっても必要な付着力が得られていることを確認するため、プルオフ法を行う前にクロスカット法を実施する⁽⁷⁾。

本実験の塗装方法においては、上塗りの船底塗料を一般的に船舶で塗られている膜厚と同じ厚さで設

定(約 300 μm)する。これまでの研究から、下塗り塗料は上塗り塗料より膜厚が厚い場合剥がれやすいことが示唆されているため、スプレーガンによる吐出量差も加味して、下塗り塗料の膜厚を 80, 160, 240 μm の 3 パターンに調整する。

3 パターンの塗料膜厚を作成する塗装方法に対して、これまでの傾向である、上塗り塗料膜厚と下塗り塗料膜厚の膜厚比が大きいほど付着力が大きくなっていること。船舶でも応用できる十分な付着力があること。下塗り塗料が薄い塗装パターンの塗料が剥がれないこと。

2.2 付着力測定方法

クロスカット法(JIS K 5600-5-6)は、まず試験片に塗装した塗料を指定された間隔(本研究では 3 mm)で、スパーサーを用いて手で格子状にカットする。格子の部分にテープを付着させ引き剥がすことで、塗膜の付着力を評価する JIS 試験である⁽⁷⁾。クロスカット法は付着力の概要を調査することに適しており、6 段階の評価により一般的な塗装としての利用可否を判断できる。しかし、詳細な付着力を検討することは難しい。

プルオフ法(JIS K 5600-5-7)は堅い素地に対する試験片組み立て方法を行う。洗浄した試験円筒の面に接着剤を均一に塗布する。塗膜の破壊を起こすためには、接着剤の凝集及び接着剤が被試験塗膜の凝集力及び付着力よりも大きいことが必要である。試験円筒の接着剤塗布面を接着剤が硬化するまで塗膜に接着させる(図 4)。本実験では、2 時間以上接触させる。接着剤が硬化後、切り込み器具を用いて試験円筒の周囲を素地まで切り込み、試験円筒を引っ張り塗料が剥がれた際の最小張力を測定する。測定したデータをもとに、付着力を数値化する JIS 試験である⁽⁷⁾。プルオフ法は、剥離時の最小張力を数値化できる試験であるため、詳細な付着力を測定できる長所があり校正曲線が求められる本研究で採用する。プルオフ法によって得られる、破壊強さ σ (MPa) は次の式によって算出する。

$$\sigma = \frac{F}{S} \dots\dots\dots (1)$$

F:破壊力(N)

S:試験円筒の面積(mm²)

2.3 実験方法

2.3.1 塗装方法

実験に利用した主な道具は、水系ストリップブル塗料、Seajet033 ブルー、FRP 試験片(10×10 cm、厚さ 0.2 cm)、スプレーガン(恵宏製作所, spray man G-05)、デジタルノギス(モノタロウ, MG-HVLP) の 5 つである。試験片は小型船の素地によく使われている FRP 試験片を使用する。プルオフ法を使用した。

具体的な実験方法を示す。まず、塗料の正常な塗装のため、FRP 試験片を洗浄して乾燥させる。乾燥後の FRP 試験片上にスプレーガンを使用して塗装を行う。塗装時は、塗料の使用方法に基づき、室外でスプレーガンを用いて試験片にムラなく塗装する。各

塗料を十分乾燥させるため養生時間として1日以上をおく。下塗り塗料の膜厚パターンは、約80 μm、160 μm、240 μmとする。上塗り塗料は約300 μmになるよう塗装を行なった。膜厚の調整は、同じ塗料を塗り重ねることにより行った。各塗装の膜厚を測定する際は、JIS試験で定められている、厚さの差による方法(JIS K 5600-1-6)を用いて測定した。膜厚比の予想として、80 μmが0.3程度、160 μmが0.5程度、240 μmが0.8程度である。

下塗り塗料の膜厚が厚すぎると剥がれやすくなることから⁽⁵⁾、十分な付着力をもちながら、剥離可能塗料と同様の剥離性を発揮できる適切な膜厚比を、膜厚比と破壊強さの校正曲線から推定する。

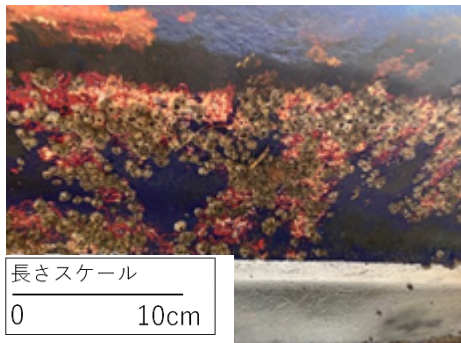


図1 船底に海洋生物が付着している様子

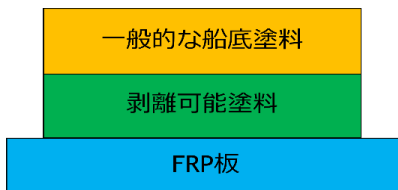


図2 提案する重ね塗りのイメージ

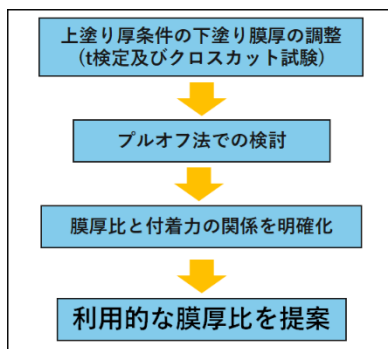


図3 実験手順のフローチャート

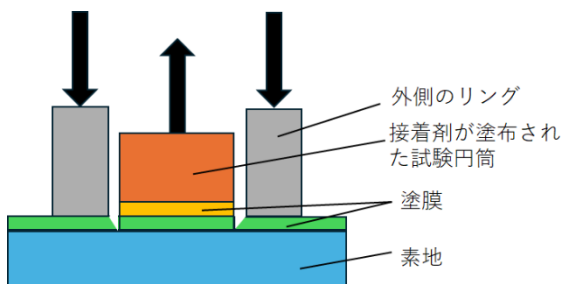


図4 プルオフ法のイメージ⁽⁶⁾

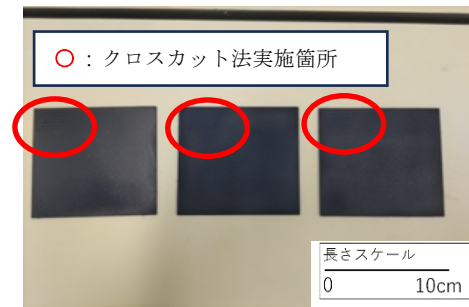


図5 クロスカット法の結果

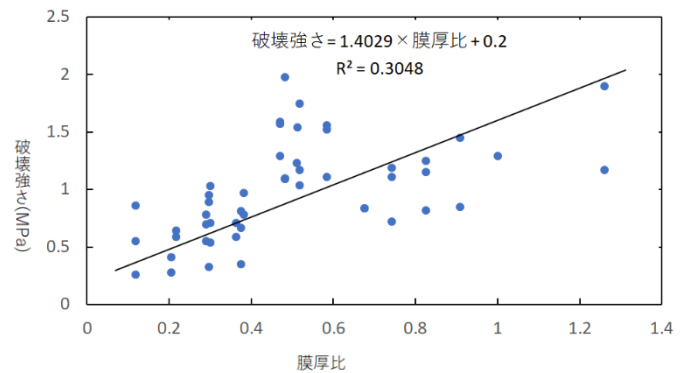


図6 膜厚比と破壊強さの校正曲線

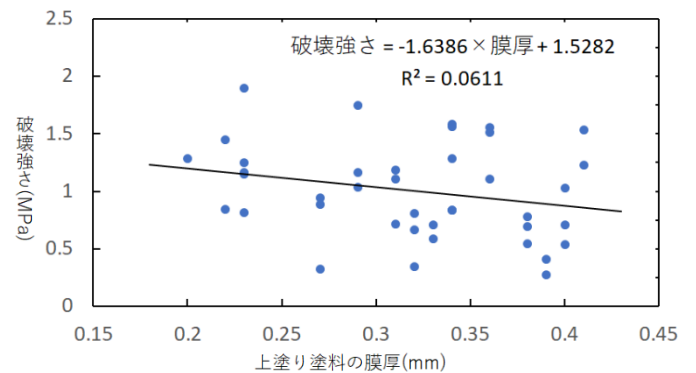


図7 上塗り塗料の膜厚と破壊強さの校正曲線

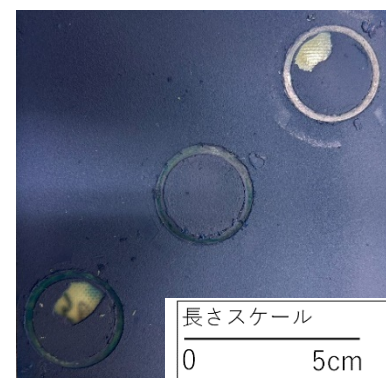


図8 船底塗料を塗装した試験片のプルオフ法結果

2.3.2 t検定

塗装後膜厚を測定し、測定した膜厚の精度を検討するため、t検定を行う。有意水準を0.05と設定して計算した。実施したt検定は、上塗り塗料の膜厚を比較した検定と、3パターンの下塗り塗料膜厚を

比較した検定である。上塗り塗料の膜厚は、同一と判断できる膜厚であること。下塗り塗料の膜厚は、各パターンで異なると判断できることを確認する。

2.3.3 クロスカット法

t 検定によって膜厚の差異を確認できた塗装に対して、クロスカット法を行う。試験を行う場合は、室内で行い、室温は20-25度とし、湿度は45-55%で行う。本実験の塗装パターンは、船舶への応用に向けて、下塗りより上塗り塗料膜厚が厚いため、クロスカット法により剥がれないことを確認する。

2.3.4 プルオフ法

3つのパターンの試験片に対して、プルオフ法を行う。クロスカット法同様に、室内で実験を行い、室温は20-25度とし、湿度は45-55%で行う。

2.4 実験結果

2.4.1 t 検定

3パターンの塗装方法におけるそれぞれの上塗り塗料膜厚に対して、t 検定を実施した(80×160, 160×240, 80×240)。結果、p 値は0.960821であり有意水準0.05で有意差が無い結果を得られた。同様にそれぞれの下塗り塗料膜厚に対してt 検定を実施した結果、80×240のp 値は0.0000624であり有意水準0.05で有意差がある結果を得られた。t 検定の結果から、上塗り塗料は有意差が無いため、同等の膜厚で塗装ができています。下塗り塗料は有意差があるため、膜厚差があることが示された。

2.4.2 クロスカット法

t 検定により膜厚に有意差が得られた試験片に対して、クロスカット法を実施した結果、ほとんどの試験片で評価0となり、塗料が剥離しなかったことを示す(図5)。結果から、船底塗料のみを塗装した際と同様の付着力があることを示すことができた。

2.4.3 プルオフ法

プルオフ法から得られた全ての測定値から、膜厚比と付着力の校正曲線を作成した結果、膜厚比の上昇に伴い、付着力が上昇することが示された(図6)。また、膜厚比0.5程度であった試験片の破壊強さが、相対的に高い結果となった。これは、重ね塗りを行ったことによる特異な現象の可能性はある。

上塗り塗料と破壊強さの校正曲線により、膜厚の変化と破壊強さに相関がなく、上塗り塗料の膜厚は、付着力に影響が無いことが示唆された(図7)。

校正曲線から、膜厚比が高いほど付着力は上がる。これまでの研究結果から上塗り塗料より下塗り塗料が厚いと剥がれやすいこと⁽³⁾。上記2点から、膜厚比は0.8-1.0付近が適切だと考察できる。また、膜厚比0.5付近で強い付着力がみられることから、0.5付近も適切である可能性が考えられる。

また、船底塗料のみを300µm塗装した試験片でプルオフ法を行った場合、全試験片の塗膜が凝集破壊された。このことから、本研究で提案した重ね塗りにより、特殊な剥離現象を生じさせられていることを示している(図8)。

3. まとめ及び今後の展望

本研究では、船底塗料剥離作業の効率化を目指して、2種類の塗料を用いた膜厚調整による付着力調整を行う方法を提案した。付着力が調整できていることを示すため、まず、t 検定によって膜厚の精度を検討したところ、狙い通りのパターンで膜厚を調整できることを示せた。次にクロスカット法では、ほとんどの試験片で塗料が剥離しなかった。そのため十分な付着力があることを示すことができた。プルオフ法では、膜厚比の増大に伴い付着力も上昇することが示された。また、付着力は上塗り塗料の影響を受けづらく、下塗り塗料の膜厚に依存していると考察できる。

今後提案する塗装方法を応用するためには、クロスカット法により、一般的な船底塗料と同様に、剥がれないという評価が得られた試験片に対して、実証実験を行うことで、実際の船舶に対して長期間安心して利用できることを示すことができる。

特に、本研究で示すことができた校正曲線から得られた、膜厚比0.5付近あるいは0.8-1.0付近の提案した塗装法を実施したFRP試験片に対して、実証実験として、日射に対する耐性や海中での経過観察を行う必要がある。

4. 参考文献

- (1) 内田誠:船舶推進性能に及ぼす表面汚損の影響:日本マリンエンジニアリング学会誌, 40.1, pp.10-11, 2022.2.
- (2) 船底防汚塗料:中国塗料株式会社 https://www.cmp.co.jp/products/cmp_tech/antifouling_coatings.html#antifouling_coatings, 2022.2.
- (3) J.SATO, H.MURATA: Improvement of Stripping Ship Bottom Paint Efficiency by Adjusting Adhesion Strength of Ship Bottom Paint, KRIS2023, E-0-5-1, 2023.3.
- (4) 中原・廣畑・豊嶋・小西:鋼橋高力ボルト継手部に対する加熱装置による塗膜剥離の適用性検証:鋼構造論文集, 28.111, pp.51-62, 2021.9.
- (5) 水系ストリップابل:大洋塗料株式会社, <https://www.taiyotoryo.co.jp/industrial>, 2023.2.3.
- (6) Seajet033:中国塗料株式会社, <https://www.cmp.co.jp/PDF/brochure/seajet033.pdf>, 2023.2.3.
- (7) 日本規格協会:JIS ハンドブック 30 塗料 2021, pp132-135, pp305-312, pp313-321, 2023.2.3.

大型客船の出入港安全基準に関する研究

-その場回頭の検討-

学生会員○大野 遼太郎（神戸大学） 正会員 世良 亘（神戸大学）

要旨

本研究では大型客船専用の出入港に係る安全基準の策定を最終目標とし、MMG モデルのシミュレーション結果から出入港操船の各種要素における外力の影響について調査を行う。前報⁽¹⁾では港内操船における「横移動」について検討を行い、本発表では供試船の「その場回頭」の性能と風による影響について報告を行う。

実験結果より、その変化によるその場回頭の可否の傾向と、その場回頭運動へ与える影響を確認した。
キーワード：操船技術、港内操船、船舶性能、操縦性能

1. 背景・目的

大型客船は受風面積が大きく、水線下の面積が小さいという構造的特徴から外力の中でも特に風の影響が大きい。また近年では大型化が進んでいるということもあり、寄港の際は航行安全性の検討が必要である。

しかし、大型客船の出入港における操縦性能に関する基準というものは未だ見受けられないのが現状である。そこで本研究では大型客船の出入港安全基準の検討を行うために、供試船のその場回頭性能とその外力影響について定量的評価を行うことを目的とする。

2. 実験方法

2.1 基本要素シミュレーション

本研究では、船舶の出入港における「直進航走」「旋回」「行き脚制御」「横移動」、そして港内泊地の回頭円内で180度の回頭を行う「その場回頭」の5つを基本要素とし、MMG モデルを用いたFTS(Fast Time Simulation)で船体運動シミュレーションを行う。これを「基本要素シミュレーション」とし、本発表ではこれら基本要素のうち、「その場回頭」について検討を行う。

2.2 シミュレーションの設定

表1にシミュレーションを行う供試船の主要目を示す。4隻の供試船の推進器種は、2軸2舵とPod推進器を装備している船舶がそれぞれ2隻ずつとなっている。

シミュレーションにおける外力等の設定については次に示すとおりである。

風速は10[m/s]から15[m/s]の計6ケースとし、突風率1.5の変動風でシミュレーションを行う。風向について船首方向からの風を0[deg]とし、時計回りに15[deg]毎に計24ケースを実施した。また潮流については、出入港操船は防波堤内の港内で行うことを想定し、無しとする。

水深は各供試船の満載喫水に余裕水深としてその10%を加えた値とする。

その場回頭を行うための推力は、2軸2舵船においては船首尾に備えられた両スラストのみとし、Pod推進器を装備した船舶については船首スラスト及びPod推進器を横推力のみで用いるものとする。スラストの出力は安全マージンを考慮し、最大出力の80%をFullとする。Pod推進器の出力は港内モードを想定し、出力の上限を10,000[kW]とする。

表1 供試船の主要目

船名	総トン数(GT)	全長[m]	満載喫水[m]	正面風圧面積[m ²]	側面風圧面積[m ²]	スラスト出力(船首)[kW]	スラスト出力(船尾)[kW]
2軸2舵船 A	7万総トン級	252.91	8.20	1,263	7,751	5,100	3,400
2軸2舵船 B	11万総トン級	288.33	8.57	1,531	10,800	6,600	5,160
Pod 船 A	13万総トン級	311.12	8.80	1,886	11,047	12,000	
Pod 船 B	16万総トン級	348.00	8.80	1,785	14,620	14,000	

2.3 その場回頭の可否の判別

その場回頭を行えているか否かの判別は、船首方位が180度変化した時点で全長の2倍(2L)の直径の回頭円の中に入っているか否かで判別を行う。

図1に示すシミュレーションの一例において、左図は赤丸で示す回頭円内でその場回頭を行えているが、右図は回頭円外へ船体が進出しているため、その場回頭不可と判別する。

3. 実験結果

図2に各供試船、各風向のシミュレーションにおいて、その場回頭を実施することが可能であった最大の風速を示す。なお図中の風速は、右回頭と左回頭を行った結果、少なくともいずれかでその場回頭を行うことが可能であった風速を示している。

2軸2舵船A(図中●)は風向が正船首方向である0[deg]から左右に45[deg]の範囲で、風速10[m/s]においても回頭円内でその場回頭を行うことができなかったため、追加でシミュレーションを実施し、その場回頭が可能である最大の風速を求めた。

2軸2舵船B(図中■)も同様に風向が0[deg]付近でその場回頭を行うことができないケースが多かったものの、全ての風向で10[m/s]の風圧下でも回頭円内でその場回頭が可能であった。

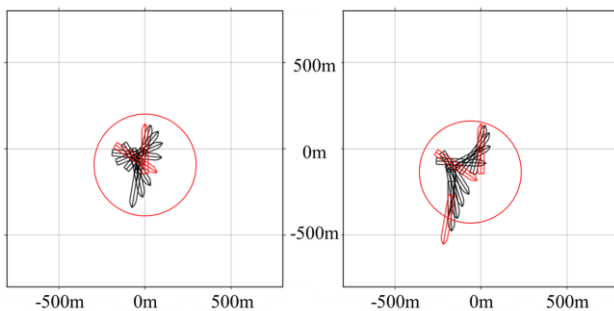


図1 風向45[deg]のシミュレーションの一例
(左図：風速10[m/s] 右図：風速15[m/s])

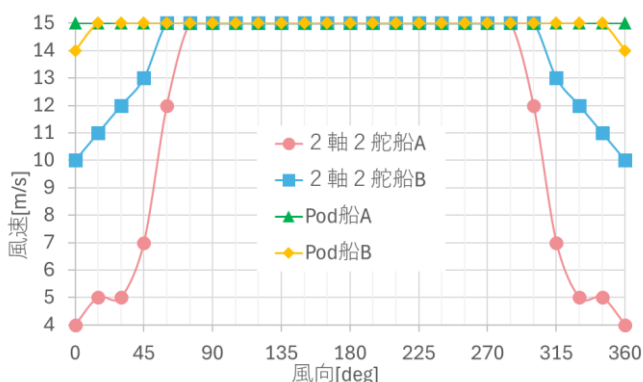


図2 実験結果

Pod 船 A(図中▲)は全てのケースで、Pod 船 B(図中◆)は正船首方向からの風速15[m/s]を除いた全てのケースで回頭円内でのその場回頭が可能であった。

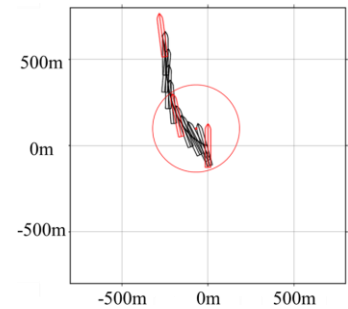


図3 風速15[m/s]、風向90[deg]の実験結果

4. 考察

4.1 風速がその場回頭に与える影響

風圧下において回頭円内でその場回頭を行うためには、船体が風下側へ押し出される前に180[deg]の回頭を行う必要がある。そのため、船自身が持つ回頭するための推力の大きさと、その抵抗として働く船体の大きさのバランスが重要であると考えられる。

4.2 風向がその場回頭に与える影響

実験結果では、開始時が船首方向付近の風向でその場回頭を行うことができないケースが増加した。その多くは、船体の前後では前方向の水抵抗が小さく、回頭後半に船首が風下に向く時に移動が大きくなるためと考えられ、主機で前後位置の修正ができれば回頭可能である。

また、一部のケースで回頭が途中で止まり、微速で前進するケースを確認した。図3に一例を示す。これは、スラスト等による推力が風上への切り上がりモーメントを下回り、両者が釣り合う点で前進してしまうためである。回頭推力の不足が原因で、操船手法に関わらず回頭不可となる領域である。

5. まとめ

本研究は大型客船の操縦性能に関する出入港安全基準の策定を目標とし、本報では供試船のその場回頭の性能と風圧影響の確認を行った。

実験結果より、風向と風速の変化によるその場回頭の可否の傾向と、推力不足による回頭ができない領域の存在を確認した。

今後は、対象船舶の主要目からその場回頭の性能を判別可能な式について検討を行う。

6. 参考文献

- (1) 大野遼太郎, 他: 大型客船の出入港安全基準に関する研究-I., 日本航海学会論文集, Vol. 139, pp. 86-91, 2018. 12.

LSTM モデルを用いた LNG 船スポット運賃決定要因に関する研究

学生会員○金 俊成（東京海洋大学） 正会員 渡部 大輔（東京海洋大学）

要旨

液化天然ガス（LNG, Liquefied Natural Gas）船のスポット運賃は国際情勢や季節的要因など、様々な外部変数の影響を受けており、これにより運賃の変動性が増大している。このような運賃の変動性を予測するために、市場データに基づき LNG 船のスポット運賃に影響を与える主要因子を特定し、時系列データの予測に強みを持つ長・短期記憶（LSTM, Long Short-Term Memory）モデルモデルを選択して運賃の予測を行った。変数として、LNG 在庫量、LNG 価格、LNG 船の新造船価格、LNG 船の運航速度、寄港回数、そして LNG 船の運賃などを用いてデータを分析し、LSTM モデルを通じて学習した。この際、LNG 在庫量、LNG 価格、LNG 船の運航速度、寄港回数を含む変数の組み合わせが運賃の変動性予測に最も効果的であることが確認された。これは、該当する変数が LNG 船の運賃決定に大きな影響を与える決定的な要因であることを示唆している。また、LSTM モデルは約 250 回の学習後に平均二乗誤差（MSE, Mean Squared Error）が安定化することが観察され、様々なパラメータを組み合わせることでパターンを十分に学習し、予測精度を向上させることができる組み合わせを考察した。

キーワード：海運・物流、LNG 船スポット運賃予測、運賃決定要因、LSTM モデル

1. 研究の背景と目的

環境にやさしいエネルギー源としての天然ガスの需要が増加するにつれて、天然ガスを大量に輸送するための液化天然ガス（LNG, Liquefied Natural Gas）船の需要も増加している。しかし、LNG 船の供給は限られており、国際情勢や季節的要因などの外部の影響を受けやすいため LNG 船のスポット運賃は大幅に変動している。⁽¹⁾ このように天然ガス需要は増加しているが、LNG 船は発注から引渡しまで約 3 年の時間が必要なため、船台編成にも困難が大きく、LNG 船スポット運賃の変動性が大きくなる可能性があるため、運賃予測が必要である。

本研究では、LNG 船のスポット運賃をより正確に予測するために、既存の研究と市場データを調査し、スポット運賃に影響を及ぼす要因を特定する。そして、特定された要因に基づきデータを収集し、時系列データ予測に強みを持つ長・短期記憶（LSTM, Long Short-Term Memory）モデルを用いて運賃を予測する。LSTM モデルを選択した理由は、このモデルが複雑な時系列データからパターンを学習し、長期依存性を処理する能力に優れているからである。⁽²⁾ 最終的に、モデルを通じて得られた結果を分析し、LNG 船のスポット運賃に最も大きな影響を及ぼす決定要因を導き出し、これを通じて運賃予測の精度を向上さ

せる方策を検討する。

本研究の目的は以下の二つである。第一に、LNG 船のスポット運賃決定要因をデータに基づき客観的に分析することであり、これにより海運業の不確実性を減少させ、リスク管理を強化できることが期待される。第二に、運賃予測の精度を高め、天然ガス運送市場の不透明性を減少させ、政策的な示唆を導き出すことである。

2. 先行研究

海運運賃は多様な外部要因によって影響を受け、その複雑性から運賃予測には困難が伴う。このような海上運賃に影響を与える要因を分析するため、いくつかの研究が行われている。Lyridis V. (2022) は、SHAP (Shapley Additive Explanations) モデルを利用して、LNG 備船価格に影響を及ぼす主要な要因を導き出し、備船料を予測する研究を行った。LNG 船の容量、需要と供給、販売価格、運搬距離、そして LNG 市場の経済的状況が備船料に影響を与える要素として選定された。⁽³⁾ さらに Wang, X. (2024) は、建造貨物市場における海運ネットワークの影響を分析し、運賃に及ぼす影響について研究を行った。この目的のため、船舶自動識別装置（AIS, Automatic Identification System）データと Panel Vector

Autoregression (PVAR) モデルを活用して、海運ネットワーク特性と貨物料金間の相互作用を分析した。この研究を通じて、海上運賃は港間の連結性、市場の需要と供給の変化、経済状況、政策の変化、世界的な事件の発生といった要因によって影響を受けているとの結論を導き出した。⁽⁴⁾ Chen, Y. (2025)は、コンテナ船の AIS データにグレイ関連分析 (Gray Incidence Analysis) モデルを適用し、コンテナ船の運賃指数の予測を試みた。また、コンテナ運賃は、船舶の運送容量および需要、船舶燃料油価格、経済状況、政府規制、および国際情勢の影響を受けて変動する可能性があるとして説明した。⁽⁵⁾ 海運運賃を予測するために多様なモデルが活用されている中で、非線形的な関係や複雑なパターンを学習できる能力に優れるニューラルネットワークが良い予測結果を出している。Xiao, W. (2021)は、中国の CBCFI (China Coastal Bulk Coal Freight Index) 指数の予測精度を向上させるために、LSTM モデルにアンサンブル学習アルゴリズムを組み合わせたハイブリッドモデルを使用した研究を行った。この LSTM モデルは、CBCFI の日次、週次、月次の傾向を効果的に予測し、他のモデルに比べて優れた性能を示した。⁽⁶⁾

3. LNG 船のスポット運賃決定要因選定

本章では、まず、LNG 船のスポット運賃に影響を与える要因を導き出すために、先行研究で分析された決定要因の中から LNG 船の運航特性を反映できるものを選定する。また、データを学習して検証するためには、少なくとも5年間のデータが蓄積されている要因を選定する。最終的に選定した LNG 船運賃の決定要因とその選定理由は次のとおりである。

3.1 LNG 在庫量(図 1-(a))

- 出典：エネルギー・金属鉱物資源機構（日本）
- 期間：2013年1月1日～2024年1月31日
- 種類：週次データ（単位：MT）

LNG 在庫量は天然ガスの市場需要を反映しており、需要が高い場合、在庫が不足して運賃が上昇する傾向が見られる。図 1-(a)は、季節的な影響による変動を示している日本の LNG 在庫量をグラフ化したものである。

3.2 LNG 価格(図 1-(b))

- 出典：国家エネルギー統計情報システム（韓国）
- 期間：2008年1月4日～2024年2月2日
- 種類：週次データ（単位：\$/MMBtu）

LNG 価格変動は運賃に大きな影響を及ぼし、特に

長期的な経済状況と市場の需要変化を反映している。

3.3 LNG 船の新造船価格(図 1-(c))

- 出典：Clarksons Research
- 期間：1996年1月5日～2024年2月16日
- 種類：週次データ（単位：\$m）

新造船価格は運賃と長期にわたる予測需要が高い場合に上昇する傾向にあり、運賃予測における重要な経済的要因の一つである。

3.4 LNG 船の運航速度(図 1-(d))

- 出典：Clarksons Research
- 期間：2018年1月1日～2024年2月17日
- 種類：日次データ（単位：knots）

LNG 船の運航速度は市場の需要を間接的に示す要因である。図 1-(d)は、LNG 船の週次平均速度を示したグラフであり、需要が多い冬季に平均速度が高くなることが確認できる。

3.5 LNG 船の寄港回数(図 1-(e))

- 出典：Clarksons Research
- 期間：2019年1月1日～2024年2月17日
- 種類：日次データ（単位：回）

寄港回数は LNG 船の路線多様性と市場の需要を示し、市場需要に対する反応と運賃設定に重要な影響を与える。

3.6 LNG 船のスポット運賃(図 1-(f))

- 出典：Clarksons Research
- 期間：2010年12月17日～2024年2月16日
- 種類：週次データ（単位：ドル/1日）

LNG 船のスポット運賃は市場の供給と需要、経済的要因、運営費用など多様な要因の影響を総合的に反映した結果である。本研究では、国際運送に最も多く使用されている「160K」の運賃を対象としている。ここで「160K」とは、LNG 船の貨物タンクの貯蔵容量を指し、16万立方メートルの容量を示している。

このように収集したデータを研究に使用するため、次のような過程で前処理を行った。第一に、すべての要素を含む2019年1月1日から2024年2月2日までのデータを対象期間として設定した。第二に、データ周期が異なる LNG 船の運航速度と寄港回数については、日次データから週次平均値を算出し、週次データに変換して研究に使用した。第三に、このように準備したデータは、訓練用データと検証用データを8:2の比率で分けて使用した。図 1 は、前処理過程後の各要因をグラフで示している。

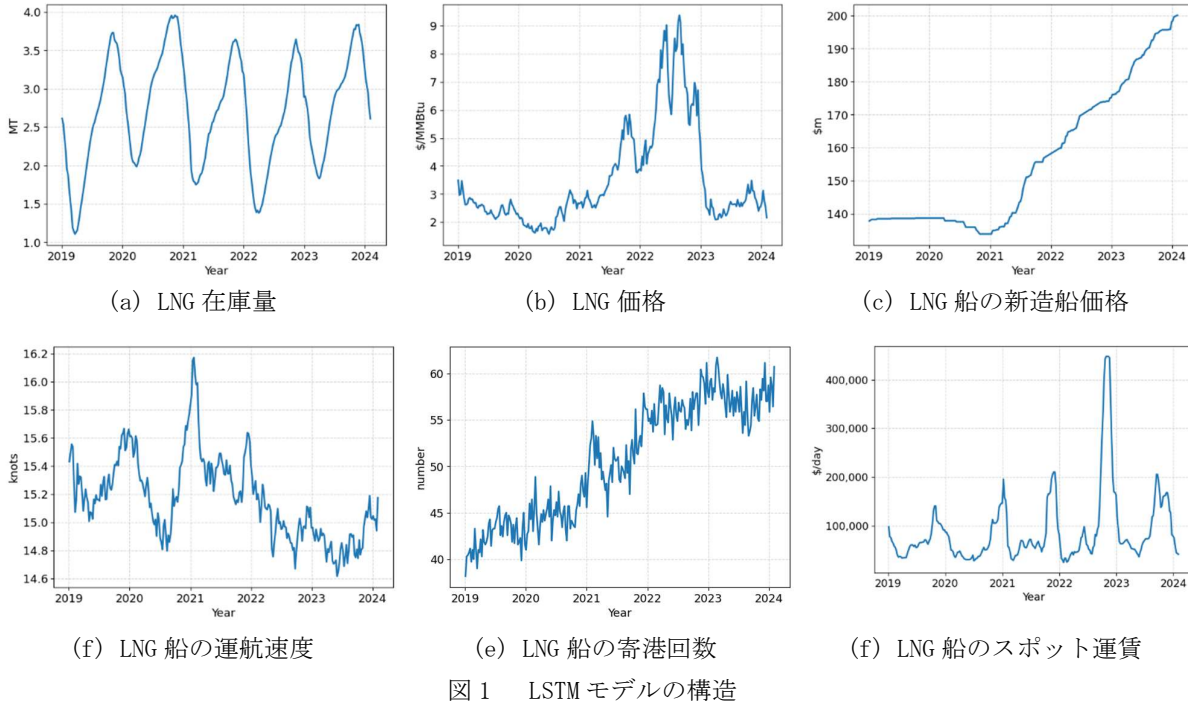


図1 LSTMモデルの構造

4. LNG 船運賃予測

4.1 長・短期記憶 (LSTM) モデル

本研究では、LNG 船の運賃を予測するために長短期記憶 (LSTM, Long Short-Term Memory) モデルを使用した。LSTM モデルは回帰型ニューラルネットワーク (RNN, Recurrent Neural Network) の一種であり、RNN を使用する際に発生する長期にわたる学習期間と誤差の増加、いわゆる長期依存性問題 (Long-term dependencies) を解決するために開発された。⁽⁷⁾ LSTM モデルは、様々な要因を用いた多変量分析において優れた性能を示し、他の運賃予測モデルでも広く使用されている。

LSTM モデルは複数の LSTM セルで構成されており、図 2 では 1 つの LSTM セルの構造を示している。各セルは、ネットワークの以前の状態から受けた情報と現在の入力に基づき、出力を生成する。各 LSTM セル内部は、次の 3 つのゲートで構成される。

- 入力ゲート (Input Gate, i_t) : 新たに取り入れる情報をどのようにセル状態に反映するかを決定する。
- 忘却ゲート (Forget Gate, f_t) : 以前のセル状態の情報をどの程度保持または消去するかを決定する。
- 出力ゲート (Output Gate, o_t) : セル状態の値を直接出力として使用せず、出力がどれほど重要かを調節してから出力する。

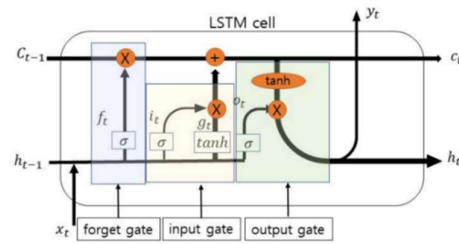


図2 LSTMモデルの構造⁽⁷⁾

LSTM モデルは、図 2 の過程のように、時系列データの各時点での入力 (C_{t-1}) を受け取り、処理する。このプロセスにおいて、以前の時点の出力と現在の時点の入力を組み合わせ、次の状態の出力 (C_t) を生成する。この方法を通じて、時間的に離れたデータ間の関係を効果的に学習することが可能である。

4.2 LNG 船運賃予測モデル適用及び結果

第 3 章で選定した運賃決定要因を一つずつ組み合わせて運賃予測を行い、組み合わせごとに検証を通じてモデルの予測性能を平均二乗誤差 (MSE, Mean Squared Error) の指標を用いて評価する。MSE を最小にするような予測は最適予測といわれる。⁽⁸⁾ また、ハイパーパラメータチューニングを通じて、表 1 のように最適なパラメータを求めた。エポック (epoch) 数は 500 回に設定されたが、約 300 回以降 MSE 値が一定になり、モデルがデータを十分に学習して安定化された状態に達したと判断した。

表1 LSTMモデルのハイパーパラメータ

項目	ハイパーパラメータ
隠れ層のユニット数	4
学習:検証	8:2
エポック(epoch)数	500
バッチサイズ	332
最適化アルゴリズム	Adam

実験の結果、LNG在庫量、LNG価格、LNG船の運航速度、寄港回数を組み合わせた予測結果のMSE値が最も小さく、図3のグラフでも精度が最も高いことが分かった。これは、これら4つの要因が運賃の変動において最も重要な要因であることを示唆している。一方、LNG新造船価格要因を含む場合、予測結果のMSE値がより大きく、予測精度も低下し、運賃との関連性が低いことが分かった。これは、LNG船への需要増加に伴い新造船の価格も図1-(c)のように増え続けていることから、運賃に直接的な影響を与える要因ではないと考えられる。

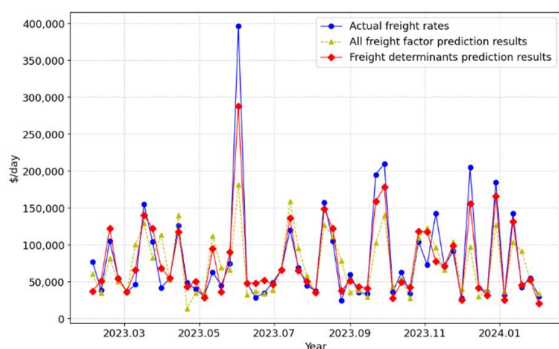


図3 LSTMモデルの運賃予測結果

図3では、青色の線が実際の運賃を、緑色の線が第3章で選定した全ての要因を用いて予測したスポット運賃の結果を、そして赤色の線が最も優れた予測性能を示した要因の組み合わせによる予測結果を示している。実験を通じて分かったLNG船の新造船が要因を除いた組み合わせが良い性能を示すことが確認できる。

5. 結論

本研究では、LNG船のスポット運賃に影響を与える要因を特定し、LSTMモデルを活用して運賃を予測した。各運賃決定要因を組み合わせることで予測性能を評価した結果、LNG在庫量、LNG価格、LNG船の運航速度、寄港回数を含む組み合わせが運賃予測に最も

大きな影響を及ぼすことが分かった。本研究を通じてLSTMモデルを利用したスポット運賃を予測し、LNG船の運賃に影響を与える要因をデータに基づいて考察したということに意義があると考えられる。

今後の課題として市場の多様な変動要因を考慮するため、さらに広範囲なデータを活用し、モデルパラメータの最適化を進めることで予測モデルの精度を向上させることが期待される。

参考文献

- (1) International Group of Liquefied Natural Gas Importers: Global LNG trade market trends, <https://giignl.org/knowledge-center>, 2024.3.13.
- (2) Wei, D., Wang, B., Lin, G and Liu, D.: Research on Unstructured Text Data mining and Fault Classification Based on RNN-LSTM with Malfunction Inspection Report, *Energies*, vol.10, no.3, pp. 406-428, 2017.3.21.
- (3) Lyridis, V.: Spot charter rate forecast for liquefied natural gas carriers. *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, no. 9, pp. 1270-1286, 2022.9.8.
- (4) Wang, X. and Wang, W.: Study on the Maritime Trade Pattern and Freight Index in the Post-epidemic era Evidence Based on Dry Bulk Market AIS Data, *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, vol. 40, pp.1-10, 2024.3.1.
- (5) Chen, Y., Feng, A. and Shen, S.: Forecasting the Containerized Freight Index with AIS Data, *Journal of Forecasting*, vol. 43, no. 3, pp.802-815, 2024.1.3.
- (6) Xiao, W., Xu, C., Liu, H. and Liu, X.: A Hybrid LSTM Based Ensemble Learning Approach for China Coastal Bulk Coal Freight Index Prediction. *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2021, pp. 1-23, 2021.5.26.
- (7) Hochreiter, S. and Schmidhuber, J.: Long Short-Term Memory, *Neural Computation*, vol. 9, no. 8, pp. 1735-1780, 1997.11.15.
- (8) 沖本竜義: 経済・ファイナンスデータの計量時系列分析, p. 58, 朝倉書店, 2010.

折りたたみコンテナの集積個数とトレーラおよびコンテナの待機時間との関連性に関する考察

正会員○新谷 浩一（東海大学） 正会員 永岩 健一郎（鹿児島高専）
非会員 高嶋 晃琉（神戸大学大学院生(研究当時東海大学学部生)）

要旨

本研究では、折りたたみコンテナ(折りコン)の導入により、空コンテナの集積が可能となり、それに伴ってトレーラの生産性を向上できるかを検証する。その生産性は、折りコンの集積個数とトレーラの待機時間(WT)が密接に関連していると考えられる。前者は、空の折りコンが積み重ねられた段数を指し、後者は、空コンテナが折りコンの集積個数と同数になるまでのトレーラの待ち時間を示す。簡略化したネットワークを想定し、確率的シミュレーション手法を用いて、定量搬出と定期搬出の2つの搬出方法を比較する。数値実験の結果、トレーラの台数とWTとの間にトレードオフが存在し、定量搬出が有効であることが示された。

キーワード：海運/物流、コンテナ輸送、空コンテナの回送、折りたたみコンテナ、インランドデポ

1. はじめに

現在、日本国内のコンテナ輸送において、トレーラ(以下、車両と呼ぶ)と運転手の不足が深刻化している。この問題に対処するために、空コンテナ(以下、空コンと呼ぶ)の回送についても根本的な対策が求められる。折りたたみコンテナ(以下、折りコンと呼ぶ)の導入は、物流効率化の観点から有望視されている。折りコンは空の状態では一定数を折りたたんで集積することで、元のコンテナ1個と同サイズとなり、標準コンテナ(以下、標準コンと呼ぶ)と同様に輸送、保管、荷役が可能である。この一定数のことをNTと呼ぶことにする。しかし、例えば物流結節点において、空コンの搬出車両が到着した後に折りコンを集積する場合、NTと同数になるまで、車両やコンテナの待機時間(以下、WTと呼ぶ)が発生する。NTが大きくなると、両方のWTもそれに比例して大きくなると考えられ、これは車両の生産性の低下だけでなく、コンテナの流動性の低下も引き起こす可能性がある。つまり、両方のWTは折りコン導入の実現可能性に影響を及ぼすと考えられる。しかし、既往研究⁽¹⁾⁻⁽³⁾では、折りコンを使用した車両による回送において、NTと両方のWTの関係を明示的に扱っていない。

そこで本研究では、単一の inland デポ(以下、IDと呼ぶ)を経由した車両による空コン回送を想定し、NTの大小に応じた車両の必要台数と両方のWTとのトレードオフを明らかにし、効率的な車両の運用方法を算出する。具体的には、確率的シミュレーションを行い、車両台数や両方のWTを比較する。

2. シミュレーションモデル

現在、折りコンは海運市場で試験的に運用されている状態で、本格的な導入には至っていない。したがって、折りコンの運用に関する実測データの入手は困難であり、現在まで折りコンが車両の生産性に与える影響の分析方法は確立されていない。その状況の中で、本研究では、一般的な待ち行列理論に基づく確率的シミュレーションを実施するため、Python 言語の離散イベントシミュレーションライブラリである SimPy⁽⁴⁾を採用する。そのため、シミュレーションについて以下に述べる前提は設けるが、通常の待ち行列理論を反映したモデルを構築する。

2.1 前提条件

以下の前提条件のもとに本モデルを構築する。

- (i) 本モデルの範囲は、輸入荷主からIDへの空コン搬入と、IDから輸出荷主への搬出に限定される(図1)。ただし、ID内での空コンの検査や荷役、折りコンの折りたたみや集積作業にかかるサービス時間は考慮しない。
- (ii) IDに到着した空コンは、IDの稼働時間内に全て搬出される。折りコンを使用する際、稼働終了時刻に空コンの待機数がNT以下の場合、それと同数の車両で空コンを搬出する。
- (iii) 空コンのIDへの到着時間間隔は、所与の指数分布に従い、単位時間あたりの到着数は、ポアソン分布に従う。
- (iv) 各車両は同じ性能を持ち、常に1台がIDに待機し、空コンを搬出できる状態である。つまり、搬出時の車両は、先発の車両が搬出する

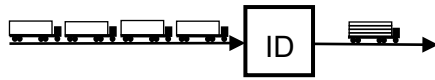


図1 本モデルの対象範囲



図2 可変折りコンの構造

と同時に到着するものとする。

- (v) 20 フィートコンテナのみを考慮する。
- (vi) 使用するコンテナは、標準コンと折りコンの2種類に分かれる。折りコンのデザインはNTが3~6個の4つの設定を考慮する。さらに、折りコンは標準折りコンと可変折りコンの2つに分類される。標準折りコンは、従来の折りコンデザインで、IDでの待機数がNTの倍数に満たない場合、集積した状態での搬出は行われない。一方、可変折りコンはSTAXXON社⁽⁵⁾が開発した折りコンと同様の構造を持つ。側壁の間隔を調節することで、2~NT個の空コンを集積して1個のコンテナに仕立てることができ、そのため可変折りコンは直ちに搬出可能である。

2.2 シミュレーションモデルの構築

(1) モデルの構造

本モデルは、イベント駆動型確率的シミュレーションに分類される。この種のシミュレーションでは、初期状態から始まり、シミュレーション内で発生するイベントは順次処理される。シミュレーションのステップは、空コンの搬入、折りコンの折りたたみ・集積、空コンの搬出といったイベントにもとづいて進行する。タイムスタンプの早いイベントから優先的に処理される。シナリオ内の空コンの待機状態や折りコンの状態、およびそれらの変化を追跡し、車両台数と車両およびコンテナのWTを計算し、各シナリオを評価する。

(2) 確率的要素の設定

前提条件(iii)より、空コンが輸入荷主からIDへ搬入されるまでの到着時間間隔は、一定の指数分布に従う乱数により生成される。これにより、現実の

輸送環境における不確実性や変動性をモデルに組み込むことができる。本モデルは現実の状況に則した振る舞いを模擬し、確率的要素の変動を通じて、折りコンのNTや車両の搬出方法の違いを評価できる。

(3) 車両の搬出方法

本研究では、2つの車両の搬出方法を定義する。

1つ目は「定量搬出」である。折りコンを使用する場合、NTと同数の空コン待機がIDにあると、直ちに折りたたまれ、集積されて搬出される。この方法では、同じNTであれば、標準折りコンと可変折りコンの両方のWTは同じ結果となる。

2つ目は「定期搬出」である。車両は一定時間ごとにIDから空コンを搬出する。標準折りコンを使用する場合、NTの倍数個の空コンの待機があると、それらは折りたたまれ、集積されて搬出される。しかし、端数が発生した場合、その端数分の搬出は次期以降に持ち越される。可変折りコンを使用する場合、2~NT個の空コンはすべて折りたたまれ、集積された後、直ちに搬出される。また、1個の場合は、折りたたまれずそのままの状態での搬出される。ただし、端数の折りコンを搬出するため、車両台数が増える。

2.3 本モデルの処理の流れ

図3は、車両の搬出方法(定量搬出/定期搬出)と折りコンのデザイン(標準折りコン/可変折りコン)を考慮した3つのケースの処理の流れを示している。

(1) ケース1: 定量搬出

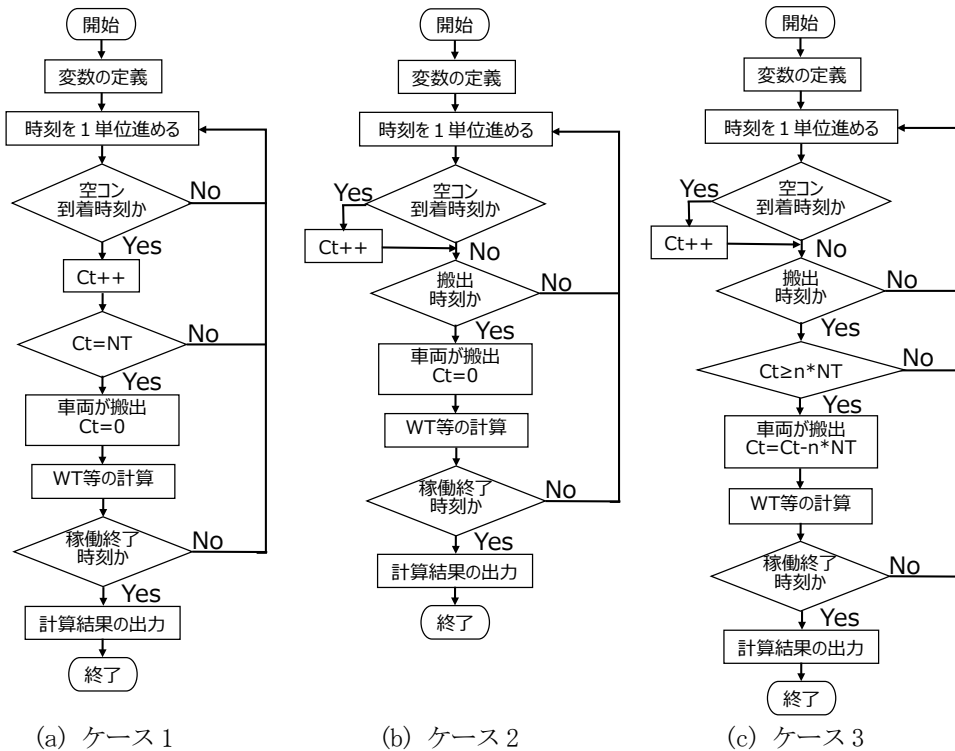
空コンの待機数 C_t とNTが等しい場合、待機コンテナを折りたたみ、集積して搬出する。 C_t は空になり、WT等が計算される。これを稼働終了時刻まで繰り返す(図3(a))。なお、本ケースでは標準折りコンと可変折りコンの区別はない。

(2) ケース2: 定期搬出×可変折りコン

搬出時刻に達すると、 C_t がNTの倍数に満たない場合でも、 C_t を折りたたみ、集積して直ちに搬出する。 C_t は空になり、WT等が計算される。これを稼働終了時刻まで繰り返す(図3(b))。

(3) ケース3: 定期搬出×標準折りコン

搬出時刻に達した時点で、 C_t がNTの倍数以上であれば、NTの倍数と同数のコンテナを折りたたみ、集積して搬出する。端数となったコンテナは搬出されず、IDに留置され、WT等が計算される。これを稼働終了時刻まで繰り返す。つまり、 C_t が端数の場合は搬出せず、次期以降でNTの倍数に等しくなる搬出時刻まで留置される。その後の処理は他ケースと同



Ct: IDにおける待機コンテナ数, NT: 折りコンのNT, n: 整数の最大値

図3 本モデルの処理の流れ

様である(図3(c))。

3. 数値実験

3.1 パラメータ設定

以下に数値実験に使用するパラメータを示す。

- (i) IDの稼働時間: 8時間
- (ii) 折りコンの集積個数(NT): 3, 4, 5, 6
- (iii) 搬出時間間隔(TI): 20, 40, 60(分)
- (iv) 空コンの到着は指数分布に従い、IDへ搬入される空コンの平均個数が6, 8, 10, 12(個/時間)のポアソン分布となるように乱数を生成する。一日の稼働時間8時間における平均到着個数はそれぞれ48, 64, 80, 96個である。そのため、各シナリオのシミュレーションでは、100回の試行を共通の乱数を用いて行い、その平均値を計算結果とする。これにより、解のばらつきに対応する。

3.2 計算結果

(1) ケース1における車両の台数とWTとの関係

図4は、車両台数と車両1台当たりのWTとの間にトレードオフが存在し、これらを同時に減らすのは難しいことを示している。また、1時間当たりの到着コンテナ数(以下、ACと呼ぶ)が少ないほど、WT

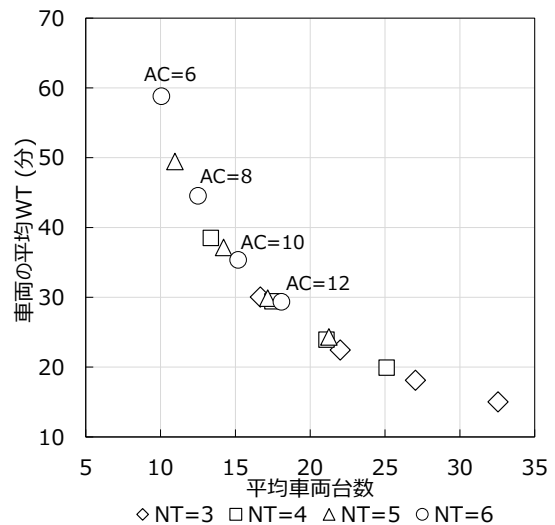


図4 ケース1における車両の台数とWTとの関係

が大きくなる傾向が見られる。例えば、NT=6の折りコンの解は、図内の4つの白丸で表されている。これらの白丸は、ACが6~12の範囲にわたる解を示している。NTが大きくなると、左上に位置する傾向がある。なお、標準コンを使用する場合の車両台数は、各ACの8時間における平均到着個数と同数となる。つまり、AC=12(個/時間)でNT=6の折りコンを使用する場合は16.4台、標準コンの場合は到着する個数と同数の96台(12(個/時間)×8(時間))が必要である。一方、車両のWTは前者29.6分、後者0分である。

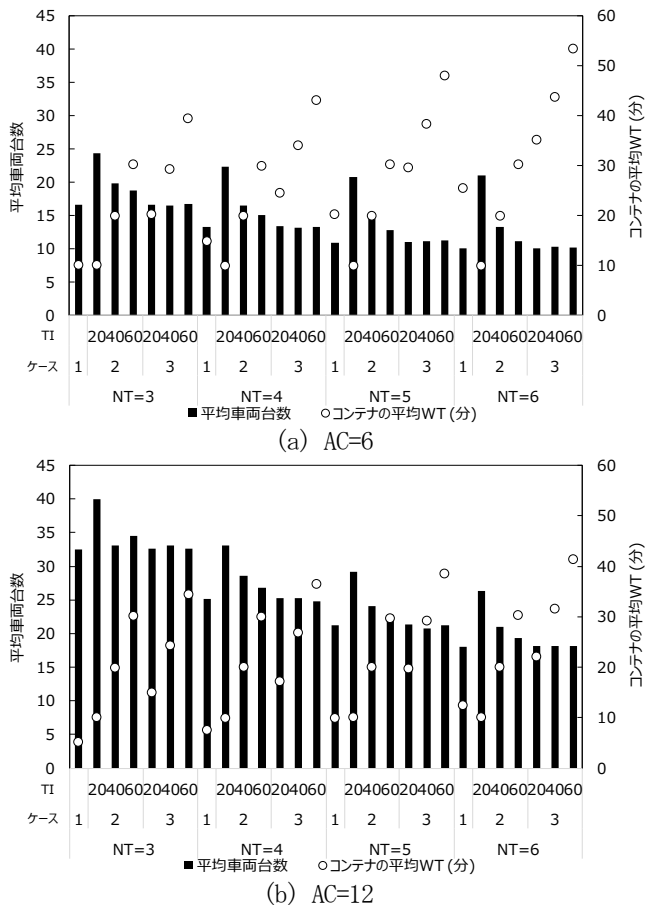


図5 3 ケースの車両台数とコンテナの WT との比較

(2) 3 ケースの車両の台数とコンテナの WT との比較

図5は、AC=6と12の場合の車両台数とコンテナ1個当たりのWTの比較を示している。同図(a)と(b)を比較すると、ACが増えると車両台数が増加する半面、コンテナのWTは小さくなる。この現象は、ACの増加により回送コンテナの総数が増えることに起因している。後者の場合、IDでの待機コンテナ数がNTに達する時間が短縮され、それに伴ってWTが減少する傾向が見られる。ケース1以外では車両台数が増加する一方でコンテナのWTが小さくなる傾向が見られる。これらはトレードオフの関係にある。ケース1は、車両台数を減少させつつ、コンテナのWTを一定程度小さくできることがわかる。また、ケース2の車両台数は他のケースよりも多いが、NTが大きくなってコンテナのWTをほぼ一定水準で維持し、ケース3よりも小さくなる。この理由は、ケース2では可変折りコンは搬出時刻になると、待機コンテナ数がNT未満であっても直ちに搬出されるためである。なお、同図中に標準コンに関する情報が示されていないが、(1)で述べた通り、車両台数は計画期間中の空コン到着数と同数であり、WTは0分である。

4. おわりに

本研究では、折りコンの導入が車両の生産性向上に与える影響を検証した。具体的には、複数の空コン回送シナリオを想定し、車両台数と車両およびコンテナのWTとの間のトレードオフや、効果的な車両の搬出方法を評価した。数値実験の結果、以下の3つの点が明らかになった。

- (1) 定量搬出は折りコン導入による車両の生産性向上に寄与するが、折りコンデザインの可変の有無に関わらず、NTの大きさが主な要因であることが示された。
- (2) 折りコンのNTが大きいほど車両台数の削減は可能であるが、車両やコンテナのWTが大きくなる。そのため、車両台数の削減と同時に、両方のWTを短縮することは困難であることがわかった。
- (3) 定期搬出において、可変折りコンを使用する場合、車両台数の削減には寄与しないが、特にACが少ない状況では、標準折りコンよりも大幅にコンテナのWTを短縮できることが明らかになった。

本研究から、折りコンの導入が国内コンテナ輸送の車両や運転手不足問題の緩和に有効である可能性が示唆された。ただし、折りコン導入に伴う経済的負担との関係の解明が今後の課題である。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP21K04530 の助成を受けたものです。

参考文献

- (1) Zhang, R., Zhao, H., Liu, S.: Modeling and optimization of a drayage problem with foldable containers, *System Engineering Theory & Practice* 38(4), pp. 1013-1023, 2018.
- (2) Zhang, R., Zhao, H., Moon, I. K.: Range-based truck-state transition modeling method for foldable container drayage services, *Transportation Research Part E* 118, pp. 225-239, 2018.
- (3) Shintani, K., Konings, R., Nishimura, E., Imai, A.: The impact of foldable containers on the cost of empty container relocation in the hinterland of seaports. *Maritime Economics & Logistics* 22, pp. 68-101, 2020.
- (4) STAXXON Web サイト: <https://staxxon.com>, 2024. 2. 26.
- (5) SimPy Development Team: Overview SimPy 4.1.1 documentation. <https://simpy.readthedocs.io/en/latest/index.html>, 2024. 2. 8.

修学旅行生が利用した小型旅客船の転覆事故発生時 における避難行動に関する考察

正会員 中山 光成（今治明德短期大学）

要旨

多くの学校等では学校行事として修学旅行や社会科見学等が行われている。こうした活動は日常の学校生活でできないことを体験させ見分を広めることを目的としているもので、海や離島に関する体験、船舶を利用した活動もある。一方で、船舶を利用することで事故のリスクもある。これまでも国内外でフェリー等の旅客船での事故も発生しており、修学旅行生が犠牲になった事故もある。こうした事故を踏まえてフェリー等での大型船では非常設備や整備、避難マニュアルの策定、乗務員に対する教育訓練など様々な対策が進んだ。一方で、死者が出なかった事故について分析した研究はほとんどない。運航距離や時間の短い小型旅客船での事故発生時における避難行動に関する研究もほとんどない。そこで、本研究では修学旅行生が利用した小型船舶の事故について、死者がでなかった事故を取り上げて分析した。

キーワード：事故対応、避難行動、行動分析、教育訓練、成功事例

1. 研究の目的

観光は日常生活から離れ、非日常を体験することもその目的とされる。非日常の体験する方法の一つに船舶を利用し、海からの景色を楽しむことも含まれる。船舶にはクルーズ船や中長距離フェリーなどから、数十分から数時間程度の短時間で景勝地を巡る短時間の航海を体験するものまで多種多様である。一般的に前者はレストランや客室など様々な設備を備えた大型の船舶が利用されるが、後者では、鉄道や飛行機と同様に座席のみの簡素な設備で、船体も比較的小型のものを使うことが多い。

一方、航海は海に慣れていない一般の乗客からは貴重な非日常を体験できるものであるが、万一事故が起きた場合、その被害は大きくなる。2022年4月に北海道で発生した知床遊覧船事故では乗客24人、乗員2人の計26人を乗せた19トンの小型旅客船が遭難し、全員が死亡または行方不明となった。これまでも国内外で旅客船による事故が度々発生している。2023年に発生した国内における船舶事故では、船種別で、全船種に占める旅客船の割合は5%程度であるが⁽¹⁾、旅客船の場合、海や船舶に不慣れな人も多く利用するため避難に手間取り被害が大きくなりやすい。特に児童・生徒、外国人、高齢者などが利用する場合は、事故が発生しても状況が十分に理解できず、避難に時間がかかってより被害が大きくなる可能性がある。また、小型船舶では、大型船と

比べると避難待機できる場所が少なく、より迅速な避難救助が必要になる。

本研究では、19トンクラスの小型旅客船での沈没事故において、修学旅行生が団体で利用した場合の事故発生時の避難行動に着目して分析し考察する。

2. これまでの研究成果

既往の研究では、大型旅客船での事故についての避難行動や安全設備について研究が進んできた。中尾⁽²⁾や三友ら⁽³⁾の研究では、1912年にアメリカで発生した「タイタニック」沈没事故について、多くの犠牲者を出した原因で非常用設備の数が不足していたことや、船長や乗組員からの救難信号の発信や避難開始が遅れたことなどが指摘された。また、避難行動に関して藤原ら⁽⁴⁾は数百人が乗った旅客船で火災が発生した場合の避難行動について分析し、夜間や悪天候などの最悪の状況を想定した場合、避難にかかる時間は約5時間30分であると指摘し、避難の手順や設備についてのさらなる改善が必要だと指摘した。

一方で、沈没事故に至ったものの死者を出さなかった事例から避難行動について中山ら⁽⁵⁾は、数百人が乗船した大型クルーズ旅客船での火災事故のうち多くの死者を出した事故と、船体は全焼、沈没したものの死者を出さなかった事故の避難行動について比較、研究した。その結果、死者が出なかった事

故では、乗務員間で情報を共有し首尾一貫した指示を与えることに加え、状況によっては情報をコントロールして乗客を避難させることも有効であると指摘した。

大型旅客船での事故発生時の避難に関して研究が進んでいる一方で、海上タクシーや遊覧船、近距離フェリー等の小型旅客船での避難に関して分析した研究はほとんどない。小型旅客船は運航時間が数時間以内になる遊覧船や近距離の離島を結ぶ連絡船、海上タクシーなどで用いられることが多く、大型船同様に観光客などの利用もある。大型船に比べると船内構造は単純であるが船内に避難待機場所が少ないなど大型船とは異なる状況になる。小型旅客船での事故発生時の避難行動について研究し安全対策を考える必要がある。そこで本研究では、特に避難が難しい児童の修学旅行生が小型旅客船に乗船した際の避難行動について、成功事例を分析し、どのような安全対策が必要か考察する。

3. 方法

本研究では、2020年11月に香川県坂出市で発生した与島沖旅客船沈没事故での避難行動について取り上げる。運輸安全委員会が公表した事故報告書を基に、事故発生時の状況について、「4M分析」と「人的事故の調査分析マニュアル」を用いて分析する。そして、事故発生時のどのような行動や状況が迅速な避難、救助につながったのかを考察する。

4. 事故の分析

4.1 事故の概要

2020年11月19日午後4時40分ごろ、香川県坂出市与島沖で、高松海上タクシーが運航する旅客船「Shrimp of Art」（19トン）（以下S号とする）が浅瀬に乗り上げて座礁、浸水しその後沈没した。船は坂出市の小学校が修学旅行のクルージング体験のためチャーターしたもので、乗客乗員62人が乗船しており、うち52人は6年生の児童だった。

事故発生後、全員が付近を航行中の漁船や海上保安庁の巡視艇などにより救助され児童やガイドら4人が軽傷を負ったものの死者はゼロだった⁽⁶⁾⁽⁷⁾。事故発生から救助までの詳細は表1で示した。

4.2 事故の分析

4.2.1 4M分析

アメリカ航空宇宙局で4M-4E方式として使われていた事故の要因分析である。4Mはある事故につい

て人的要因（Man）、機械設備的要因（Machine）、環境要因（Media）、管理的要因（Management）の4つのMにわけて分析するものである。本事故において、被害を軽減できた成功要因について以下に示した。

Man

- 船長が船体の異常を認めた後、ただちに救命胴衣着用指示を出して、着用させた
- 乗組員だけでなく、教職員も救命胴衣の着用を手伝い、避難誘導をした
- 迅速に船体の屋根の上に避難した
- 周辺の船舶がスピーカーで1人ずつ順序良く泳ぐように指示をして避難させた

表1 Shrimp of Art 出航から救助までの経過

時間	事象
14:50頃	高松港を出港
16:35頃	船体が何かに衝突し激しい振動
16:40頃	直後に船体への浸水を確認し船長が118番通報
16:40～ 十数分の出来事	乗務員から救命胴衣着用の指示。教職員らも協力し児童に救命胴衣を着用させる
	エンジンが停止。全員が救命胴衣を着用しているのを確認
	周辺で操業していた漁船がS号の異変に気付いて救助に向かう
	客室内の前方で浸水を確認
	教員が前方の児童に最寄りのドアから屋外デッキへの避難指示
	教員らはデッキが狭いため、可能な限り船体の屋根に避難するように指示。児童らが協力して避難
	船長らは救命浮具の準備、扉を閉めるなどの浸水防止措置を実施
	S号周辺に救援にきた船舶が待機する
	船体が沈没する危険があるため、海に飛び込める人は飛び込んで船体から離れるように指示
	救援にきた漁船等が海上に飛び込んだ児童らを救助
乗務員、教員らが船体の屋根で飛び込めない児童とともに待機。	
16:59	日没
17:00頃	海上保安庁の巡視艇が到着し、取り残された児童らの救助を開始
	船体が沈没
17:50頃	海上保安庁や周囲の漁船、貨物船らにより全員の救助が確認される

Machine

- すぐに屋外デッキに出られる構造だった
- 船尾部の屋外デッキに屋根に上る梯子が設置されていた

Media

- 海水温、気温が高く、気象・海象は穏やかだった
- 周囲に他の船が航行しておりすぐに救助できた
- 日の入り前で明るかった

Management

- 乗組員だけでなく、校長、教職員ら周囲の大人も避難誘導に協力した
- 修学旅行前に避難訓練をしており、児童も避難の仕方を習得できていた
- ほとんどの児童は救命胴衣の着用経験があった
- 周囲の船舶と連携して救助できた
- 児童らが落ち着いて秩序を維持して避難できた

4.1.2 人的事故の調査分析マニュアルを用いた分析

「人的事故の調査・分析マニュアル」は日本人間工学会・旧安全人間工学部会で昭和45年に橋本らが作成したものである。この方法は、事故発生前後の状況について時系列、部署別にチャート図に示すことにより、数多くの情報を整理することで、事故発生前後の各部署の行動を整理することができ、事故の状況が分析しやすくなる。この方法は鉄道事故や原発事故など組織事故の分析で使われている。

事故の直接の原因はS号の船長が、岩場の状態を十分に確認せずに航行し船底が浅瀬に接触し破損、その結果船体が浸水、沈没した⁽⁶⁾。

浸水確認後、船長は、沈没する可能性があると考えて直ちに乗客全員に対して救命胴衣の着用指示を出し、すぐに118番通報をして救助を要請した。その際、引率する教員らも救命胴衣を取り出し児童らに配って着用させた。その後、乗組員らと相談し、屋外デッキへと避難させた。その後、周辺を航行中の他の船舶数隻が異常な動きをするS号を発見し、すぐに救助活動を始めた。船内では浸水が進み状況が悪化してきたことから、可能な児童には海に飛び込むように指示、海への飛び込みが難しい児童については船体の屋根での待機を指示した。その結果、児童らも互いに協力し合い避難をして、4人の負傷者は出たが、全員が沈没前に救助され生存できた。

5. 考察

今回の事故では、62人が乗船していた船体が完全に沈没したが迅速な避難行動等が行われ、死者を出さなかった。事故被害を最小限に抑えられた理由に以下の3点が考えられる。

第一に、乗組員だけでなく引率の教職員らが迅速に児童らに対する救命胴衣着用や避難指示、誘導を行ったことである。異音を認め、船内への浸水を確認後、船長や乗組員はすぐに乗客全員に対して救命胴衣を着用するように指示をした。その際、引率していた教職員らは収納スペースから救命胴衣を取り出して児童に配って着用させ、手間取る児童には教員や乗組員が協力して手助けし、着用した人から順次屋外デッキへ避難させた。今回の事故では、子供たちが多く乗船していたが、教職員も船員と一緒に避難誘導に協力した。2014年のセウォル号事故や1955年の紫雲丸事故など過去に発生したフェリー事故では、乗組員らから適切な指示が出ず修学旅行中の児童・生徒らの避難が遅れて多くの被害が出た⁽⁸⁾⁽⁹⁾。今回の事故のように修学旅行等で多くの児童・生徒が利用する船舶では乗組員のみならず引率する教職員等に対しても避難訓練を行うことは必要であると考えられる。

第二に、児童や教職員が救命胴衣の着用の経験があったことも迅速な救命胴衣着用や避難につながったと考えられる。今回乗船していた児童らはほとんどが救命胴衣を着用した経験があり⁽¹⁰⁾、事故発生時、乗組員や教職員から救命胴衣の着用指示が出た後、児童も短時間で着用し、次の行動に移すことができた。もし、救命胴衣の着用経験がない場合は、着用に手間取り適切な着用ができず、それにより混乱が発生し、避難の遅れにつながった可能性もある。こうしたことから、修学旅行等で船舶を利用する場合は児童に対して予め救命胴衣の着用体験をするなど、救命胴衣の正しい着用方法や海中での救助の待ち方を指導しておくことも緊急時の避難には有効であると考えられる。

第三に、事故の数日前に消防や地域と連携した大規模な避難訓練をしていたことである。船舶事故ではなく、学校での地震を想定したものであったが、児童らが適切な避難のしかたを学んでいた。この訓練で、学校、消防、地域との連携や教職員の役割分担も確認していた。それにより、今回、乗船中の船内で緊急事態が発生しても、教職員や児童らも乗組

員の指示に従い、積極的に避難誘導に協力し整然かつ迅速な避難行動につながったと考えられる。

一方で、小型船では大型船と比べると屋外デッキまで近く、船室外への避難は容易にできるが、屋外デッキが小さく、沈没までの時間が短い場合には海に飛び込む以外避難する方法がないことがある。海に飛び込むこと自体は本来推奨される行動ではないが、今回の事故では短時間での沈没が想定されたこと、救命ボートは搭載されていなかったこと、周囲にすぐに救助できる船舶がいたことなどを踏まえると、他の選択肢がなくやむを得ない行動であったと考えられる。救命ボートの搭載に関しては、S号のような小型船舶では搭載義務の対象外であり適法だった。しかし、知床遊覧船事故でも指摘されているが、海水温が低い場合は生存時間が短く危険である⁽¹¹⁾。特に児童が海に飛び込むということは避けなければならない、小型旅客船への救命ボート整備などハード面での対策も必要である。また、修学旅行等で児童を集団で利用させる場合、万一の事故を想定して気象条件や避難なども考慮した実施日程の検討も必要であると考えられる。

6. まとめ

今回の事故では乗組員、引率する教職員ら、周辺船舶、海上保安庁等の関係機関の連携や指示、適切な情報共有が行われたことで迅速な避難につながった。さらに、乗船していた児童や教職員らも学校での訓練などの成果もあり62人の命を救えたと考えられる。

以上のことから、修学旅行等で旅客船を利用する場合は、乗組員のみならず引率する教職員や児童に対しても、事前に利用する船舶や海域などの状況に応じて、海難事故に対する教育訓練の実施をすることも、避難時の混乱を防ぎ、迅速に避難のために有効であると考えられる。また、小型旅客船でも、大型船同様に乗客が海水に浸からずに避難できる救命ボートの設置などハード面での対策をすると同時に、短時間で避難ができるように教育訓練なども検討する必要があると考えられる。そして、修学旅行等で船舶、特に小型旅客船を利用する場合、避難のしやすさなどを考慮した計画の策定も考えていくことも重要である。

参考文献

(1) 運輸安全委員会：船舶事故の統計

<https://jtsb.mlit.go.jp/jtsb/ship/ship-accident-toukei.php> 2024.3.1

- (2) 中尾政之：失敗百選, pp199-200, 森北出版, 2005.
- (3) 三友信夫, 松倉洋史, 松岡猛: 確率論的安全性評価手法によるタイタニックの解析, 船舶技術研究所報告, Vol. 37, No. 3, pp77-141, 2000.
- (4) 藤原光治郎, 亀山道弘, 宮田修: 船上の避難行動のシミュレーションⅢ, 日本航海学会論文集, Vol. 100, pp199-207, 1999.
- (5) 中山光成, 久宗周二: クルーズ客船の火災発生時における乗客の避難に関する研究, 日本航海学会論文集, Vol. 133, pp12-19, 2015.
- (6) 運輸安全委員会: 船舶事故調査報告書「旅客船 Shrimp of Art 乗揚事故」2023.1.19 公表
- (7) 運輸安全委員会: 「旅客船 Shrimp of Art 乗揚事故」説明資料, 2023.1.19
- (8) 中山光成, 久宗周二: 旅客船の転覆事故における避難行動に関する研究, 日本航海学会論文集, Vol. 134, pp19-26, 2016.
- (9) 久宗周二, 天下井清, 木村暢夫: 紫雲丸・第三宇高丸衝突・沈没事故の人間工学的研究—日本人間工学会人的事故調査マニュアルを用いて, 日本航海学会論文集, Vol. 114, pp179-184, 2006.
- (10) 日本財団: 修学旅行中の旅客船沈没事故 全員生還の“奇跡”を生んだ現場対応と事前のそなえとは?, 海の事故ゼロの未来をつくるノート, <https://sonae.uminohi.jp/n/n5ab65658cc1d> 2022.4.26.
- (11) 運輸安全委員会: 船舶事故報告書「旅客船 KAZU I 沈没事故」2023.9.7 公表

関門海域における漁船と一般航行船舶との

競合緩和に向けた意識調査

— 遊漁船従事者・水先人・内航船実務者らの比較 —

正会員○酒出 昌寿（水産大学校） 正会員 湊 真輝（神戸大学）
正会員 杉野 亮介（水産大学校）

要旨

関門海峡および周辺海域(以後、関門海域という)では、小型漁船および遊漁船と一般航行船舶との海域利用上の厳しい競合により、衝突や漁具損傷、乗揚げの海難発生リスクが潜在している。著者らは、当海域を利用する漁業者を含む遊漁船従事者、水先人、内航船舶の航海当直実務者らにアンケート調査を実施し、三者の競合緩和や海上交通安全に関わる意識の相違について統計的分析を行った。その結果、三者それぞれの競合緩和や海上交通安全に関わる意識には、幾らかの相違があることを把握し、客観的に示すことができた。

キーワード：海上交通、競合緩和、漁船、遊漁船、一般航行船舶

1. はじめに

我が国沿岸海域は、海上輸送量の増加に伴って海上交通が輻輳するとともに、古くから好漁場も形成され、漁船漁業や遊漁の操業が活発である。これにより小型漁船および遊漁船と一般航行船舶との競合が顕著となり、時には厳しい競合による衝突や漁具損傷が発生、また、そのリスクが潜在している。

今後、わが国沿岸海域の海上交通安全とその管理の推進には、利用者間での海域利用上の競合緩和に向けた合意形成が不可欠で、一般航行船舶、小型漁船および遊漁船など、多くの利用者を対象とし、科学的合理性に基づいた検討と施策導入が求められる。

古くは昭和 30 年代より、わが国沿岸海域での一般航行船舶と小型漁船および遊漁船との競合緩和に関する議論、検討が行われているが、それらの競合緩和に向けた合意形成に寄与する成果は少ない⁽¹⁾。

その中でも、特に海上交通が輻輳し、小型漁船および遊漁船の操業が活発な関門海域は、両者の厳しい競合が発生し、衝突、漁具損傷のリスクばかりでなく、狭隘な海域の中で一般航行船舶が小型漁船および遊漁船を避航する中で、他の一般航行船舶との衝突、浅瀬への乗揚げなどの第三のリスクも懸念される。また、ひとたび海難事故が発生すれば、漁場環境の悪化も懸念される。

このことから、著者らは、関門海域の一般航行船舶と小型漁船および遊漁船との競合緩和、海上交通安全とその管理の推進に寄与することを目的とし、

当海域での一般航行船舶の通航実態、小型漁船および遊漁船の操業実態に関する研究に取り組んできた。実態観測の中で、一般航行船舶と小型漁船および遊漁船の行動が、衝突や乗揚げ、両者の競合を回避するものとして理解できるケースも多かった。しかし、操船者や漁業者らが、それぞれの程度の心理的負担を強いられているのか、または許容範囲内であるのかを実態観測のみから推し測ることは困難である。

海域利用上の競合緩和や、海域の海上交通安全とその管理を検討する上で、現状の実態が利用者にとどの程度の心理的負担を与えているのかを分析、把握することは不可欠といえる。そこで著者らは、これまでの実態観測結果を踏まえ、関門海域の利用者らの競合緩和、海上交通安全に関する意識調査とその分析に取り組んだ。

2. 関門海域利用者らへのアンケート調査

著者らは、関門海域の利用者の競合緩和、海上交通安全に関する意識調査、分析を行うにあたり、出来る限り多くの利用者を対象とし、客観的に分析、評価を行うためのアンケート調査を実施し、調査結果の統計的分析を行った。

まず、当海域で操業する漁業者を含む遊漁船従事者 94 名に対し、小型漁船および遊漁船と一般航行船舶との競合緩和、海上交通安全の意識に関するアンケート調査を実施し、その分析を行った⁽²⁾⁽³⁾。

次いで、当海域の航行環境に精通する関門水先区

水先人会の水先人 29 名への小型漁船および遊漁船と一般航行船舶との競合緩和、海上交通安全の意識に関するアンケート調査を実施し、その分析を行った⁽⁴⁾。

近年の関門海峡の 1 日あたりの平均通航量は 400 隻程度⁽⁵⁾で、過去の調査⁽⁶⁾より通航船舶の大半が総トン数 1,000 トン未満で、多くの内航船舶が通航していることが考えられることから、関門海域を通航する内航船舶の航海当直実務者(以後、内航船実務者という)225 名にも小型漁船および遊漁船と一般航行船舶との競合緩和、海上交通安全の意識に関するアンケート調査を実施し、その分析を行った⁽⁷⁾。その後も内航船実務者らへのアンケート調査を継続し、2023 年 11 月までの間に 388 名からの回答を得た。

3. アンケート調査の設問内容

本研究のアンケート調査では、遊漁船従事者(漁業者含む)、水先人、内航船実務者の三者それぞれの視点からの小型漁船および遊漁船と一般航行船舶との競合や海上交通安全に関わる意識を把握し、かつ、三者の回答結果を比較できるよう、設問を設定した。

三者ともに無記名でのアンケート調査を実施し、回答者の属性の他、以下のような設問項目とし、設問内容に応じて選択肢、数値記入、自由記述による回答を求めた。

(1)遊漁船従事者(漁業者含む)(94 名)への設問項目

- 【質問 1】至近距離に接近する一般航行船舶との衝突や接触の危険を感じる場合の有無
- 【質問 2】至近距離を通過した一般航行船舶の航走波に危険を感じる場合の有無
- 【質問 3】一般航行船舶が接近する場合の自身の行動
- 【質問 4】一般航行船舶からの汽笛吹鳴に対する印象
- 【質問 5】周辺に他の遊漁船や漁船が多く、一般航行船舶を安全に避航することが困難と感じる場合の有無
- 【質問 6】一般航行船舶に通航路を空けたはずなのに、その通航路を航行してくれていないと感じる場合の有無
- 【質問 7】一般航行船舶が航行目標とする航路標識の認識の有無
- 【質問 8】一般航行船舶が通過する場合、不安を感じて許容できない一般航行船舶との離隔

距離と、不安を感じず安心できる離隔距離

- 【質問 9】遊漁船と一般航行船舶との競合実態やその緩和に関する自由意見

(2)水先人(29 名)への設問項目

- 【質問 1】導灯指導線付近での小型漁船および遊漁船の協力的な避航の有無
- 【質問 2】注意喚起の汽笛吹鳴に対する漁船および遊漁船の協力動作
- 【質問 3】本船の進路警戒船からの協力依頼に対する小型漁船および遊漁船の対応
- 【質問 4】小型漁船および遊漁船を避航、航過する場合、不安を感じて許容できない小型漁船および遊漁船との正横距離と、不安を感じず安心できる正横距離
- 【質問 5】小型漁船および遊漁船が AIS を搭載した場合の海上安全への効果
- 【質問 6】小型漁船および遊漁船が国際 VHF 無線装置を所持した場合の海上安全への効果
- 【質問 7】海上保安庁巡視艇が小型漁船および遊漁船に対して注意喚起を行う場合の海上安全への効果
- 【質問 8】関門海峡海上交通センターが小型漁船および遊漁船に関する情報提供を行う場合の海上安全への効果
- 【質問 9】水先人が嚮導していない一般航行船舶が小型漁船および遊漁船と遭遇した際、航行が困難で危険な状況になっていると感じることの有無
- 【質問 10】一般航行船舶と小型漁船および遊漁船との競合実態やその緩和に関する自由意見

(3)内航船実務者(388 名)への設問項目

- 【質問 1】導灯指導線付近での小型漁船および遊漁船の協力的な避航の有無
- 【質問 2】注意喚起の汽笛を吹鳴した際の小型漁船および遊漁船の協力動作
- 【質問 3】小型漁船および遊漁船を避航、航過する際、ここまで接近していると不安を感じ許容できない本船との正横距離および、これだけの離隔距離があれば不安を感じない正横距離
- 【質問 4】海上保安庁巡視艇が小型漁船および遊漁船へ注意喚起を行う効果
- 【質問 5】関門海峡海上交通センターが行う小型漁船および遊漁船に関する情報提供の効果

- 【質問 6】 他船が小型漁船および遊漁船を避航、航過する場面にて、それが困難で危険と感ずることの有無
- 【質問 7】 小型漁船および遊漁船が AIS を搭載する効果
- 【質問 8】 小型漁船および遊漁船が国際 VHF 無線装置を所持する効果
- 【質問 9】 関門海域での一般航行船舶と小型漁船および遊漁船との競合緩和、海上交通安全関する自由意見

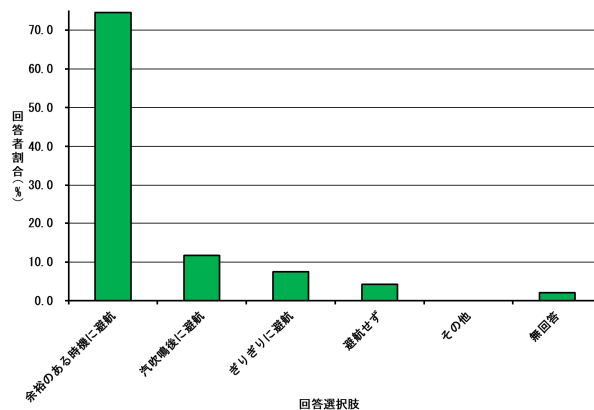


図1 一般航行船舶が接近する場合の行動

4. 小型漁船および遊漁船と一般航行船舶が競合した際の意識の比較

小型漁船および遊漁船と一般航行船舶が競合し、避航動作を必要とする状況下での意識を比較できると考えられる以下のアンケート質問事項に着目した。

<遊漁船従事者(漁業者含む)(94名)>

(1)一般航行船舶が接近する場合の自身の行動

【質問 3】

(2)一般航行船舶からの汽笛吹鳴に対する印象

【質問 4】

<水先人(29名)>

(3)導灯指導線付近での小型漁船および遊漁船の協力的な避航の有無【質問 1】

(4)注意喚起の汽笛吹鳴に対する漁船および遊漁船の協力動作【質問 2】

<内航船実務者(388名)>

(5)導灯指導線付近での小型漁船および遊漁船の協力的な避航の有無【質問 1】

(6)注意喚起の汽笛を吹鳴した際の小型漁船および遊漁船の協力動作【質問 2】

4.1 小型漁船および遊漁船の協力的な避航

操業中、一般航行船舶が接近した場合の行動について(上記(1))の遊漁船従事者(漁業者含む)の5件の選択肢別の回答者割合を図1に示す。同図より、「余裕のある時期に避航」の回答者が全体の約75%を占め、遊漁船従事者(漁業者含む)の大半が、自ら協力的に避航していると意識していることが分かる。

これに対し、水先人および内航船実務者が、関門海域内の導灯指導線付近にて遭遇した小型漁船および遊漁船からの協力的な避航を感じるか(上記(3)、(5))の6件の選択肢別の回答者割合を図2に示す。同図より、水先人の約45%が「よく感じる」・「たまに感じる」の肯定的回答をしている一方、内航船実

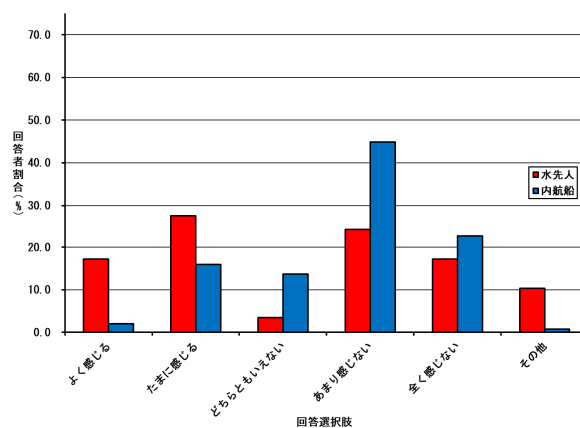


図2 導灯指導線付近での協力的な避航

務者の約68%が「あまり感じない」・「全く感じない」の否定的回答をしている。

これら三者を比較すると、多くの遊漁船従事者(漁業者含む)は、自身のタイミングや距離感で協力的に避航しているが、水先人や内航船実務者らの中には、現状の遊漁船従事者(漁業者含む)の避航動作やその離隔距離に不安を感じていることが示唆される。特に内航船実務者らは、その傾向が顕著といえる。

4.2 汽笛吹鳴による小型漁船および遊漁船の協力動作

操業中、接近する一般航行船舶から汽笛吹鳴された時の印象(上記(2))に関する遊漁船従事者(漁業者含む)の4件の選択肢別の回答者割合を図3に示す。同図より、「協力的に更に避航する」の回答者が全体の約81%を占め、遊漁船従事者(漁業者含む)の大半が、より協力的な避航の必要性を意識していることが分かる。

これに対し、水先人および内航船実務者が、汽笛

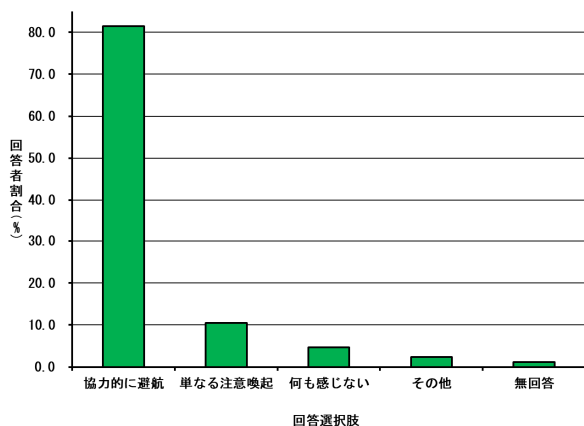


図3 一般航行船舶からの汽笛吹鳴に対する印象

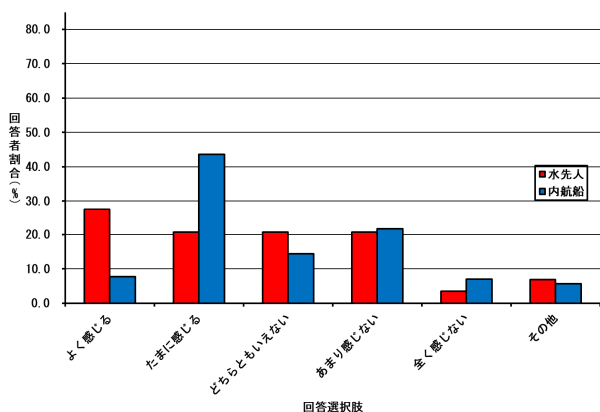


図4 汽笛吹鳴後の協力的な避航

吹鳴後の小型漁船および遊漁船からの協力的な避航を感じるか(上記(4)、(6))の6件の選択肢別の回答者割合を図4に示す。同図より、水先人の約48%、内航船実務者の約51%が「よく感じる」・「たまに感じる」の肯定的回答をしている。

このことから、一般航行船舶からの汽笛吹鳴は、小型漁船および遊漁船との競合緩和にある程度の効果があることが示唆される。

5. おわりに

本研究では、関門海域を利用する三者の競合緩和、海上交通安全に関わる複数の観点からのアンケート調査を実施した。本予稿では、それら調査結果の内、一部の報告のみとなったが、三者それぞれの競合緩和や海上交通安全に関わる主観的な意識には、幾らかの相違があることを把握し、それらの相違を客観的に示すことができた。

今後、更なる三者の意識の比較と分析を行い、関門海域の海域利用上の競合緩和と海上交通安全の推

進に寄与する資料の提供、施策の提案を行っていく。

謝辞

本研究にあたり、多大なるご協力を頂いた関門水先区水先人会水先人の皆様、内航海運船社ならびに乗組員の皆様、一般財団法人関門海技協会ならびに当協会主催のECDIS講習受講者および遊漁船業務主任者講習受講者の皆様へ深く御礼申し上げます。

本研究はJSPS 科研費JP21K04509の助成を受けたものです。

参考文献

- 酒出昌寿：沿岸海域における小型漁船の操業・航行の安全に関わる研究のレビューと今後の取り組みについて，日本航海学会誌 NAVIGATION, No.198, pp.15-24, 2016.10.
- 酒出昌寿・水谷壮太郎・鎌野忠：関門海域での小型漁船からみる一般航行船舶との競合緩和について－アンケートによる遊漁船従事者の意識調査－，日本航海学会誌 NAVIGATION, No. 207, pp.67-76, 2019.1.
- 酒出昌寿・安井友章・鎌野忠：関門海域での水先人と遊漁船従事者との競合緩和に関する意識の比較について，日本航海学会誌 NAVIGATION, No.215, pp.78-87, 2021.1.
- 酒出昌寿・坂本皓昭・水谷壮太郎：関門海域での水先人からみた嚮導する船舶と小型漁船との競合緩和について－アンケートによる水先人の意識調査－，日本航海学会論文集, Vol.141, pp.9-17, 2020.2.
- 海上保安庁：令和4年 海難の現況と対策～大切な命を守るために～
https://www6.kaiho.mlit.go.jp/info/keihatsu/20230609_state_measure01.pdf, 2024.3.1.
- 本村紘治郎・奥田邦晴・富賀見清彦・日影忠久・辻啓介：門司西海岸沖の関門航路拡幅と彦島導灯設置の効果について，日本航海学会誌 NAVIGATION, No.160, pp.124-133, 2004.6.
- 酒出昌寿・近藤亮磨・本田幸太郎・秦一浩：関門海域における内航船舶の航海当直実務者からみた一般航行船舶と小型漁船との競合緩和について－内航船舶の航海当直実務者へのアンケート調査－，日本航海学会論文集, Vol.148, pp.27-38, 2023.7.

離島航路の母港変更に関する研究

正会員 行平 真也（九州産業大学）

要旨

離島航路は離島の人口減少により乗客数が減少しており、厳しい現状にある。離島航路の課題としては乗客数の減少に加え、運航面において船員の高齢化に伴う船員確保が挙げられている。これは離島航路のみならず、内航海運など他の海運業においても例外ではないが、離島航路においては母港が離島側であることが多く、離島への居住、もしくは乗船前後における離島での宿泊が必要であることから、そのことが島外出身者を採用する上でのハードルとなっている。

近年、九州運輸局管内においては山口県下関市の六連島と竹崎港を結ぶ竹崎～六連島航路が2016年10月に、大分県津久見市保戸島と津久見港を結ぶ津久見～保戸島航路が2022年10月に離島側から本土側に母港変更された。本土側に母港を変更したことにより、上記のハードルがなくなることから、離島側に母港を置く場合より、船員確保が有利になることが示唆される。

しかし、本土側への母港変更は離島住民にとっては離島航路の利便性が低下するものであるとともに、島内出身の船員にとっては生活環境の変化を伴う大きな問題となる。そこで本研究では離島航路の母港変更の課題について整理を行った。

キーワード：海運/物流、離島航路、離島、交通

1. はじめに

離島航路とは離島航路整備法第二条一項において「本土（本州、北海道、四国及び九州をいう。）と離島（本土に附属する島をいう。）とを連絡する航路、離島相互間を連絡する航路その他船舶以外には交通機関がない地点間又は船舶以外の交通機関によることが著しく不便である地点間を連絡する航路をいう。」と定められている。

離島航路は航空路がない場合には離島と本土側とを結ぶ唯一の交通手段であることから、住民の移動はもとより生活物資を運ぶための欠かすことの出来ないものであり、その維持が極めて重要である。

しかし、現在、離島航路の船員の高齢化などにより、船員不足が顕在化している状況にあり、離島航路の維持が難しくなっている状況にある。船員不足は離島航路以外の海運業界においても大きな問題であり、2022年における船員の有効求人倍率は3.45倍と2013年からの推移をみると高くなっている(図1)。船員の高齢化などを背景に求人が増加しているが、求職数が減少していることが要因である。

また、離島航路の船員確保においては、始発港が離島側であることが多く、離島への居住、もしくは乗船前後の離島での宿泊が必要であるが課題である。そのため、島外出身者を採用する上でのハードルとなっており、さらに深刻な問題となっている。

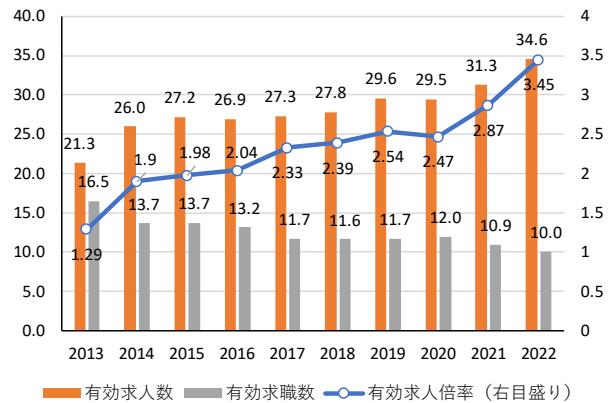


図1 船員の有効求人倍率の推移¹

田中⁽¹⁾は2008年度の報告において、瀬戸内海の小規模航路を事例とし「船員が高齢化している航路、従前の島内からの人材確保が難しくなり、発地を本土側に設置もしくは変更した航路も出現している点も注目され、船員の確保の経路には変化が生じつつあると考えられる。」と指摘している。報告から十数年後の現在において、離島航路の状況が厳しくなる中で、離島側から本土側への始発港の変更、いわゆる「母港変更」を行う事例が散見されている。例え

¹ 国土交通省海事局船員政策課：船員職業安定年報より作成。

ば、九州運輸局管内において、2016年10月に山口県下関市六連島と竹崎港を結ぶ竹崎～六連島航路が、2022年10月に大分県津久見市保戸島と津久見港を結ぶ津久見～保戸島航路が始発港を離島側から本土側に変更した。また、中国運輸局管内においても2航路において本土側に母港変更されている²。

本土側に母港を変更したことにより、離島に居住、もしくは乗船前後に宿泊するというハードルがなくなることから、離島側に母港を置く場合より、船員確保が有利になることが示唆される。

しかし、本土側への変更は離島住民にとっては離島航路の利便性が低下するとともに、島内出身の船員にとっては生活環境の変化を強いる大きな問題となる可能性がある。そこで本研究では離島航路の母港変更における課題について考察を行った。

なお、離島航路は近距離のものから長距離のものがあるが、本研究の動機は母港変更が行われた2航路（竹崎～六連島航路（片道20分）、津久見～保戸島航路（片道25分）によるものであり、近距離航路を主に扱うものとする。



図2 竹崎～六連島航路
(地図出典：OpenStreetMap)

2. 九州運輸局管内における国庫補助航路の母港の現状

本報告では九州運輸局管内の国庫補助航路を調査対象とし、その49航路⁽²⁾について、母港の現状について整理した（表1）。

国庫補助航路49航路のうち本土と離島を結ぶ航路が32航路であった。そのうち19航路については離島側を始発地とし、5航路が本土側であり、多くの航路においては離島側が母港であった。なお、鹿児島～十島～名瀬航路のように航路距離が長い航路や串木野・川内～甕島航路のようにフェリーは離島側、高速船は本土側を母港とする場合など明確な分類が困難な8航路についてはその他とした。

3. 母港を本土側に変更した航路の事例

母港を本土側に変更した事例として、2016年10月に変更された山口県下関市六連島と竹崎港を結ぶ竹崎～六連島航路（図2-3）について取り上げる。変更前と後の運航時刻について表2に示す。

変更前後において、運航回数は4往復と相違がな



図3 竹崎～六連島航路に就航する六連丸
(著者撮影)

いが、変更後は本土側が母港となり、竹崎を6:25発の便が始発となった。また、六連島18:30発の便が最終となり、竹崎港に戻るよう設定されている。六連島からの第一便の出発時間は7:00、竹崎港からの六連島への最終便の時間も18:00と変更前と相違がないことから、母港変更の影響を最大限考慮したものである。

² 山口県光市の室積～牛島航路(2022年10月1日)、岡山県笠岡市の笠岡～佐柳本浦航路(2023年4月1日)。

表1 九州運輸局管内の本土と離島を結ぶ国庫補助航路における母港の現状について（その他は除く）
（令和4年度九州運輸要覧より（2022年4月1日現在））

離島側を母港とする航路

事業者名	航路名	母港
下関市	蓋井島～吉見	蓋井島
北九州市	藍島～小倉	藍島
宗像市	地島～神湊	地島
宗像市	大島～神湊～地島	大島
新宮町	相島～新宮	相島
福岡市	玄界島～博多	玄界島
福岡市	小呂島～姪浜	小呂島
糸島市	姫島～岐志	姫島
川口汽船(株)	小川島～呼子	小川島
(有)郵正丸	馬渡島～呼子	馬渡島
(有)加唐島汽船	加唐島～呼子	加唐島
唐津汽船(株)	神集島～湊	神集島
竹山運輸(有)	度島～平戸	本村港（度島）
黒島旅客船(有)	黒島～高島～相浦	黒島
平戸市	大島～平戸	的山港（大島）
崎戸商船(株)	友住～佐世保	友住（中通島）
姫島村	姫島～国見	姫島
日豊汽船(株)	島浦～浦城	島浦（島野浦島）
天長フェリー(株)	天草～長島	片側港（獅子島）

本土側を母港とする航路

事業者名	航路名	始発港
下関市	竹崎～六連島	竹崎
野母商船(株)	長崎～伊王島～高島	長崎
津久見市	津久見～保戸島	津久見※
佐伯市	大島～佐伯	佐伯葛港
佐伯市	蒲江～深島	蒲江

※2022年10月1日より変更（分類は筆者による）

表2 竹崎～六連島航路の運航時間変更前と変更後の時刻表

【運航時間変更前】

六連島	7:00	10:20	12:30	14:50	15:00	17:00	17:30	18:20
	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
竹崎	7:20	10:00	12:50	14:30	15:20	16:40	17:50	18:00

【運航時間変更後】

六連島	6:45	7:00	10:20	12:30		17:00	17:10	18:20	18:30
	↑	↓	↑	↓		↑	↓	↑	↓
竹崎	6:25	7:20	10:00	12:50		16:40	17:30	18:00	18:50

（赤：六連島→竹崎（本土側）、青：竹崎（本土側）→六連島）

4. 母港変更における課題

今後の船員確保を鑑みると始発地を離島側から本土側に転換していくことも含めて検討を行う必要があると考えられるが、変更にあたり課題が大きく2つある。

1 つ目は本土側に母港を変更した場合、離島側からみた往復回数が減少することから、離島住民の利便性が低下することである。特に現行のダイヤにおいて運航回数が少ない場合はその影響は極めて大きい。例えば、離島発で1往復を運航している場合と同じ運航回数で本土側を始発とした場合、当日の往復が困難となる。そのため、離島住民の1往復を確保するためには本土側が母港の場合は2往復とする必要があり、1往復から2往復への増便を行う必要がある。私見に過ぎないが、国庫補助航路において、航路利用者数が減少している場合の航路経営改善として、母港変更に伴う往復の増便という航路改善計画が認められるとは考えづらい。燃料費などの運航にかかる経費は単純に2倍となり、船員の労働時間も増加することからその他の経費も大きく嵩むことが想定され、補助金で補填している欠損分が増加するためである。しかし、船員が確保出来なければ離島住民の足を確保することが出来ないため、船員確保が困難であるという条件下において1往復を2往復にするという措置を講じなければいけない可能性もある。なお、本土側と距離が近い離島では船員が小型船舶などで島側に移動し運航している事例もあり、離島によっては本土側に船員が居住し、離島側を母港とした運航が可能な場合もある（例：広島県呉市三角島航路、広島県呉市役所交通政策課へのヒアリング調査結果から）。

2 つ目はその離島出身の既存船員についてである。離島航路の船員は離島における重要な働く場であり、自らが生まれ育った島に住み続けるためにも離島船員を選んだ方も多くいる。また、今までや現行の求人においても離島に居住することを条件としている例もある³。そのため、本土側に母港を変更することは既存の船員に生活環境の変化を強いることから負担が大きく、職場内での合意形成を取ることが難しい場合もあると思われる。

このように大きく2つの課題があるが、今後、船

員の高齢化が進み、新規の離島航路の船員確保が厳しくなる中で、島内出身者からの新規船員の確保が困難となってくる可能性が極めて高いことから、母港変更についても検討を行っていく必要があると考えられる。なお、本土側の港の受け入れが可能かという根本的な問題もあり、十分な検討が必要である。

5. まとめ

本報告において、母港変更における課題を整理した。海運業界全体において船員不足となっていることから、離島への居住を条件とすることは船員確保においてハードルが高く、今後、船員確保を行っていくにあたり、本土側への母港変更を行わざるを得ない離島航路も増加すると思われる。母港変更は離島住民の利便性に関わる問題であり、合意形成が難しいと考えられるが、船員がいなければ離島航路の運営は立ち行かないことから、島民の足の確保を第一とした航路改善が必要であると言える。

また、本土側への母港変更を行う場合は離島住民のニーズに沿ったダイヤ変更を行っていく必要があり、離島住民の通院や買い物などの生活実態を踏まえることが肝要である。航路改善計画策定においては島民の生活実態についての調査を綿密に行うことが重要である。

謝辞

調査にご協力いただいた九州運輸局海事振興部旅客課の皆様、下関市役所港湾局の皆様、六連島の島民の皆様、六連丸の船員の皆様、津久見市経営政策課の皆様、宗像市元気な島づくり課渡船係の皆様、広島県呉市交通政策課の皆様に深く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 田中健作：離島航路補助政策の展開と離島航路問題 瀬戸内海小規模航路の事例を中心に、2008年度日本地理学会春季学術大会、<https://doi.org/10.14866/ajg.2008s.0.56.0>
- (2) 国土交通省九州運輸局：令和4年度九州運輸要覧 管内国庫補助航路一覧、https://www.tb.mlit.go.jp/kyushu/gyoumu/soumu/unyuyouran2021_00026.html（2024年3月15日確認）

³ 例として、福岡県宗像市の地島航路の海事職採用（2023年10月1日採用）の募集要項においては「採用後、宗像市地島への居住が必要」と記載されている。

ドローンによる航路標識保守に関する基礎的検討

正会員 竹内 謹治（海上保安庁） ○正会員 益原 和臣（海上保安庁）
非会員 品野 馨（セナーアンドバーンズ株式会社） 非会員 田中 一幸（海上保安庁）

要旨

本稿では、ドローンを活用した航路標識保守の実現性について検討する。海上保安庁が所管する灯台を対象とした実験の結果、劣化度点検においては現地における目視と同程度の水準を達成することが可能であることが示された。また、航路標識の光度測定を想定した実験の結果、ドローンを活用することにより、光度測定に関する作業負担の軽減が可能であることが示された。

キーワード：ドローン、航路標識、人工知能

1. はじめに

灯台や灯浮標に代表される航路標識は、沿岸を航行する船舶の安全を確保するために不可欠なインフラであり、その機能を適切に発揮させるために保守を行う必要がある。一方で、航路標識は海上や山中等のアクセスが容易でない箇所に設置されており、さらには保守作業中の危険性が懸念されている。

近年、インフラ点検の分野においてドローンの活用が注目されている。ドローンを用いることで、アクセスが困難な地域への到達が容易になるほか、カメラやサーモグラフィ等のセンサーを搭載することにより、危険を伴うことなく省力かつ効率的な点検を行うことが期待される。これらのドローンの特性を活かし災害発生時の点検等の応用も考えられる。

本稿では、ドローンを活用した航路標識保守に関して、灯台構造物の劣化度点検及び光度測定への適用の可能性を検討する。実験の結果、劣化度点検においては現地における目視と同程度の水準を達成することが可能であること、光度測定においては作業負担の軽減が可能であることが示された。

2. 背景及び関連研究

航路標識は海上航行船舶に不可欠なインフラであり、海上保安庁は航路標識法(昭和24年法律第99号)に基づき、航路標識の管理を行っている。2023年5月現在、海上保安庁は5,134基の航路標識を所管しており、これらが適切に機能を発揮するよう保守している。

日本の航路標識は耐用年数を超過しているものが多く存在するほか、近年激甚化する自然災害により被害を受けることも多く、保守の重要性が増して

いる⁽¹⁾。

航路標識は、海上はもちろんのこと、陸上においても山中の現地へのアクセスが容易ではない箇所に設置されている場合が多い。また、航路標識の保守においては、海上においては波による動揺下で、陸上においては強風下の高所で実施する必要もあり、作業の危険性が懸念されている。

インフラの点検に係る作業の負担・危険性については航路標識固有の問題ではなく、各インフラ分野において最新技術による作業負担・危険性の軽減策が検討されている。例えば、道路や河川等の点検においてドローンを一部活用する取り組みがなされている⁽²⁾。また、自然災害時のインフラ被害状況確認にもドローンが導入されているほか、インフラへのアクセスが困難な状況においてもドローンによる迅速な確認が可能となっている⁽³⁾。また、ドローンによる確認結果をAIで解析することにより、インフラ老朽化対策を効率的に行う試みもなされている⁽⁴⁾。

3. ドローンによる航路標識保守

本稿では航路標識のうち、最も老朽化が懸念されている灯台を対象とし、ドローンによる保守に焦点を当てる。また、保守の内容としては、構造物の劣化度点検及び光度測定を対象とする。

3.1 灯台構造物の劣化度点検

灯台構造物の点検は灯台の各箇所を目視やセンサーを用いた測定等することにより、劣化度を点検する。本稿では、以下の手順によりドローンを用いて灯台構造物の劣化度点検を行う。

- (1) 灯台各箇所のセンサーデータ取得
- (2) センサーデータと該当する箇所の対応付

(3) センサーデータからの劣化度点検

(1)のセンサーデータとしては、カメラによる撮影画像(以下、「可視光画像」)、サーモグラフィの画像(以下、「サーマル画像」)及び打診等が考えられる。本稿ではセンサー機材のドローンへの可搬性や作業の実現可能性を考慮し、可視光画像及びサーマル画像をセンサーデータとして採用した。

(2)の手順では、ドローンにより撮影した灯台の各部位の画像および撮影した位置から点検対象灯台の3Dモデルを作成し、3Dモデル上の灯台の各部位と撮影画像を対応させる。

(3)については、センサーデータを人間が解析する方法及びAI等により自動で解析する方法の両方が考えられる。

3.2 ドローンによる灯台の光度測定

灯台の光度測定は、灯器を点光源とみなせる距離を確保の上照度を測定し、以下の変換式(1)に基づき光度を算出する。

$$I = Er^2 \tag{1}$$

I: 光源の光度

E: 光源の照度

r: 光源から測定場所までの距離

一般に、距離rは小型灯台用の灯器で50m以上、沿岸灯台用の灯器では200~300m以上を確保する必要がある。しかしながら、灯台は海に面していることから、陸上で十分な測定距離を確保できる測定場所を選定することは容易ではない。また、海上からの測定については、舟艇の確保や人員の配置等の負担が生じることとなる。

ドローンは特定の位置にホバリングすることが可能であることから、もしドローンによる測定及び測定データの蓄積が可能であれば、光度測定に係る負担を大きく軽減することが期待される。本稿では、ドローンに搭載した照度計を灯光の光軸に正対するようドローンの高度及び水平位置を調整の上でドローンをホバリングさせ、照度を測定することを想定する。

4. 灯台構造物の劣化度点検

4.1 実験条件

ドローンによる灯台構造物の劣化度点検を評価するため、2019年9月3日~4日にかけて、小湊港祓防波堤灯台(千葉県鴨川市)を対象に3.1(1)~(3)の手順に沿った実験を行った。実験日の気象条件を

表 1 灯台の劣化度点検実験に関する気象条件

実験日(撮影日)	2019/9/3	2019/9/4
天候	晴れ	薄曇り
風	微風	微風
気温(°C)	34	26

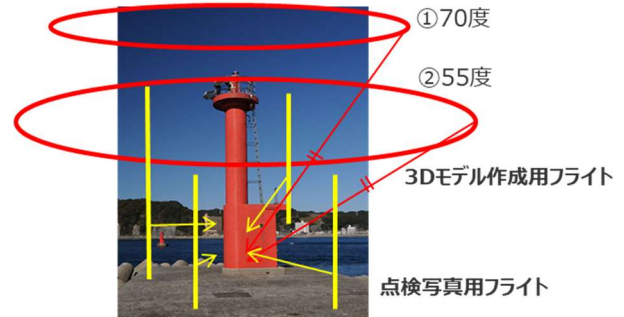


図 1 センサーデータ取得の概要

表 1 に示す。センサーデータとして、3Dモデル作成用の可視光画像、劣化度点検用の可視光画像及び劣化度点検用のサーマル画像をドローンにより取得した。

センサーデータ取得(カメラ撮影)の概要を図 1 に示す。3Dモデル作成用の画像については、灯台上空で灯台との距離がほぼ一定になるように円周移動しつつ、灯台全体が画角に入り、周辺の目印も画像内に入るよう撮影した。本実験では俯角は70度及び55度とした。また、劣化度点検用の画像は4方向から灯台にカメラを向け、垂直移動させながら水平撮影を行った。灯台踊り場の撮影については俯角30度で実施した。

一般に、構造物に使用されているタイルやモルタルが劣化している場合には浮きが生じる。また、浮きが生じる箇所に日射が当たるとその他の箇所より高温になることが知られている。サーモグラフィによる撮影は、構造物全体の表面温度が均一になる以前のこれらの温度変化が顕著になる時間帯として、7:00~8:00頃及び16:00頃にそれぞれ行った。

4.2 灯台の3Dモデリング及び対応付け

3Dモデリング結果を図 2 に示す。同図が示すように灯台を概ね3D画像として再現できた。また、追加実験として、2020年1月に同様の3Dモデリングを別の航路標識(鳥羽導灯(後灯):三重県鳥羽市)で実施した例を図 3 に示す。この例においても航路標識の外観を把握することが可能な程度のモデル作成ができた。



図 2 3D モデルの例(小湊港祓防波堤灯台)



図 3 3D モデルの例(鳥羽導灯(後灯))

これらのモデルと画像内の灯台撮影部位を対応付けることにより、灯台の各箇所劣化状況を整理することが可能である。なお、足場、高所作業車などを使用することなく高所等を含め全体確認ができることはドローン活用の大きなメリットといえる。

4.3 の劣化度点検においては、撮影位置や方向等から灯台における撮影箇所についてソフトウェア (KnowledgeMap 4D) を用いて自動特定した。

4.3 ドローン撮影画像を用いた劣化度点検

ドローンで撮影し、4.2 で灯台の各部位と対応付けを行ったセンサー画像を手動で解析することにより灯台の劣化箇所の特定を行った。まず、可視光画像を用いた劣化度点検においてはタイルの剥離やクラック等、9 か所の不具合を特定した。これらのうち、代表的な不具合の例を図 4 に示す。同図の例のうち、タイルの剥離や傷については明確に判別可能であるものの、モルタルやタイルのクラックについては、汚れと判別することが困難な場合が見られた。

サーマル画像による劣化度点検においては、図 5 で示すように、可視光画像で検出できなかったタイ

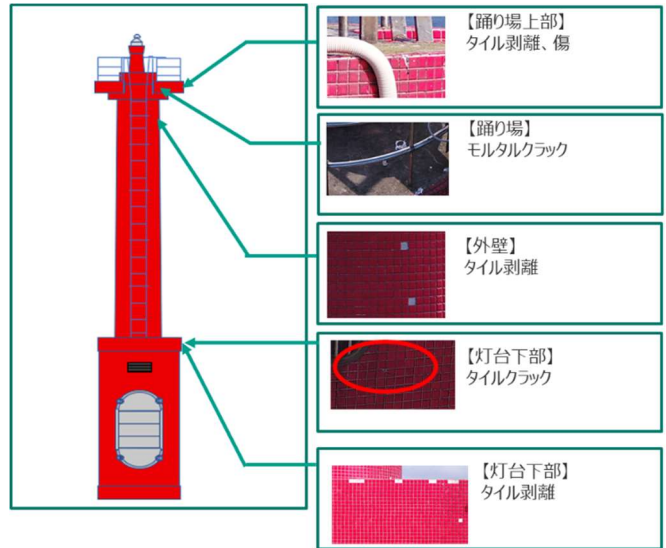


図 4 ドローン点検(可視光画像)により判明した不具合

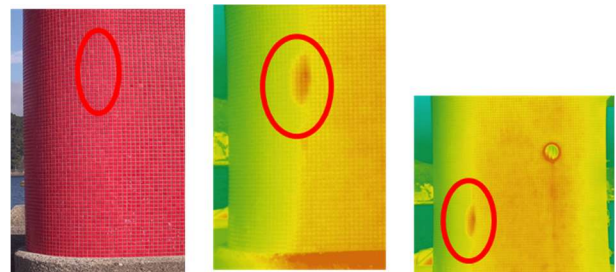


図 5 ドローン点検(サーマル画像)により判明した不具合

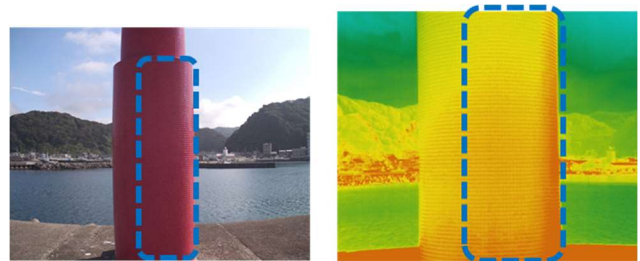


図 6 ドローン点検で検出できなかった不具合

ル浮きを検知できた。一方で、図 6 で示すように日照量が少ない箇所においてはタイル浮きの検知が困難であった。また、サーモグラフィは曲面では精度高く温度が検出できる領域が限られており、細かく角度を変えて撮影する必要がある。

海上保安庁が通常実施する点検では、目視で不具合の判別が困難な場合には追加点検を実施しており、例えば目視でわからない場合には触診によりクラックを、打診によりタイルの浮きを判別している。

現在のところ、ドローンで撮影した画像のみを用いて海上保安庁が実施する水準の劣化度点検することは困難であることから、このような複合的な方法で不具合を検出する方法を検討する必要がある。

4.4 ドローンを用いた光度測定

ドローンを用いた灯台の光度測定の実現性を検証するためのドローンと灯台用灯器を用いた基礎実験を2020年3月11日15:00~18:15に海上保安試験研究センターの敷地内で行った。

実験機材として、小型カメラ、照度計及び測定値を記録するためのデータロガーをドローンに搭載した。また、灯台用灯器として、海上保安試験研究センターが保有する灯器を使用した。

実験では、灯器の光軸と正対する位置にドローンを飛行・ホバリングさせ、照度を測定した。

実験においては、式(1)が成立する、すなわち光源を点光源とみなせる距離において、ドローンに搭載したカメラ越しで光軸と正対する光度を判断することが困難であった。これは、搭載したカメラが広角であることやレンズに歪みがあることに起因するものと考えられる。

そこで、光源の光軸を判断できる距離までドローンを接近させるとともに、高度及び水平位置を調節し、光源と照度計とを正対させ、正対を保ったまま(1)が成立する距離までドローンを後進させた。測定の様子を図7に示す。ドローンは姿勢を保ったまま後進することが可能であり、本実験においては、距離を変えた状況においても適切に照度測定が可能であることが分かった。一般に、灯台の光度測定において、特に海上で測定する場合には負担が伴うところ、ドローンを用いる手法においては距離を変化させることが非常に容易であるから、測定に係る負担の軽減が期待される。

5. おわりに

本稿では、ドローンを活用した航路標識保守に関して、灯台構造物の劣化度点検及び光度測定への適用の可能性を検討した。実験の結果、劣化度調査においては現地における目視と同レベルの点検が可能であること、光度測定においては作業負担の軽減が可能であることが示された。

一方で、現在、海上保安庁が実施している水準の点検を達成するためには、画像解析のみならず、触診や打診に相当するデータが必要であることも実験結果より示唆された。これらの追加的なデータを取得するための検討に当たっては、新たな機材を搭載する必要があり、積載重量を含め、ドローンの性能を含めた検討が必要になるものと考えられる。

また、センサーにはそれぞれの特徴があり、例え



(a)光源から15m(光軸を確認できるまで接近)



(b)光源から80m(光軸と正対しつつ後進)

図7 光度測定の様子

ばサーモグラフィであれば細かく角度を変えて撮影する等、センサー固有の飛行方法が求められる。従って、これらの飛行を可能とする高度な技量を保有するパイロットの育成も課題として考えられる。

さらに、ドローンによる構造物外観点検のための自動飛行や点検の自動化等、ドローンとAI技術の融合についても更なる検討が必要である。

参考文献

1. “民間を活用した航路標識の管理体制の強化と地域活性化に資する灯台活用の推進。” 交通政策審議会海事分科会第14回船舶交通安全部会, 資料2-1, 2020.
2. 野波健蔵, “ドローン技術の現状と課題およびビジネス最前線,” 情報管理, vol. 59, no. 11, pp. 755-763, 2017.
3. “技術政策：行政ニーズに対応した汎用性の高いドローンの利活用等に係る技術検討会.” 国土交通省, Available: https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/gijyutu/sosei_safety_tk2_000041.html.
4. “インフラ維持管理へのAI技術適用のための調査研究報告書.” 土木学会技術推進機構, 2019.

富山湾沿岸での令和6年能登半島地震前兆現象と津波

終身会員○河合 雅司

非会員 門村 英城(富山高等専門学校)

正会員 西井 典子(鳥羽商船高等専門学校) 正会員 亀井 志聖(富山高等専門学校)

要旨

2024年元日に令和6年能登半島地震が発生し、北陸地方で地盤の液状化や津波が発生し大災害となった。地震による災害を防止するためには、地震の前兆現象を見つけることが重要である。そこで、富山湾沿岸で観測された塩分、水温、潮位の地震前後の変動について調べた。さらに、2024年能登半島地震と2011年東北地方太平洋沖地震により富山湾沿岸で生じた津波についても調べた。その結果、次のことが分かった。

(1)2023年12月30日12時~31日18時にかけて富山新港の地面が約20cm沈下し、その後、隆起して元に戻る過程で地下水が湧出し塩分が約10PSU低下、水温が約4°低下した後、1月1日16時10分に能登半島地震(M7.6)が発生。2020年6月以降における約10PSUの塩分低下は地震発生時以外にも生じたが、地面の隆起に伴い塩分と水温が低下する現象は地震発生時だけであった。

(2)能登半島地震と東北地方太平洋沖地震の発生から約10分後に富山新港内で、それぞれ36分周期、59分周期の津波が発生した。これらの長周期波は地震発生以前から富山湾沿岸域に存在しており、潮汐力によるプレートの揺れにより駆動される富山沿岸域の固有振動である可能性がある。そして、この固有振動が地震により増幅されたと考えられる。

広範囲で地面の上下動や塩分等を観測すれば、地盤の液状化を伴う大地震を予知できる可能性がある。

キーワード：海洋工学，地震，塩分，長周期波，津波

1. はじめに

2024年1月1日16時10分頃、石川県能登地方で、マグニチュード7.6、震源の深さ16kmの令和6年能登半島地震が発生し、地盤の隆起や沈下、液状化、津波等による大災害が発生した。塩分や水位の観測を行っている富山新港周辺でも震度5強の揺れがあり、地盤の液状化等による被害が発生した⁽¹⁾。そして、地震の前兆現象について調べることは、これらの災害を防止するために極めて重要である。本研究では、富山湾沿岸の港内で観測された塩分、水温、水位のデータを解析して得られた能登半島地震の前兆現象と富山湾沿岸で観測された津波(長周期波)の発生メカニズムについて考察した結果について報告する。

2. 塩分・水温・潮位の観測

水温、塩分、潮位の観測地点をFig.1に示し、水温塩分計の設置方法をFig.2に、富山高等専門学校検潮観測室の外観をFig.3に示す。水温と塩分については、富山県新湊マリーナ(B点:36°46.37'N,137°8.32'E)の水面下3mの地点で、小型メモリー水温塩分計(JFE Advantech,DEFI2-CT)を用いて、潮位については富山新港内の富山高等

専門学校臨海実習場の検潮観測室(A点:36°45.65'N,137°7.88'E)において、水晶式水位計(観測精度:0.6cm)を用いて1秒毎に水位観測を行っている。なお、塩分については水温と電気伝導度を測定し、変換式により塩分を計算した。JFE Advantech社の小型メモリー水温塩分計(DEFI2-CT)の仕様をTable 1に示す。

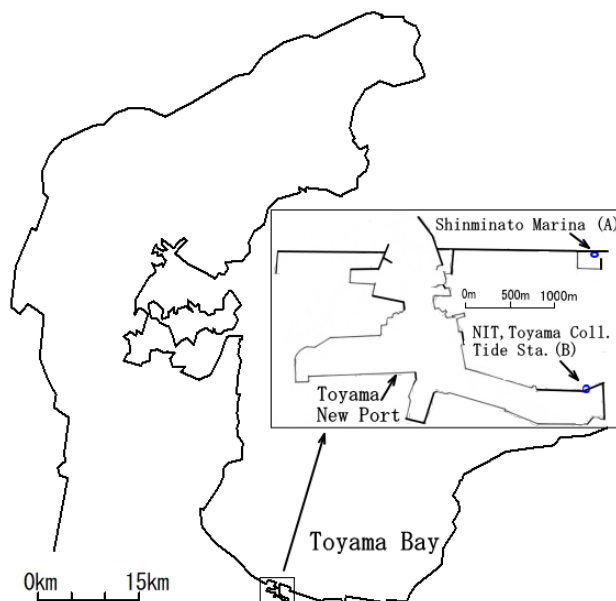


Fig.1 Observation points in Toyama Bay

Table 1 Specification of water temper. Meter and salinometer (JFE Advantech, DEFI2-CT)

Obser. data	water temper.	elec. conduc.
Range	-3 to 45°C	2 to 70mS/cm
Accuracy	±0.05°C	±0.05mS/cm
Response speed	10sec.	1sec.

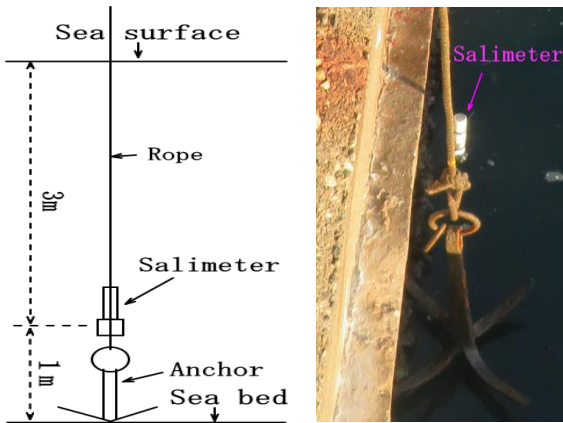


Fig.2 Salimeter setting method in Shinminato Marina (Fig.1 (B))



Fig.3 Tide station in Toyama New Port (Fig.1(A))

3. 令和6年能登半島地震の前兆現象

新湊マリーナ (Fig. 1 (A)) で観測した 30 秒毎の塩分と水温を Fig. 4 と Fig. 5 に示す⁽²⁾。これらの図から、塩分が地震発生約 1 日前から地震発生時にかけて約 10PSU 低下し、それに伴い水温も約 4° 低下したことが分かる。また、塩分の低下は地震発生 4 日前 (12 月 28 日) と 5 日前 (12 月 27 日) にも生じており、水温も同様に低下していた。ここで、富山新港内 (Fig. 1 (B)) で観測された水位から気象庁が公開している富山の潮汐定数と 10 分

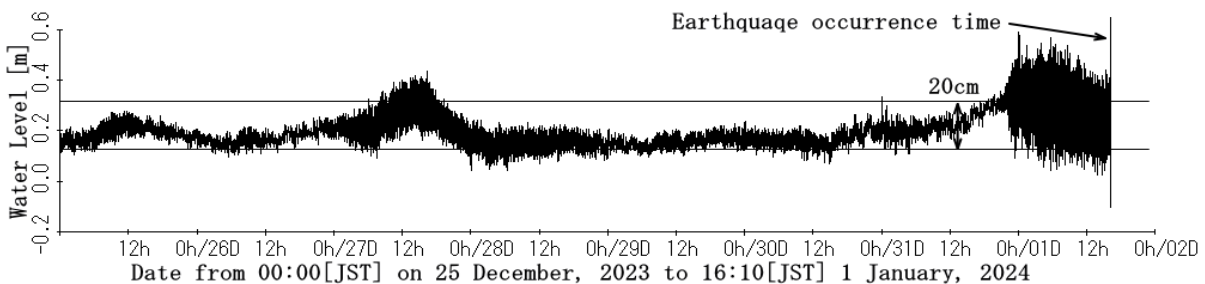


Fig.6 The water level without astronomical tide and fluctuations due to air pressure in Toyama New Port from 00:00 [JST] on 25 December, 2023 to the time of the 2024 Notohanto Earthquake occurrence

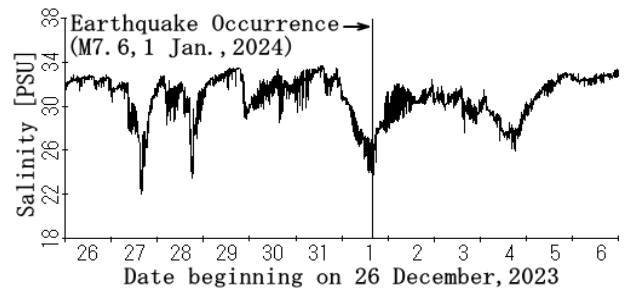


Fig.4 Salinity for 12 days after 26 Dec., 2023

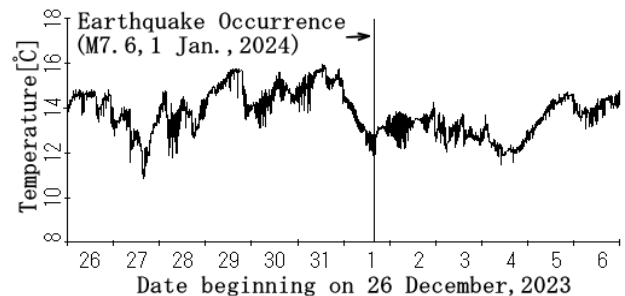


Fig.5 Temperature for 12 days after 26 Dec., 2023

毎の伏木の気圧を用いて天文潮汐と気圧による水位変動を除去した水位 (平均水位) を Fig. 6 に示す。Fig. 6 は、地震発生 2 日前 (12 月 30 日 16 時頃) から地震発生 16 時間前 (1 日の 0 時) にかけて平均水位が約 20cm 上昇し、その後地震発生時にかけて平均水位が低下していることを示している。そして、この平均水位の低下とともに、塩分が低下している。また、12 月 28 日と 12 月 27 日にも塩分が低下しているが、28 日は平均水位の変化はほとんどなく、27 日は平均水位の上昇とともに塩分が低下しており、平均水位の低下とともに塩分が低下した地震発生時の状況とは逆になっている。Fig. 6 における約 20cm の平均水位変動の原因であるが、地震による液状化現象により新湊マリーナで約 20cm の地盤沈下が生じており、この平均水位変動は地盤の上下動が原因であると考えられる。そして、12 月 28 日は地盤の沈下とともに地下水が湧出して塩分と水温が低下し、1 日は地盤の隆起 (上昇) とともに地下水が湧出して塩分と水温が低下した後、地震が発生したと考えられる。塩分

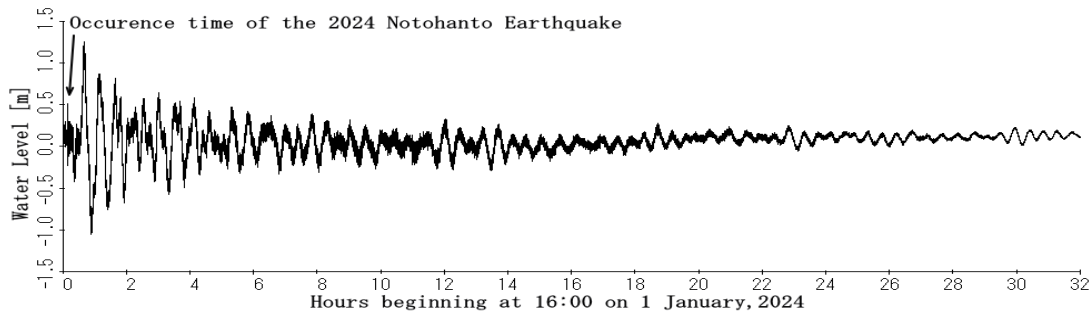


Fig.7 The water level without astronomical tide in Toyama New Port for 32 hours after 16:00 on 1 January, 2024

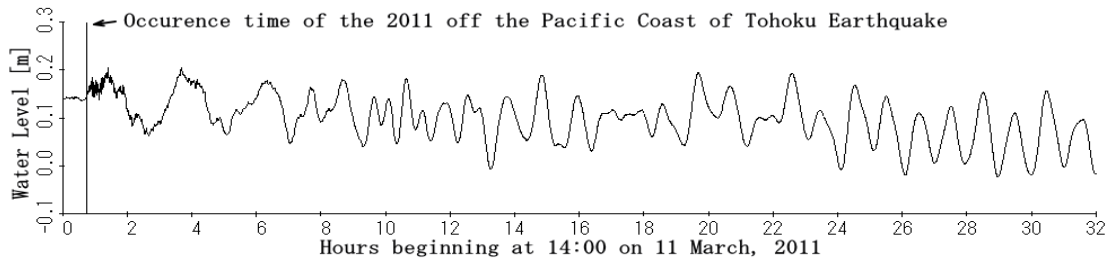


Fig.8 The water level without astronomical tide in Toyama New port for 32 hours after 14:00 on 11 March, 2011

等の観測は2020年6月から続けているが、地盤の隆起とともに半日以上かけて徐々に塩分と水温が大きく低下したのは、能登半島地震が発生した時のみであった。

4. 富山湾沿岸における地震に伴う津波

富山新港内 (Fig. 1 (B)) で観測された 2024 年能登半島地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震の時の水位データを Fig. 7 と Fig. 8 に示す⁽³⁾。いずれも気象庁の富山の潮汐定数を用いて天文潮汐は除去してあるが、気圧による変動は除去していない。以下に示す水位は全て同様である。そして、地震発生後から 1 秒毎 145.6 時間分の天文潮汐を除去した水位のスペクトル密度を Fig. 9 と Fig. 10 に示す。それぞれ、Fig. 9 は 2024 年能登半島地震後の水位、Fig. 10 は 2011 年東北地方太平洋沖地震の水位のスペクトル密度である。これらの図から、2024 年の地震では 2166 秒 (36 分)、2011 年の地震では 3519 秒 (59 分) 周期の津波が顕著であったことが分かる。また、地震発生時の 60 分間の水位を Fig. 11 と Fig. 12 に示す。これらの図から、地震発生から約 10 分後に、地震の揺れによると思われる

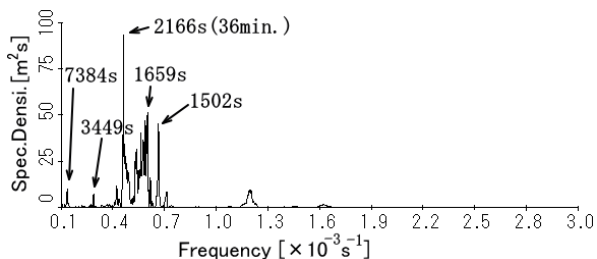


Fig.9 Spec. density of tide level without astronomical tide for 145.6 hours after 16:10 on 1 January, 2024

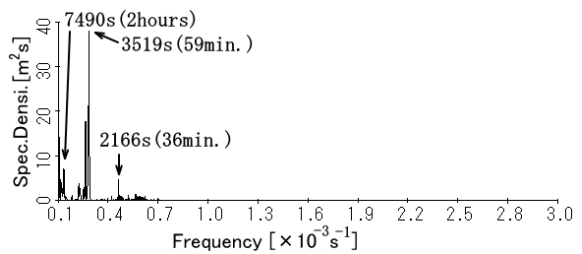


Fig.10 Spec. density of tide level without astronomical tide for 145.6 hours after 14:50 on 11 March, 2011

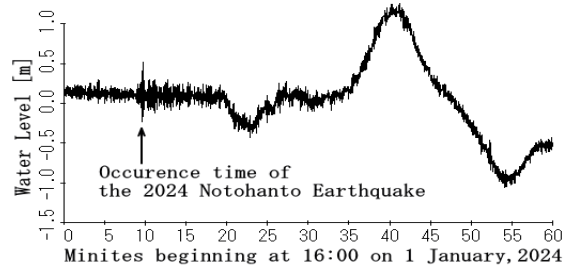


Fig.11 The water level without astronomical tide in Toyama New port for 60 minutes after 16:00 on 1 January, 2024

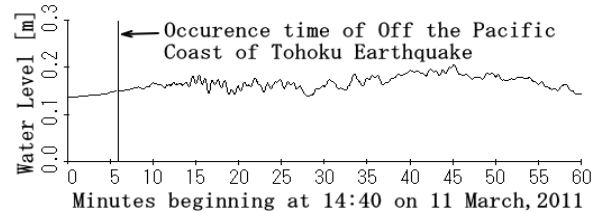


Fig.12 The water level without astronomical tide in Toyama New port for 180 minutes after 14:00 on 11 March, 2011

る水位の変動が始まっていることが分かる。

さらに、地震がない時の 1 秒毎 145.6 時間分の水位のスペクトル密度を Fig. 13 に示す。Fig. 13 に示す様に、3519 秒 (59 分)、2166 秒 (36 分) 等の、周期の波は平素から富山湾沿岸に存在しており周

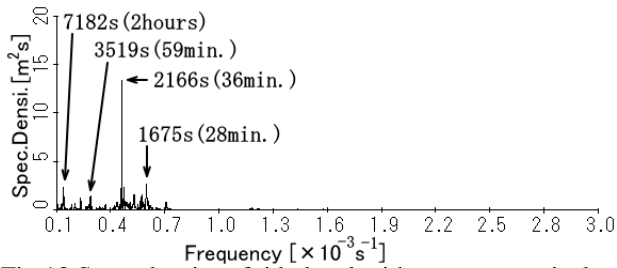


Fig.13 Spec. density of tide level without astronomical tide for 145.6 hours after 00:00 on 18 February, 2023 期的に大きくなったり小さくなったりしている。これらの波のうち、2024年の地震では2166秒、2011年の地震では3519秒周期の波が地震の揺れにより大きく増幅されたと考えられる。

5. 考察

本研究ではまず、塩分、水温、水位のデータを用いて2024年能登半島地震の前兆現象について示した。地震前約1週間の天文潮汐と気圧による変動を除去した水位が約20cm変動していた。この水位変動については、地震による地盤の液状化により新湊マリーナ内で地面に約20cmの段差が生じていることから、地面が上下に変動することにより生じたと考えて議論した。また、地震発生時前と12月27日12時頃に水位が約10秒周期で数10cm変動しているが、これはうねり性波浪(寄り回り波)が港内に侵入したものである。

次に地震に伴う津波について考察する。Fig. 8の津波において、地震発生から8時間は約2時間周期の波が卓越し、その後は約1時間(59分)周期の波が卓越している。これについては、地震により約2時間と約1時間(59分)周期の波が大きく増幅され、初めは約1時間周期(59分)の波は約2時間周期の波により隠されていたが、約2時間周期の波は速く減衰したために8時間後以降は約1時間(59分)周期の波が顕著になったと考えられる。そして、地震による地面の揺れにより特定周期の波(固有振動)が駆動されることが分かる⁽⁴⁾が、富山湾沿岸には地震発生前から約2時間、約1時間、約30分等の周期の波(固有振動)が存在している。これらの波の存在は、潮汐力により地面が様々な周期で揺れている⁽⁵⁾ことを示していると思われる。

6. おわりに

本研究では、2024年能登半島地震の時の塩分、水温、水位のデータを解析し、次の結果を得た。
(1)地震発生の約2日前から16時間前にかけて富

山新港付近の平均水位が約20cm上昇(地面が約20cm沈下)し、その後平均水位が低下(地面が隆起)する過程で大量の地下水が湧出して塩分が約10PSU、水温が約4°低下した時に地震が発生した。
(2)2020年6月以降において、塩分が約10PSU低下する現象は、地震発生時以外にも生じているが、平均水位の低下(地面の隆起)に伴い半日以上かけて徐々に塩分と水温が大きく低下する現象は、地震発生時だけであった。

さらに、2011年東北地方太平洋沖地震の時の水位も解析し、津波に関する次の結果を得た。

(1)地震に伴う富山湾沿岸の津波は、既に存在する特定の波(固有振動)が地震の揺れで増幅されたものである。

(2)沿岸に平素から存在する約2時間、約1時間、約30分等の波は潮汐力によるプレートの揺れにより駆動された固有振動(共振)である可能性がある。

地面の上下動、塩分、水温等を広範囲に渡ってリアルタイム観測することにより、地盤の液状化現象を伴う大きな地震を予知できる可能性がある。地震発生の5日前は平均水面が上昇、4日前は一定、当日は低下している時に塩分が低下した。平均水面の低下と伴に塩分が最も低下した時に大地震が発生した原因の解明は今後の課題である。

参考文献

- (1)国土交通省北陸地方整備局:令和6年能登半島地震に対する北陸地方整備局の対応について(第55報), <https://www.hrr.mlit.go.jp/press/2024/4/240401honkyoku1.pdf>, 2024. 04.
- (2)河合雅司・西井典子・林泰三: 富山湾沿岸における塩分変動に関する一考察, 日本航海学会論文集, 第149巻, pp. 16-23, 2024. 02.
- (3)河合雅司・北村康司・後藤佑介・川口清司: 富山湾沿岸における長周期水位変動について, 日本航海学会論文集, 第135巻, pp. 19-26, 2016. 12.
- (4)Yuichiro TANIOKA and Kenji SATAKE: Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom, *Geophysical Research Letters*, vol. 23, pp. 861-864, 1996. 04.
- (5)河合雅司: 静止衛星の軌道解析に関する研究-V. -観測距離と計算距離の残差と気象要素の関係-, 日本航海学会論文集, 第101巻, pp. 7-14, 1999. 09.

海洋構造物の最適メンテナンス スケジューリングシステムの構築

正会員 ○竹内 海智（神戸大学） 正会員 笹 健児（神戸大学）

要旨

外洋に設置する浮体式の洋上風力発電施設のメンテナンスにおける波浪予測の困難さに着目し、機械学習により1週間先の有義波高、有義波周期および波向きを同時予測した。その結果、洋上での作業限界の一つの目安とされる有義波高1.5mの予測を95%以上の精度で行えることを確認した。さらに、予測した他の有義波周期および波向きも用いて作業船の運動応答を短期予測し、元データのそれと比較すると、概ね同様の傾向が得られた。作業限界目安の1.5mと運動応答から見た移乗限界の関係性については今後確認していく。

キーワード：海洋工学、海洋情報、環境、海象

1. はじめに

近年、化石燃料の使用比率を低減することで地球温暖化を防ぎ、持続可能な社会を実現するため、世界的にカーボンニュートラルへの流れが加速している。カーボンニュートラルとは、人為的に発生する温室効果ガスの排出量と吸収量を均衡させる（温室効果ガスの排出量を実質ゼロにする）ことである。特に、パリ協定で掲げられた世界共通の長期目標を達成するため、120を超える多くの国や地域が2050年カーボンニュートラルに向けた様々な取り組みを行っている。日本では、国内の温室効果ガスの排出量を2050年までにゼロにすると宣言している。この取り組みの一環として、永続的に使用が可能である再生可能エネルギーへの関心が高まってきている。本研究では、再生可能エネルギーの中でも風力発電に着目する。風力発電事業は、発電・送電効率等の理由から大型化が進んでおり、同時に風力発電施設を複数基設置してファーム化するウィンドファーム事業が増加傾向にある。ヨーロッパでは遠浅の海岸地形ゆえ着床式洋上風力発電施設が多く展開されるが、日本近海は急深な海底地形であり、国土狭小なため、将来的には外洋の沖合における浮体式の洋上風力発電施設の採用が増加していくと推測される。外洋では遮蔽物が無いため風速が大きく、風力発電施設には適した条件である一方、波浪も卓越しやすい傾向にある。過去、船舶や海洋構造物の安全性に

関する研究は数多く行われている。しかし、浮体式の洋上風力発電施設を外洋で設置・運用し続ける場合、卓越する風・波・流れ等の不規則な自然外力に対し、船舶のように針路変更にて回避する手段が取れない。特に、台風や低気圧が発達しやすい日本では、当該施設の故障のリスクは決して低くない。一方、定格的な発電量の観点から、当該施設は海洋上での長期間かつ連続的な運用が求められ、定期的なメンテナンスが必要不可欠となる。メンテナンス作業には陸から離れた沖合の設置位置まで、専門知識を保有した技術者が赴かなければならない。3日～1週間程度の期間が必要となり、当該施設の設置位置の海象条件を正確に予測した対応が必要となる。現状では、この予測が正確に実施できず、予定していたメンテナンスをやむなく中止・延期する事例がしばしば発生している。このような海洋構造物のメンテナンスの困難さに着目した研究例は少なく、安全なメンテナンスを可能にする運用システムが必要となる。港湾工事における一つの目安として、3日連続で静穏な海象条件（有義波高1.5m以下）を確保できるかという観点の波浪予測を対象とした先行研究は海洋工学の分野で存在する⁽¹⁾⁽²⁾。

また、国土交通省港湾局は全国港湾海洋波浪情報網ナウファス（NOWPHAS）⁽³⁾のGPS波浪計にて取得される全国規模の波浪情報システムが稼働しており、直近5年間のデータを用いた機械学習により、

当該施設のメンテナンスに関する安全予測を試みた。機械学習を用いた波浪予測は過去に研究例も存在するが、予測の対象としては波高や波周期にとどまる。また、当該施設に関する作業船の着岸限界をモデル化した研究も行われている⁽⁴⁾。本研究では、これら先行研究を参照に、1週間先の有義波高、有義波周期ならびに波向きを同時予測し、作業安全性を正確に予測できる運用システムを構築し、外洋の沖合に位置する海洋構造物の最適なメンテナンススケジューリングシステムをモデル化および検証した。

2. ナウファスについて

ナウファスは日本沿岸の波浪を定常観測しており、長期間のデータの統計解析し、各地点の波浪特性を整理する。本研究にて調査対象としたGPS波浪計の設置場所を表2に示す。また、表2に示す設置場所を日本地図上にプロットしたものを図1に示す。図中の青丸がGPS波浪計を表している。

3. 機械学習による波浪予測について

波浪予測手法として、本研究ではLSTM（Long Short-Term Memory）を用いた機械学習を採用する。今回の機械学習では、ナウファスで得られた直近5年間のデータの内、比較的欠測の発生していない2年間をピックアップする。そのうちの1年間を学習データ、残りの1年間を予測データとして機械学習

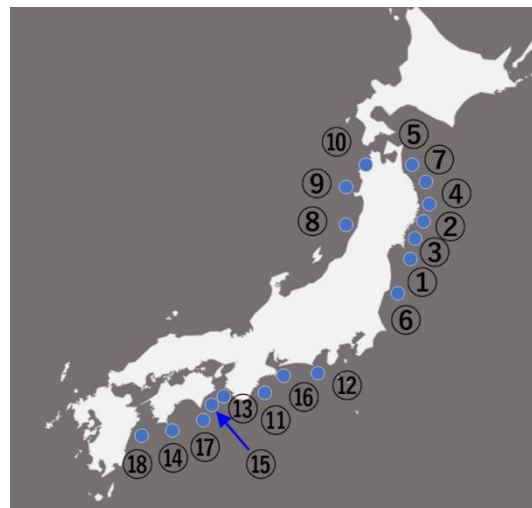


図1 GPS波浪計の設置場所

に適用する。なお、1週間先の有義波高、有義波周期ならびに波向きを予測対象とする。また、波向きに関しては、機械学習の上で0.0度と360度が同一方向であることの認識が難しい。そこで、一度ベクトル領域に変換して機械学習し、予測結果を再変換することで波向きの予測を行うものとする。比較的欠測の少ない表2のNo.3を予測対象海域として選定している。予測した有義波高、有義波周期ならびに波向きを図2に、元データと予測データの相関係数を表3にそれぞれ示す。図2より、有義波高、有義波周期ならびに波向きについて、予測データで元データの傾向を概ねとらえられていることが確認できる。表3より、それぞれの波浪情報の相関係数も0.85以上となっており、非常に強い相関を有していることが把握できる。また、図2中に緑線で表す有義波高1.5mが港湾工事の実施有無の目安とされていることから、有義波高1.5m前後の予測について着目する。ここで、予測上最も避けなければならないのは、有義波高の予測データが1.5m以下であるにもかかわらず、元の有義波高データが1.5m以上となっているケースである。よって、上記のようなケースを有義波高1.5mの予測失敗としてカウントする。図2に示す約1年間の予測データにおける有義波高1.5mの予測失敗確率は2.3%であった。つまり、今回の機械学習による予測において、有義波高1.5mの予測精度としては95%以上の高精度で行えていることがわかる。

表2 GPS波浪計の設置場所

No.	設置場所
1	宮城中部沖(宮城金華山沖)
2	岩手南部沖(岩手釜石沖)
3	宮城北部沖(気仙沼広田湾沖)
4	岩手中部沖(岩手宮古沖)
5	青森東岸沖(青森八戸沖)
6	福島県沖(福島小名浜沖)
7	岩手北部沖(岩手久慈沖)
8	山形県沖(山形酒田沖)
9	秋田県沖(秋田男鹿沖)
10	青森西岸沖(青森深浦沖)
11	三重尾鷲沖(三重尾鷲沖)
12	静岡御前崎沖(静岡御前崎沖)
13	和歌山南西沖(和歌山白浜沖)
14	高知西部沖(高知足摺岬沖)
15	徳島海陽沖(徳島海陽沖)
16	伊勢湾口沖(伊勢湾口沖)
17	高知県東部沖(室戸岬沖)
18	宮崎県日向沖

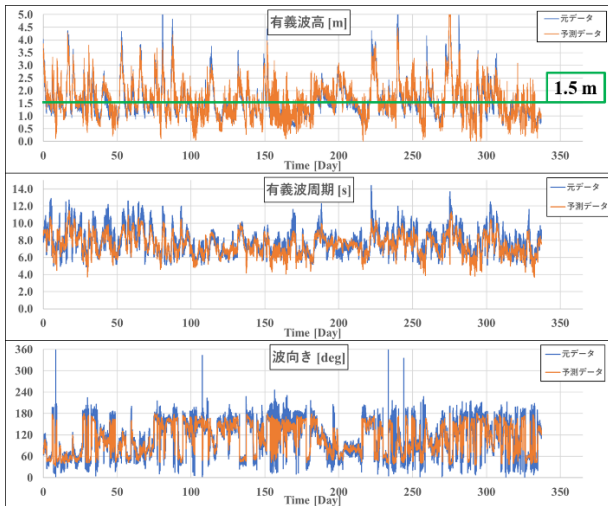


図2 No.3 海域における機械学習による波浪予測

表3 元データと予測データの相関係数

項目	有義波高	有義波周期	波向き
相関係数	0.91	0.85	0.87

4. 作業船の稼働予測

3章で得られた波浪の予測値に対して作業船がどのような運動を呈するかを確認することで、作業船の稼働予測を行う。今回対象とする作業船は先行研究⁶⁾にて線図の公開されていたカタマラン船型の作業船とする。作業船の運動応答は短期予測により求める。波高スペクトルはブレットシュナイダー・光易型を採用し、方向分散についても考慮する。方向分散を考慮する上で方向集中度パラメータ S_{max} については設計参考図書⁶⁾を参考に、波形勾配 $H/\lambda > 0.03$ で $S_{max}=10$ 、 $0.03 \geq H/\lambda > 0.015$ で $S_{max}=25$ 、 $0.015 \geq H/\lambda$ で $S_{max}=75$ として選定している。また、作業船は北を向いていると仮定することで、ナウファスの波向きをそのまま作業船へ入射する波向きとして使用する。作業船の運動応答関数に関しては、ポテンシャル理論に基づく3次元特異点分布法により求めている。元データと予測データの有義波高、有義波周期ならびに波向きを入力値とした短期予測を行うことで、作業船の運動応答の有義値を求めた。その時系列を図3に示す。また、作業船の運動が大きくなると、当該施設への移乗が困難になる。移乗限界となる作業船の運動応答について、経験者にヒアリング調査を行い、暫定的に表4の通り移乗限界となる運動応答値を定めた。図3中の緑線は表4の数値を明示したものである。図3より、元データとの相関が高いことが影響し、6自由度の運動応答が元データのそれと概ね同じ傾向となっていることが確

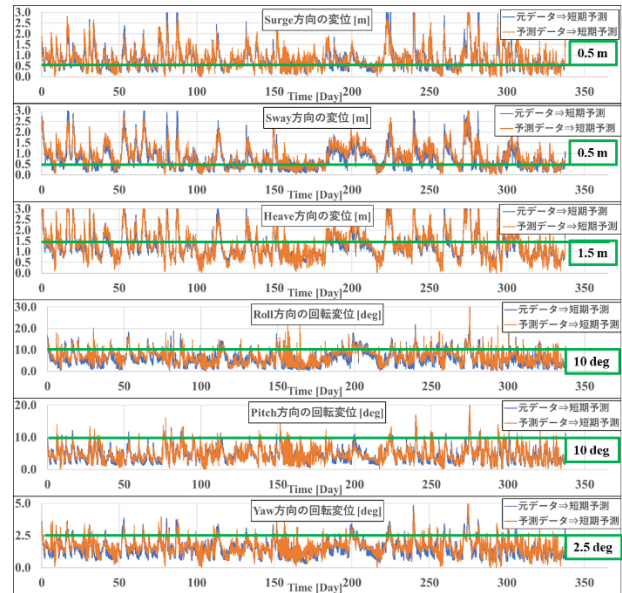


図3 作業船の運動

表4 移乗限界となる運動応答値

Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
[m]	[m]	[m]	[deg]	[deg]	[deg]
0.5	0.5	1.5	10.0	10.0	2.5

表5 移乗不可となる確率

項目	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
元データ	77.4	65.0	26.1	11.5	2.7	8.5
予測データ	73.8	70.2	34.7	11.8	2.9	6.2

認できる。波浪の予測と同様に、それぞれの運動応答で極大値を示すような場合については元データのそれを再現できていない。しかし、今回の研究では、作業船の稼働予測を行うため、極大値が発生するような荒天時については再現性を求めないものとしている。表4に示した作業限界を超えるケースについて元データと予測データそれぞれから求めた運動応答でカウントし、移乗不可となる確率を算出する。それぞれの確率を表5に示す。有義波高に関して、1.5mを超える確率は元データで40.6%、予測データで51.0%であるため、表5で表したそれぞれの確率と10%以上の乖離が見られる。当然ながら、作業船に入射する波の有義波周期および方向により作業船の呈する運動応答は大きく変化するため、有義波高のみで作業限界を判断することは難しいと推測される。移乗不可となる確率が運動応答により大きく異なる点、表4に示した移乗限界となる運動応答

値の確からしさ、およびそもそも作業限界の波浪条件として有義波高 1.5 m を目安として良いのか等について考察を行っていく。

no.1130, TuDelft, 1998.

(6) 水産庁：漁港・漁場の施設の設計参考図書(2015年版)_第2編の1, pp.53-54, 2015.

5. 結論と今後の課題

本論の結論と今後の課題として以下の知見が得られた。

- (1) ナウファスデータの内、1年間を学習データとし、次の1年間を予測用データとして機械学習により有義波高、有義波周期および波向きの波浪予測を行った。その結果、元データと予測データの波浪情報についてそれぞれの相関係数が 0.85 以上となり、強い相関を確認できた。
- (2) 有義波高 1.5 m の予測失敗確率については、今回の波浪予測では 2.3%となるため、有義波高 1.5 m の波浪予測としては 95.0%以上の精度があると言える。
- (3) 機械学習により得られた波浪情報を入力値とした短期予測による作業船の運動応答を算出した。波浪予測の精度が高いこともあり、元データを使用した場合と予測データを使用した場合で概ね同様の運動応答の傾向を得ることができた。
- (4) 経験者へのヒアリングにより、6自由度運動に関する作業船からの移乗限界を暫定的に設定した。
- (5) 移乗不可となる確率が運動応答により大きく異なる点、表4に示した移乗限界となる運動応答値の確からしさ、そもそも作業限界として有義波高 1.5 m を目安としてよいのか等について考察を行い、講演会や本論文にて説明する。

参考文献

- (1) 野口哲史：洋上風力建設のための拠点港湾のあり方について、洋上風力官民協議資料 4-2, 2020.
- (2) 井手喜彦：海上工事における施工可否判断の高精度化を目的とした機械学習の適用，第46回海洋開発シンポジウム 特別セッション S-1 資料，2021.6.30.
- (3) 国土交通省全国港湾海洋波浪情報網ナウファス、<https://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/index.html> , 2024.3.6.
- (4) 高木健：CTV から浮体式変電所への作業員移乗に関する研究，日本船舶海洋工学会講演論文集 第35号, pp.397-401, 2022.
- (5) Ir. Riaan van 't Veer : Experimental results of motions, hydrodynamic coefficients and wave loads of the 372 catamaran model in head and oblique waves, Report

地震津波来襲を想定した港湾における中小型船の 在船状況に関する一考察

正会員 ○榊原 繁樹（東海大学） 正会員 木村 安宏（大島商船高等専門学校）
正会員 笹 健児（神戸大学） 正会員 矢野 吉治・久保 雅義（神戸大学名誉教授）

要旨

港湾における地震津波来襲時の緊急対応の態勢について、定係港停泊中における中小型練習船と実習船等を対象にアンケート調査を実施した。その結果、先の東日本大震災発災後に日本海難防止協会が関係船舶を対象に実施した在船状況の調査に比べて、これらの船舶では在船者なしの割合が高く、たとえ在船者がいても、個々の船舶における最低運航人数に対してその員数が下回り、状況次第では地震発生直後の津波来襲に際して即座の対応が困難な場合があり得ることがわかった。

キーワード：海洋工学、防災・減災、練習船、地震、津波

1. 研究目的

2011年3月11日14:46に発生した東北地方太平洋沖地震・津波の発生から10年が経過し、その地震動や津波高さ⁽¹⁾⁽²⁾、および港内で被災した岸壁係留船の状況や港外退避などの避難行動がまとめられた⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。一方、国土交通省「海・船の視点から見た港湾強靱化検討委員会」が開催され、切迫する南海トラフ地震や日本海溝・千島海溝沿いの大規模地震による津波来襲に対して、原則として港内船舶は迅速に「沖合退避」し、併せて入港着棧時の「出船係留」が推奨された⁽⁶⁾。また東日本大震災で影響を受けた大小100隻を超える船舶の海事関係者に対する前述のアンケートおよびヒアリング調査⁽³⁾から発災時の港内船舶の在船状況などがまとめられた。

図1に示すように、発災時において総乗組員数の半数以下の在船が20%程度で、全体の13%の船舶が無人の状況であった⁽³⁾。在船人数がほぼ充足されていたのは荷役目的で入港中の内航・外航商船でその割合が67%であった。荷役目的以外で定係港に停泊または専ら昼間のみ稼働する中小型船では夜間や休日における在船者を最小限あるいは無人にしていたと推察される。万一、通常勤務時間帯外に緊急呼集に続いて緊急出港しようとする場合、状況次第では、補機関の始動から主機関の発動準備を含めて出港準備にある程度の時間を要して、発災前の対応に遅れが生じる恐れがある。併せて、津波来襲後に無人の中小型船が港内を漂流するようなことがあれば、他の沖合退避船の緊急出港や港内移動の妨げ、また漂流物との接触等による副次的な災害も想定される。

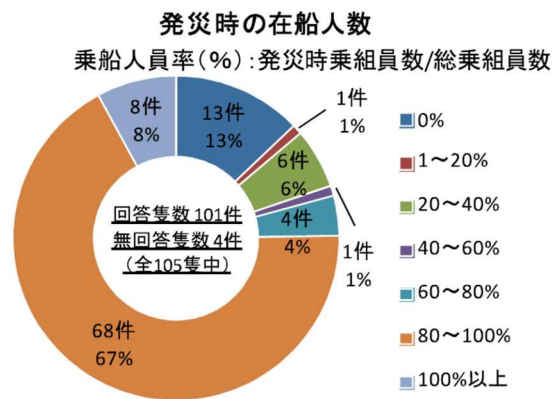


図1 発災時の在船状況（漁船を除く）⁽³⁾

そこで本研究では、定係港に停泊する中小型練習船と実習船等における運航要員の在船状況や地震津波への対処方針等についてアンケート調査を実施し、現状の把握を行うと共に、検討すべき課題の抽出を試みる。そして地震津波来襲時の船舶の保全に向けた啓発に資することを当該研究の目的とする。

2. 研究内容

海事・水産系の大学、大学校、商船高等専門学校、高等学校、海技教育機構の他、海上保安庁等の全60団体⁽⁷⁾⁽⁸⁾にアンケートへの回答を依頼し、定係港停泊中における要員の在船状況や津波等の来襲が想定される地震発生時に対応したマニュアルの有無など、現状における全体的な傾向を捉えることに主眼をおき、現状分析を行った。アンケート調査の主な質問事項を以下に列挙する。

- ①アンケート回答者情報（組織・団体名、役職名、氏名、連絡先）
- ②回答対象船舶の要目（船名、総トン数、全長、最大収容人数、満載喫水、バース名、スラスタ装備の有無）
- ③使用バースでの通常の係留方法（入船係留または出船係留）
- ④入港限界基準の有無とその内容
- ⑤通常の停泊当直体制について（停泊当直の人員体制、在船人数）
- ⑥地震・津波発生時の停泊当直体制について（本船および在船者の地震・津波発災時の避難マニュアルの有無とその内容、乗組員不在時に発災した場合の対処マニュアルの有無とその内容）
- ⑦地震・津波の発生を想定した操練について（操練の有無、頻度、内容）
- ⑧使用バースを取り囲む防潮堤の地震・津波外力による倒壊可能性の有無、使用バース・防潮堤の津波越流可能性の有無
- ⑨使用バースの耐震構造の有無
- ⑩地震や津波に対する船舶防災に関する意見

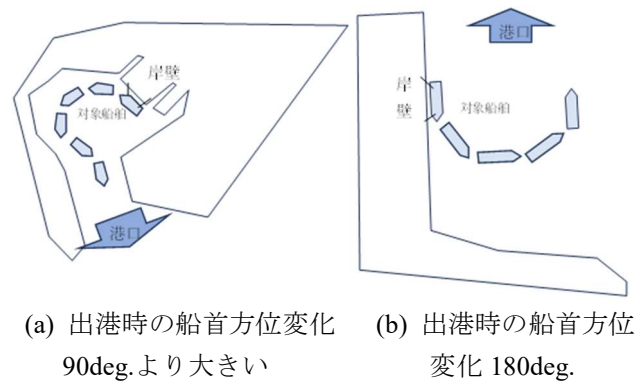


図2 入船係留

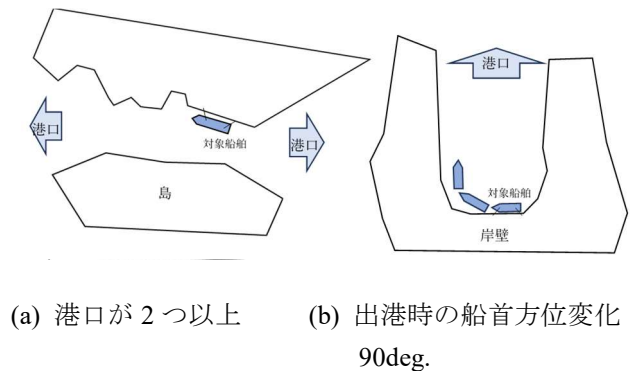


図3 出船係留

またアンケートにより収集した各船舶の停泊地については Google Map を用いて個別に確認し、港湾形状や当該停泊地の港内配置から港口に対する船首方位を基に出港時の回頭角度を推定して入船・出船係留を再定義した（図2および図3）。加えて、緊急出港に際しての最低運航人数や主機関等の使用に要する時間などの具体的な事柄について、別途個別にヒアリングを行い、南海トラフ巨大地震の予想津波⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、または東日本大震災での実測津波⁽¹⁾⁽²⁾の津波高さや津波到達時間（津波特性）と在船人数の実情とを照合する等、巨大地震津波の来襲に対する緊急対応の可否の検討を含み、現状における実態を把握して課題の抽出を行った。

3. 主要な結論

(1) アンケートへの回答を依頼した60団体の内、36団体39隻からの回答を得た。図4に総トン数ごとの隻数を示す。総トン数601～700トンが8隻と回答が最も多く、次いで1～100トン、201～300トンがそれぞれ6隻あった。なお501～600トンおよび701～800トンの回答はなかった。これらの内、1～100トンは概ね4級海技士の養成機関からの、また101～700トンは水産・海洋系高等学校と商船高

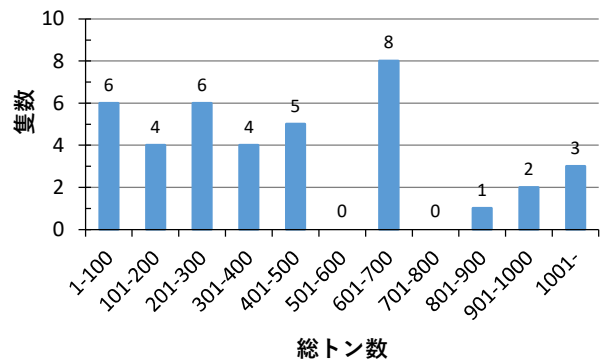
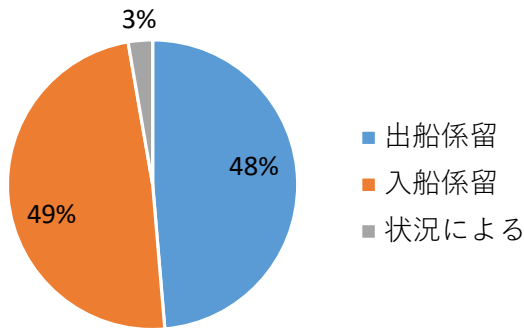


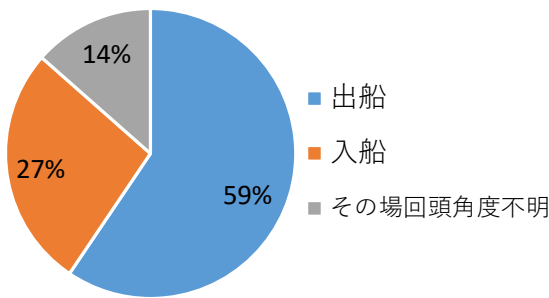
図4 対象船舶の総トン数

等専門学校が回答の過半数を占めた。801トン以上は全て3級海技士の養成機関である商船系大学と大学であった。

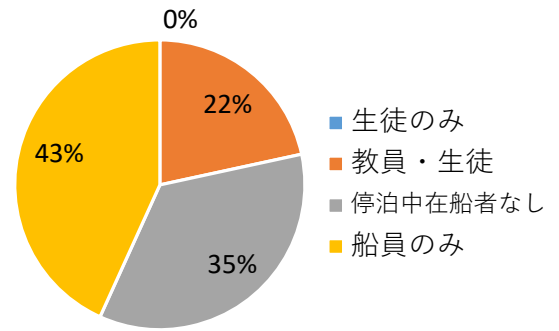
(2) 図5に係留方法（入船・出船係留）を示す。図5(a)は回答結果をそのまま示すが、入船係留と出船係留の状況はほぼ同数であった。図5(b)では当該港湾内における停泊地の配置から、出船係留ができる可能性を有するとしてカウントし直した結果を示す。停泊地を特定できず回頭角度を推定できなかった船舶の割合は14%あったが、船首を港口に向けて出船係留とみなした船舶の割合は、その可能性を含めて6割近くになった。東日本大震災における着積状況のアンケート調査結果では総トン数50,000ト



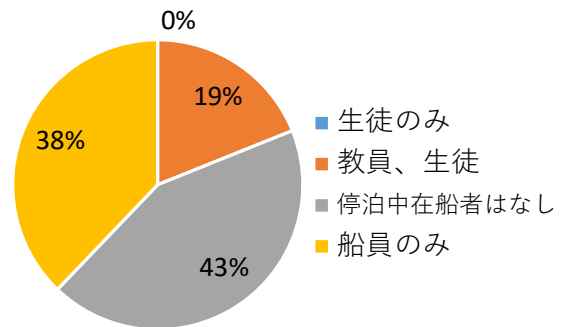
(a) アンケート結果



(b) 出港時の回頭角度を推定して再定義の場合
図5 係留方法（入船係留・出船係留）



(a) 平日昼間

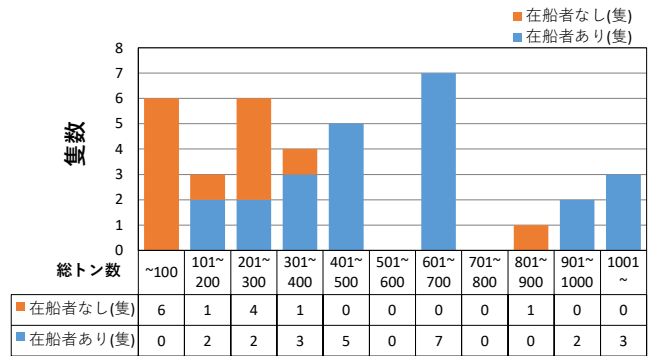


(b) 平日夜間・休日
図6 停泊中の在船状況

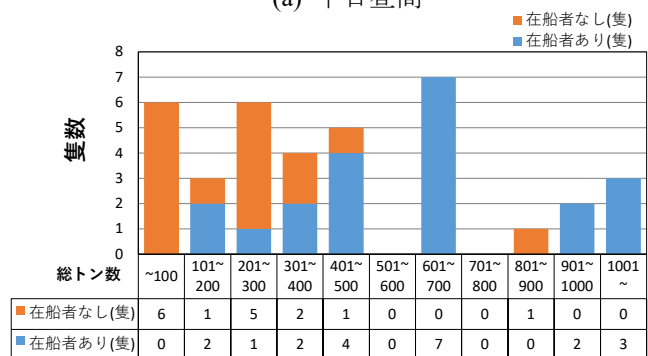
ン以上の全ての船舶（5隻）⁽³⁾において、またVLCCとLNG船を対象とした調査結果では約80%⁽¹²⁾が入船係留であったのに対して、今回の調査では中小型船の出船係留の割合が多いことが確認できた。

(3) 図6および図7は定係港に停泊中の在船状況である。図6(a)は平日昼間の在船状況を示すが、日本海難防止協会による前述の調査結果では「在船者なし」の割合が13%⁽³⁾であったのに対して、本調査では35%と高い割合となった。図7(a)に総トン数ごとの在船状況を示す。100トン以下では全ての船舶において「在船者なし」の状況が把握できた。図6(b)は平日の夜間および休日の在船状況を示し、「在船者なし」の割合は43%であった。また図7(b)に示すように総トン数201~500トンで「在船者なし」の割合が高いことがわかった。

(4) 図8は平日昼間の定係港停泊中における緊急出港を想定した最低運航人数と在船者数の関係を黒丸印で示す。在船者数と最低運航人数の双方の回答があった18隻を含む。図中に45度の破線を付記したが、当該斜線の上部左側は在船者数が最低運航人数を下回っている場合を示し、本船に在船者があつたとしても、補機関と主機関の始動や離岸手配等の一連の作業が通常時の手順に比べて直ちにできない



(a) 平日昼間



(b) 平日夜間・休日

図7 停泊中の在船状況（総トン数ごと）

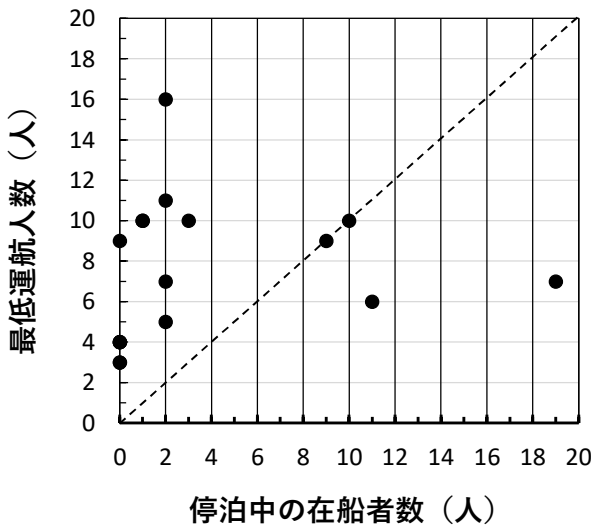


図8 在船者数と最小運航人数（平日昼間）

ことを示す。なお回答中、在船者数がゼロで最低運航人数が3人の場合が2例、在船者数ゼロで最低運航人数4人の場合が4例および在船者数1人で最低運航人数10人の場合が2例あり、これらでは黒丸が重複している。岸壁停泊中の在船なしの割合が高いだけでなく、在船者があつたとしても、緊急出港に必要な最低運航人数が確保されていない状況がほとんどであった。平日夜間・休日では全て上部左側の領域となる。加えて、在船者を置く目的が「停泊中の保安」との記載が多くみられた。このような実情から、地震津波の来襲に対して警戒し初動体制は確立しているものの、状況次第では緊急出港への即座の対応が困難であることがわかった。

参考文献

- (1) 高橋重雄他：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報，港湾空港技術研究所資料，第1231号，p.200，2011.
- (2) 宮島正吾他：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震による港湾施設等被害報告，港湾空港技術研究所資料，第1291号，p.3330，2015.
- (3) (社)日本海難防止協会：2013年度大地震及び大津波来襲時の航行安全対策調査報告書，p.191，2014.
- (4) 国土交通省近畿運輸局：津波に遭遇した船の行動事例集～東日本大震災で津波に遭遇した船のその時の行動に学ぶ～，2011.
- (5) 榊原繁樹・阿部郁男・久保雅義・津金正典：東日本大震災における津波観測および港内係留船の被害実態調査に基づく係留限界津波高さの推定，日本航海学会論文集，第136巻，pp.33-43，2017.
- (6) 国土交通省港湾局：海・船の視点から見た港湾強靱化検討委員会，
https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk7_000026.html，2022.
- (7) 学会誌編集委員会：特集 練習船，日本船舶海洋工学会，KANRIN，第105巻，pp.1-28，2022.
- (8) 水産研究・教育機構広報誌編集事務局：特集 調査船・練習船，国立研究開発法人水産研究・教育機構，FRA NEWS，第74巻，p.23，2023.
- (9) 海上保安庁海洋情報部：津波防災情報，
<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/tsunami/>，2023.
- (10) 内閣府：南海トラフの巨大地震による都道府県別市町村別最大津波高一覧表 PDF，平成24年8月29日.
- (11) 内閣府：南海トラフの巨大地震による都道府県別市町村別津波到達時間一覧表 PDF，平成24年8月29日.
- (12) 木村安宏・笹健児・原大地・久保雅義：津波来襲を想定した船舶の緊急対応および港湾施設に関する現地調査，日本航海学会論文集，第147巻，pp.1-8，2023.

韓国の海洋警備法改正が日本の竹島哨戒活動に与える影響

- 韓国の MDA（海洋状況把握）が目指すもの -

正会員 野中 健一（海上保安大学校）

要旨

2023年1月、韓国の海上法執行機関たる海洋警察庁（Korea Coast Guard）が「2022年自体評価結果報告書」⁽¹⁾を公表した。そしてその際、彼等は海洋警備法の改正を志向していると論じたのだった。ここで注視すべきはその理由である。同庁はMDA（Maritime Domain Awareness／海洋状況把握）構築の為、各政府部署が有する海洋関連情報を活用する法的根拠を必要としており、その点を海洋警備法に明記したいと説明したのだった。

上記が意味するところは極めて大きい。海洋警備法は同国のMDA関連政策を確認する事なしに理解困難となった為である。本稿は先行研究で扱われてこなかった韓国のMDA関連政策に焦点を合わせつつ、海洋警備法の理解を試みる。そして本稿はかかる作業を通して、同法改正作業が日本の竹島哨戒活動に影響を与えてしまう事を明らかにする。海洋警備法研究はその対外的影響をも考察すべき段階を迎えたのである。

キーワード：海上保安、韓国、竹島、海洋警備法、MDA（海洋状況把握）

1. 研究目的及び研究方法

1.1 はじめに

海洋警備法の第一条を確認したい。そこに同法の目的が記されているのである。「この法は警備水域での海洋安保確保、治安秩序維持、海洋水産資源及び海洋施設保護のため、海洋警備に関する事項を規定することにより、国民の安全と公共秩序の維持に貢献することを目的とする」。当然の事ではあるが、当該法律は韓国をめぐる海洋問題を論じる際、極めて重要なものとなる。

さて、同法研究は主に韓国の研究者の間でなされてきており、彼等は海洋警備法が抱える問題点等を明らかにして来た⁽²⁾。ただその視点は、海洋警備法が定めた目的をより効果的に遂行するために必要となる改善策を論じるものが多かったと言える。彼等の視点は韓国国内に留まるものであり、同法が外国に与える影響を論じるものではなかった。

1.2 研究の目的及び方法

海洋警察庁がMDA構築のため、海洋警備法の改正を目指している。海洋警備法はもはや韓国のMDA関連政策を検討する事なしに理解できなくなったのだった。本稿は同国のMDA関連政策に焦点を合わせつつ、海洋警備法の理解を試みる。その結果、同法の改正作業が竹島周辺海域において哨戒活動を実施している海上保安庁に一定の影響を与える事が確認さ

れた。本稿はこの点を明らかにする。

2. 韓国の MDA

2.1 MDA 担当部署としての海洋警察庁

日本政府はMDAを「海洋の安全保障、海洋環境保全、海洋産業振興及び科学・技術の発展等に資する海洋に関連する多様な情報を、取扱等に留意しつつ効果的な収集・集約・共有を図り、海洋に関連する状況を効率的に把握すること」⁽³⁾と定義している。また彼等は日本が有する各種アセットを動員し - すなわち省庁横断で - 海洋における諸状況を把握しようとしているのである。ただ、このような政府一丸の海洋政策を想起してしまうと韓国のMDAを誤解してしまう。確かに同国も海洋における諸状況の把握を目指していた。しかし韓国のMDAは海洋警察庁という一省庁の政策として始まったのである。

2020年1月、趙顯培海洋警察庁長が「新年の辞」を発表し、「海洋での安保と安全を中心に、全ての海洋状況を認識し対応する業務体系を構築していきます」⁽⁴⁾と訴えたのだった。また海洋警察庁は同月、「2020年 主要業務計画」も発表しており、そこで「MDA体系を構築」と論じたのである⁽⁵⁾。これを受けて同年7月21日、同庁は庁内に海洋警備企画団という新たな組織を設置したのだった⁽⁶⁾。海洋警察庁においてMDA関連政策を担当する組織が誕生したのである。

2.2 海洋警察庁の政策目的

海洋警察庁は何を目指したのだろうか。実は同庁自身、「限定された警備勢力を効率的に運用」する事を志向しているのである⁽⁷⁾。彼等は政府横断で対処すべき、広範な問題意識を有していたと言い難く、庁内の自己完結的な問題意識を抱えていたのだった。

以上を理解するため、同庁が自らのMDA政策を説明する際に出した数字を確認しておく必要がある⁽⁸⁾。現在も海洋警察庁は航空機、艦艇等を利用した海洋監視活動を行っている。しかし、現状では韓国政府が主張する管轄海域の約16%しか監視できていないと率直に認めたのだった。そしてその際、そもそも一隻の警備艦艇が監視できる範囲は、当該艦艇を中心とした半径44.4キロまでであるとも訴えたのである。

しかし、海洋における諸状況を逐一把握できれば、その情報に基づいた効率的な警備艦艇の配置が可能となる。彼等が抱えている問題関心は、限定された艦艇、航空機をいかに効率的に使用するかという点にあるのであり、このための無人航空機、人工衛星等の利用なのである。そして、これこそが海洋警察庁が称するところのMDAの実態となる。

なお、以上の主張は、彼等の艦艇配置手法に一定の変化を与えるものとなる。海洋警察庁には「海洋警察警備規則」が存在しており、第21条では「警備艦艇の警備区域内の移動は、艦長、艇長の合理的で健全な判断により施行され、それに対する責任を負う」⁽⁹⁾と記されているのである。そしてこれに基づいて警備艦艇の配置、運用は艦長、艇長の経験に依拠してなされる事となる。しかし、彼等が主張するMDAが軌道に乗った場合、海洋関連情報等を分析し、当該海域の実態に応じた艦艇配置を行っていく事となる。海洋警察庁は管轄海域の大半を把握できない状況下、艦長、艇長の経験に基づいて業務を遂行していたわけだが、今後は総合的な情報分析に基づいた艦艇配置を志向する旨、訴えたこととなる。それ故、韓国のMDAとはどこまでも海洋警察庁の問題関心、すなわち非効率的な艦艇配置等を改善し、より効率的な業務を推進するという問題関心に基づいた政策なのである。

2.3 海洋警察庁が把握しようとしている対象物

海洋警察庁は艦艇等の配置、運用の効率化を志向して、広域海洋監視網の構築を目指した。それでは

彼等自身、いかなる懸案事項が存在するのだろうか。この点に関し彼等は「不法操業外国漁船」、「竹島・離於島周辺海域の外国公船出現」、「海洋事故」、「密入国」等を例示していたのである⁽¹⁰⁾。確かにMDA構築により関連情報を入手できた場合、それぞれの事案への対処も相対的に容易になるであろう。しかし、筆者はここで読者に注意を促すものである。彼等は上記四事例を同等水準の懸案と認識していた訳でない。ここで彼等が公表した情勢認識を確認する。

まず海洋警察庁は現在（2021年）、海洋覇権競争の時代にあるとの認識を表明した⁽¹¹⁾。その上で米中対立、そして日米同盟強化に言及しているのである。そして、そのような状況下、各国は海上法執行機関を強化していると分析したのだった。なお、彼等はその理由として以下五点を掲げたのである。

- 一、全面的な軍事紛争の憂慮を最小化する（ため - 引用者注）。
- 二、中国のグレーゾーン戦略（への対応 - 引用者注）（軍では海上民兵等への対応が難しい）。
- 三、国際規範（国連海洋法条約）に基づいた非難を回避する（ため - 引用者注）（軍事的強化より人類普遍的公共価値の強化）。
- 四、国際友軍を確保（するため - 引用者注）（発展途上国を対象に公共外交を強化し、海洋安全保障力量及び海洋情報交流協力を拡大）。
- 五、国家海洋執行力の効率的活用（のため - 引用者注）（海洋安全保障のみならず、災難・安全および治安力量も強化）。

海洋警察庁は、各国が以上五点を目的に海上法執行機関を強化している旨、論じた訳である。さて、ここで彼等の海上保安庁（日本公船）に対する言及、そして海警局（中国公船）に対する言及を確認する。

「（日本は - 引用者注）国家首班を中心に海洋戦略を推進しており、海洋力強化の核心手段として海上保安庁を活用している。2006年の竹島海洋調査紛争後、内閣直属の総合海洋政策本部が出帆した（2007年）。内閣情報会議の海上保安庁追加（2008年）等、国家の総合的海洋戦略を実行している。中国のグレーゾーン戦略に対応する為、東南アジア等の国際友軍確保に海上保安庁を活用している」⁽¹²⁾

「中国のグレーゾーン戦略：海警局を大幅に増強

し、民兵まで活用した海洋戦略を推進している。2013年、国家海警局の出帆後、2018年、武装警察部隊に移管した。大規模勢力の増強等、準軍事組織化し、海警法（管轄範囲の規定無し。攻勢的膨張、可）を制定した⁽¹³⁾

なお、海上保安庁が実行している「国家の総合的海洋戦略」とは「国家安全保障戦略」（2013年）、「海上保安体制強化に関する方針」（2016年）、「海洋状況把握（MDA）体系強化決定」（2018年）等を指している⁽¹⁴⁾。また、東南アジアにおける「友軍確保」に関しても説明を加えておく。彼等はフィリピン（1998年）、台湾（2000年）、マレーシア（2005年）、ベトナム（2013年）、インドネシア（2014年）における海上法執行機関が、日本の影響下で設立されたと捉えているのである。その上で彼等は日本が対中戦略を念頭に、東南アジアを日本側に引き付けようとしていると主張したのだった。

結局彼等は、「海洋覇権時代」という緊張の中、日中の海上法執行機関の役割が増大したと分析したのである。そして、それだけではない。海洋警察庁はその上で、日中韓の海上法執行機関の大型艦、航空機の数を比較する事により、韓国側が劣勢にある点をも示したのである⁽¹⁵⁾。

以上から分かるように、彼等から見ると日中の海上法執行機関は政治的な力を向上させており、かつ保有大型艦数等を見ても韓国より優位にあると分析されているのである。そして、韓国はこのような外国機関の艦艇（巡視船）を相手に、竹島、離れ島それぞれの周辺海域において警備活動を行っている事となる。

彼等のMDAの議論を理解する際、以上の情勢認識等を念頭に置いておかななくてはならない。管轄海域の16%しか監視できていない実態、少ない大型艦、そして高まる日中両国の海上法執行機関の位相。そうであればこそ、いよいよ効率的な艦艇配置が必要なのであり、人工衛星、無人機等はそのための貴重な手段であった。韓国によるMDAとは、このような不利な状況に対処する際の切り札なのである。実際、海洋警察庁は「米中海洋覇権時代（において - 引用者注）、海上法執行機関を全面に出す周辺国の海洋戦略に備え、『MDA体系』を媒介に国家海洋力強化を先導、推進」⁽¹⁶⁾すると論じたのだった。この点から分かるように、彼等のMDAが想定している極めて重要な懸案事項とは「海上法執行機関を前面に出す周

辺国」なのである。

さて、以下はMDA構築により彼等が期待した効果である。そして、それは海洋警察庁の率直な思いを表明したものともなっている。

「2035年まで2個の衛星開発を通して既存の朝鮮半島中心の状況管理を周辺国まで拡大し、広域監視網を運営することにより海洋事故、汚染発生時の正確な位置予測及び周辺国（日本、中国）の警備勢力の動向を常時観察し、先制的で完璧な状況対応体制が準備されるものと期待される」⁽¹⁷⁾

勿論、MDAは「海洋事故」や「汚染発生」対策としても有効である。しかし、彼等の情勢認識を今一度想起する必要がある。日米中を巻き込む現下の緊張した国際情勢が、逆説的ながら海上法執行機関の役割を高めたと言うのである。そうであればこそ、彼等は「周辺国（日本、中国）の警備勢力の動向を常時観察」できる体制の構築を訴えたのだった。

3. MDA構築上の懸案 - 省庁間の情報協力

海洋警察庁は上記を念頭にMDA構築作業に当たっている。しかし彼等自身、懸案がある事も認めているのである。

韓国において論じられているMDAとは、同国政府全体としてどのように海洋における諸事象を把握するか、かつその中で海洋警察庁がどのような役割を果たすべきか、という省庁横断的なものとなっていない。また、彼等の議論は同庁の情報収集能力を強化する事に重点を置いているのであり、日本等のMDAで強く論じられている政府内での情報共有は出遅れている。

例えば2021年、海洋警察庁は公式に、MDAに関する「今後の課題」を明らかにしており、その際、各政府部署内で情報が分散している点を認めている⁽¹⁸⁾。その上で、日本の事例が掲げられており、同国においては各政府機関が情報を共有している点を取り挙げている。そしてその際、それらをまとめる司令塔がある点にも言及したのである。これは逆から論ずれば、彼等は未だにこの分野で懸案を抱えているという事を意味する。

もちろん海洋警察庁自身、政府内において海洋関連情報の共有を全く行っていないわけでもない。例えば海軍とは情報共有を強化する点を議論している⁽¹⁹⁾。しかし、それは日本等の実態からすると極めて

部分的な取り組みに過ぎない。日本等のMDAは政府、民間をも巻き込んだ、極めて横断的な事業なのであり、特定の省庁の力量に頼る政策でない。

4. 考察及び結論

海洋警備法の改正作業に立ち戻りたい。何故、海洋警察庁は同法を改正する必要があったのだろうか。その理由として彼等は、各政府部署が有する海洋関連情報を活用する法的根拠を欲している旨、説明していたのだ。確かに現行法を確認しても、それを根拠づける条文は存在しない。海洋に関する諸情報は韓国政府内の各部署に散在しているものであり、これを集約、融合する必要があったのである。海洋警備法の改正作業とは、彼等自身が従来から懸案として訴えていた、情報面における省庁間の協力促進策だったのである。

韓国のMDAは特定の省庁 - すなわち海洋警察庁 - の政策であり、そうであるが故に、得られる情報は限定的とならざるを得ない。そしてそれは竹島近海に関する諸情報も同様である。しかし、関係省庁間で情報共有が進めば状況が異なってくる。

さて、海上保安庁は定期的に竹島近海で哨戒活動を行っている。そして海洋警察庁は同海域における日本公船の動きを把握しようとしている事を公式に認めている事を再確認したい。彼等の省庁間協力が現在より進めば、今後海上保安庁の竹島哨戒活動は韓国側による一層強い監視の下でなされる事となる。これこそ日本が受ける、同法改正の影響である。

韓国の海洋警備法研究は明らかに新しい段階に入った。従来の研究のようにその条文にのみ注目しては、同法が日本に及ぼす影響を理解できなくなってしまったのである。むしろ海洋警備法の理解を試みる場合、それに関連する政策 - MDA 関連政策 - にこそ注目しないと、その実態を把握できなくなったさえ言い得る。本研究はこの観点に基づいて遂行されたのであり、その結果、日本が受ける影響を明らかにしたのである。

5. 参考文献

- (1) 海洋警察庁：『2022年自体評価報告書』, p. 30, 2023. 1.
- (2) 以下、先行研究を数点あげておく。キム＝ジェウン：「海洋警備法上の海上検問検索に関する研究」, 『警察法研究』, Vol. 12, No. 1, pp. 29 - 57, 2014. 1. キム＝ジョング：「海洋警備法の内

容と問題点に関する考察 - 海洋刑事管轄権の効率化と関連して - 」, 『法学論叢』, Vol. 21, No. 2, pp. 405-428, 2014. 1. なお日本人による同法の解説としては以下がある。仲田紘介：「韓国『海洋警備法』の成立過程と論点について」, 『海保大研究報告』 Vol. 57, No. 2, pp. 239-267, 2013.

- (3) 総合海洋政策本部：『我が国の海洋状況把握(MDA)構想』, p. 1, 2023. 1.
- (4) 海洋警察庁：「新年辞」, p. 5, 2020.
- (5) 海洋警察庁：「2020年主要業務計画」, p. 35, 2020.
- (6) 海洋警察庁：『2020海洋警察白書』, p. 27, 2020.
- (7) 海洋警察庁：『2021海洋警察白書』, p. 33, 2021.
- (8) 同上, p. 32, 2021.
- (9) 海洋警察庁：「国民にもう一步近づく「政府革新執行計画」」, p. 51, 2020.
- (10) 海洋警察庁：「2022年主要業務計画」, p. 73, 2022.
- (11) 政府部署合同：『政府主要政策推進現況及び今後の課題』, p. 328-330, 2021.
- (12) 同上, p. 329.
- (13) 同上, p. 328.
- (14) 同上, p. 329.
- (15) 同上, p. 330.
- (16) 海洋警察庁：『2022年主要業務計画』, p. 84, 2022.
- (17) 大韓民国政府：『2021知能情報化に関する年次報告書』, p. 335, 2021.
- (18) 政府部署合同：『政府主要政策推進現況及び今後の課題』, p. 330, 2021.
- (19) 海洋警察庁：「(報道資料) 海洋警察庁・海軍本部 国家海洋権益保護のため、海洋安保・海洋安全力量、強化する事に」, p. 2, 2022. 8. 6.

6. 謝辞

本研究は日本財団海上保安研究基金の援助を受けている。公益財団法人日本財団、公益財団法人海上保安協会、海上保安庁、海上保安大学校等における全ての関係者に厚く御礼申し上げる次第である。