

13 航行妨害ゾーン（OZT）可視化による 避航判断支援システムの開発

知識・データシステム系 * 佐藤圭二, 澤田涼平, 福戸淳司

1. はじめに

安全航行のための装置として、自動衝突予防援助装置（ARPA: Automatic Radar Plotting Aid）や、自動船舶識別装置（AIS: Automatic Identification System）が導入されている。しかし、日本国内での過去5年間における衝突事故は2339件発生しており¹⁾、その原因の多くが見張り不十分や、操船不適切となっている。また、世界全体で見ても、船舶事故は半数以上の原因が人為的要因であるとの報告がある²⁾。ARPAでは最接近距離（DCPA: Distance to the Closest Point of Approach）と最接近時間（TCPA: Time to the Closest Point of Approach）を元に警報を発報するが、具体的にどのように避けるべきかを提案せず、また、コースの変更によって変化する衝突の危険性を見積もることが難しい。この問題に対し、衝突回避支援のアルゴリズムはいくつか提案されており、DCPA, TCPA や安全航過距離を用いるものや、知識ベースで評価するもの、避航経路を計算するものなどがあるが、直感的にどの程度危険なのかを把握することは難しい。Bartosz³⁾らは、レーダー上に安全な方位を示す手法を提案しているが、あくまでも方位を示すのみで、右転してから左転するなどの2段階先、3段階先までの避航計画を考慮することは難しい。

そこで、本研究では、船員の運航支援装置として、航行妨害ゾーン（OZT: Obstacle Zone by Target）を用いた表示装置を開発した。初心者4名と熟練者4名で構成される被験者の協力を得て、海上技術安全研究所が所有する操船リスクシミュレータを用いた評価実験を行い、プロトタイプの有効性を検証した。本稿ではその検証結果について報告する。

2. 線分によるOZT表現

今津⁴⁾により提案された線分OZTについて述べる。図-1に自船の採るべき針路（ここではこれを衝突針路と呼ぶ）の求め方を解説する。図には自船の占有空間と相手船の占有空間を、それぞれ破線の円で示しており、この二つの円が接するときの両船距離間隔を安全航過距離（PD: safe Passing Distance）とする。

ここで衝突針路を求める手順は以下の通り。

- ① 自船Oを中心に半径PDの円を描く
- ② 相手船の位置Tからこの円に接線 P_1T , P_2T を描く
- ③ 相手船の位置Tから相手船の運動ベクトルに応じたベクトル $B_P T$ を相手船の位置がベクトルの先端になるように引き、点 B_P を決定する

- ④ B_P を中心として半径が自船速力の円を描き、この速力円と、さきほどの接線 P_1T , P_2T との交点を Q_1 , Q_2 とする
- ⑤ 自船が $B_P Q_1$ の針路(C_1)で進むと、その時の相対針路は $Q_1 P_1$ となり、相手船Tが P_1 点に到達する時間 $TCPA_1$ は $Q_1 T$ の速力で TP_1 の距離を航走する時間となる。同様に $TCPA_2$ も求める。このときの C_1 , C_2 が衝突針路である

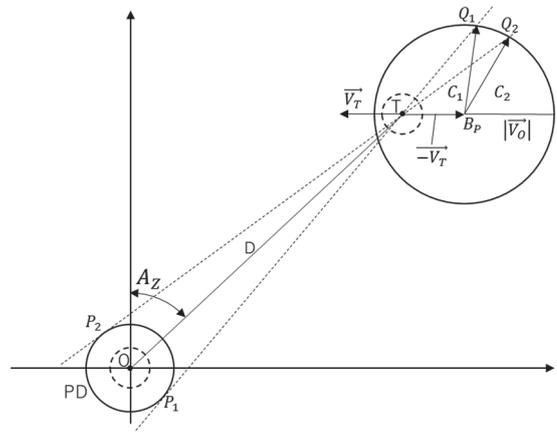


図-1 衝突針路計算図

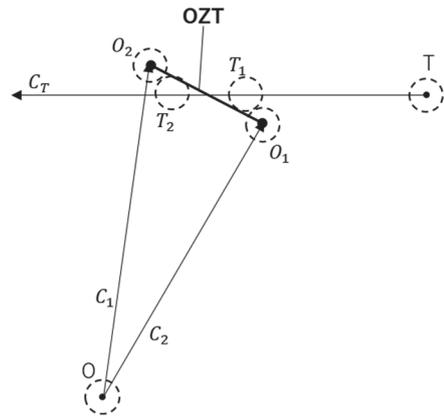


図-2 OZT計算図

この衝突針路を求めるために、以下の手順で計算をおこなう。まず、Tから引いた接線の角度 α は、相手船の距離をDとすると、

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{PD}{D} \tag{2.1}$$



図-3 OZT 表示装置

$B_p Q_1$, $B_p Q_2$ の向きを衝突針路 C_0 , 相手船の方位を Az , 針路を C_T , 速力を V_T とすると, 速力三角形における正弦法則から, 次の関係が成立する.

$$\frac{\sin(Az \pm \alpha - C_0)}{V_T} = \frac{\sin\{C_T - (Az \pm \alpha - C_0) - \pi\}}{V_O} = \frac{\sin(Az \pm \alpha - C_T)}{V_O} \quad (2.2)$$

$$C_0 = Az \pm \alpha - \sin^{-1} \left\{ \frac{V_T}{V_O} \sin(Az \pm \alpha - C_T) \right\} \quad (2.3)$$

図-2 はそれぞれの船が $TCPA_1$, $TCPA_2$ の時間航走した後 に到達する場所を示している. ここで T_1 , T_2 は, T船がT船の針路上を $TCPA_1$ 及び $TCPA_2$ 航走して到達する位置にT船占有空間の円を描いている. また, O_1 はO船が衝突針路 C_1 上を $TCPA_1$ 航走して到達する位置を示している. OZTは O_1 と O_2 を結ぶ線で表現することができる.

3. OZT 表示装置

図-3 にOZT表示装置プロトタイプ画面を示す. 自船の位置情報である GPS 情報や, 相手船のAIS情報はLAN経由でUDP通信により取得する. また, 左下の画像は IP カメラによりLAN経由で取得し, 描画する. OZT景観画像は自船の船橋からの視点でOZTを描画する表示方法で, 横軸は自船の針路を中心とした方位を, 縦軸は自船からの距離を表している. また, レーダー画像は一般のレーダー画面と同様のPPI (Plan Position Indicator) 表示による表現方法で, 自船

を中心に Head Up で相手船と OZT を描画する. OZT は, 相手船の相対針路に応じて色を分けて表示する. 具体的には, 左から右に航行する船, 右から左に航行する船, 追越し船, 行会い船の4種類で色分けする. また, レーダー画像でも同様に描画する. OZT の中心点から相手船の進路に沿って, 設定した前方航過距離を線で描画する. 景観図, レーダー画像ともに船舶シンボルをクリック, または各船舶の OZT をクリックすることで, 選択した船舶の詳細情報を画面に表示する. OZT 表示装置を操船リスクシミュレータ内に設置した様子を図-4 に示す. OZT 表示装置は Windows タブレットで動作し, 手軽に手でタッチ操作が可能になっている.

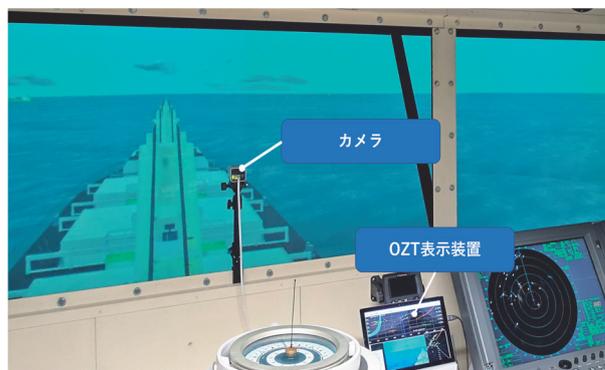


図-4 OZT 表示装置 設置状況

4. 実験

4.1 実験概要

OZT表示装置の有効性を検証するために、海技研で作成したOZT表示装置のプロトタイプを対象に、海技研所有の操船リスクシミュレータを用いて被験者実験を行った。被験者は、初心者として三級海技士の免状を持つ学生4名と、熟練者として操船経験のある4名の、計8名で実施した。機能の評価は、各種シナリオにおけるシミュレーション終了後、評価票とインタビューによる主観的評価を行った。

実験に際しては、船舶とOZT表示装置の操作に慣熟するために、最初は1対1のケース、次に幅狭海域でのケースで慣熟操船を行い、その後シナリオ1からシナリオ4までOZT表示装置の支援なしと支援ありで実験を行った。被験者1名に対し、OZTありとOZTなしのシナリオを2ケースずつ、合計4ケースの操船を実施した。シナリオの難易度による評価への影響を考慮するため、各シナリオは4名をOZT表示装置ありで、残りの4名をOZT表示装置なしで実験を行った。

シナリオの例として、図-5にシナリオ1の状況を示す。中心の1番の船が自船、その他の番号の船が相手船の初期位置、各船から伸びる緑線が各船の速度ベクトル、赤線とそれを囲む円がOZTの線分とOZTを囲む包絡線を示している。なお、OZTはシナリオ開始時の時刻で位置となっている。前半で数隻避航し、その後東西に流れる交通流を横切るというシナリオになっている。シナリオ2~4も同様のシナリオになっている。

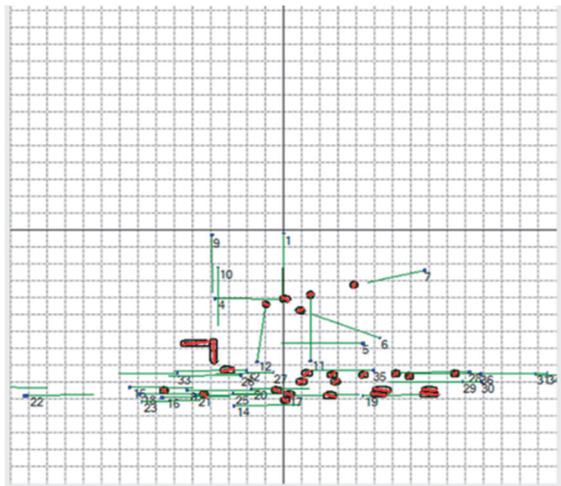


図-5 実験シナリオ1

4.2 解析手法

各種シナリオにおけるシミュレーション終了後、以下に述べるNASA-TLX, SUS, 航跡比較とインタビューによる評価を行った。

- NASA-TLX: The NASA Task Load Index
NASA-TLX⁵⁾はThe NASA Task Load Indexの略で、主観的

なメンタルワークロードの評価手法であり、アンケートに答えることで6項目(知的・知覚的要求(MD: Mental Demand), 身体的要求(PD: Physical Demand), 時間圧力(TD: Temporal Demand), 努力(EF: Effort), 作業成績(OP: Own Performance), フラストレーション(FR: Frustration))について、「低い-高い」を両極とする数値を用いて算出し、最終的に0~100の値で評価できる。

- SUS: System Usability Scale

SUSとはSystem Usability Scaleの略で、1986年のDECのJohn Brookeが発表したもので、ユーザビリティの受け止められ方を測定、指標化するものであり、10の質問に答えることで最終的に0~100の値で評価できる。SUSのデータと様々な満足度尺度との関連ととりまとめた研究⁶⁾があり、図-6に満足度スコアとの対応を示す。

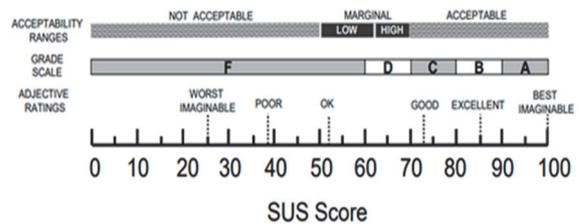


図-6 SUSスコア

5. 解析結果

5.1 NASA-TLX

図-7に各被験者のNASA-TLXのスコアを示す。結果の平均値と95%信頼区間を示しており、それぞれ灰色がOZT表示装置なし、黒がOZT表示装置ありのケースを示している。初心者と熟練者を比較すると、初心者の操船の精神負荷が大幅に低下していることが分かる。ただし、被験者4に関してはほとんど差があらわれず、若干の上昇が見られた。また、熟練者に関しては、負担が減った被験者と増えた被験者とに分かれており、その差も初心者に比べると少なかった。

図-8, 図-9に初心者と熟練者のNASA-TLXの各尺度の平均値を示す。灰色がOZT表示装置なし、黒がOZT表示装置ありのケースを示しており、各尺度は、知的・知覚的要求(MD), 身体的要求(PD), 時間圧力(TD), 努力(EF), 作業成績(OP), フラストレーション(FR)を示す。初心者については全ての尺度でスコアが下がっており、負担軽減効果があったと考えられる。一方、熟練者については努力の項目以外は増加していた。これは、普段からARPAと目視による操船で十分に避航行動が取れており、追加で情報表示装置を使用する事で、負担が増加してしまったのだと考えられる。実験後の熟練者へのヒアリングでは、OZT表示装置で得られる情報とARPAで得られる追加の情報を頭の

中で一致させるのに若干時間がかかったとのコメントがあった。ただし、実験終了時には OZT 表示装置と ARPA の役割分担がある程度確立されてきて、精神的な負荷が減ったとのコメントもあった。

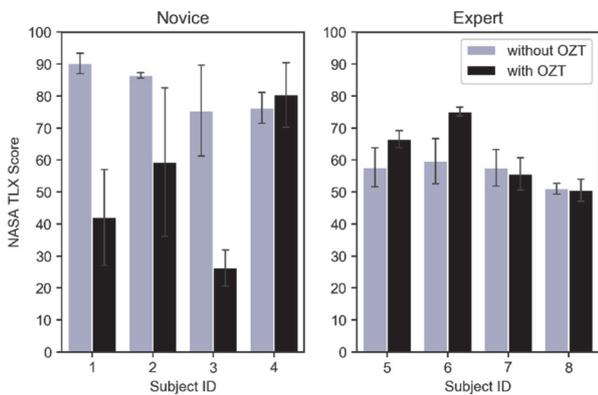


図-7 NASA-TLX スコア

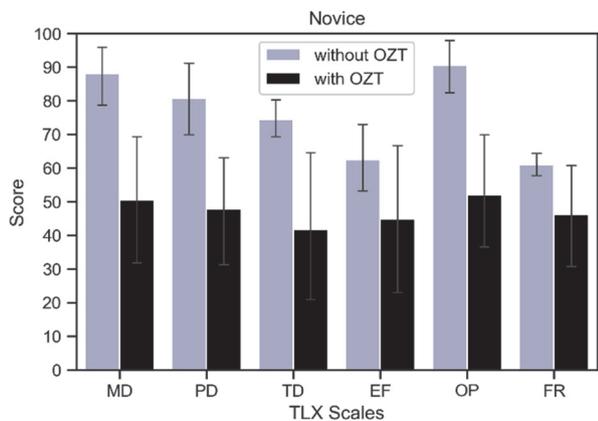


図-8 NASA-TLX スコア：被験者平均（初心者）(n=4)

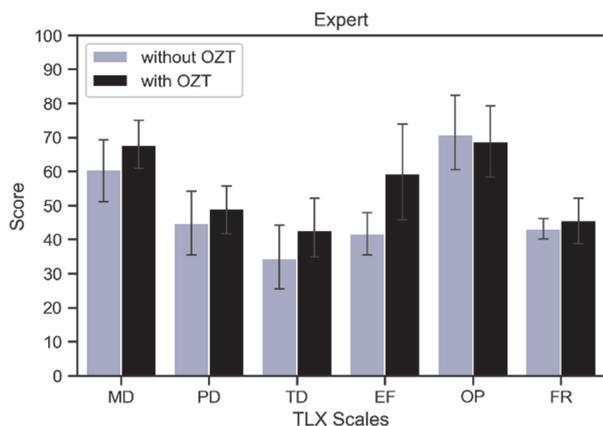


図-9 尺度別 NASA-TLX スコア：被験者平均（熟練者）(n=4)

5. 2 SUS

図-10に、それぞれ初心者と熟練者の SUS スコアを示す。左が初心者、右が熟練者のスコアを示している。初心者、熟練者問わずほとんどがスコア 50~60 となっており、比較的可受容できるレベルで OZT 表示装置を使いこなしていたこと

が分かった。一方で、初心者の被験者 4 に関してはスコアが 50 を切っており、OZT 表示装置に十分慣れることができなかったと考えられる。その結果、OZT 表示装置の情報が十分に活用できず、かつ普段の操船作業も加わったことから NASA-TLX のスコアが高く、主観的な精神負荷が高くなっていったのだと考えられる。また、熟練者の被験者 5 へのヒアリングでは、普段から ARPA を見ているため、景観図という新しい表示方法に慣れるためには実験の最後まで時間がかかったとのコメントがあり、そのために SUS スコアが下がったのだと考えられる。使用感に関して、熟練者にどの程度使用すれば慣れるかと聞いたところ、多くは 1, 2 日程度あれば十分使いこなせるだろうとのコメントが得られた。

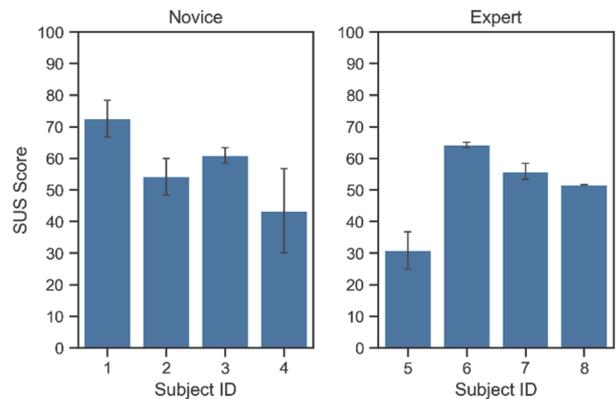


図-10 SUS スコア

5. 3 航跡比較

OZT 表示装置の有無で軌跡がどのように変化するかの分析を行った。図-11、図-12 にシナリオ毎に OZT 表示装置のありとなしのケースを初心者（灰色）と熟練者（黒）で色分けした図を示す。OZT 表示装置なしの場合は各被験者の航跡がバラバラだったのに対し、OZT 表示装置ありの場合では、航跡が非常によくまとまっていることが見てとれる。また、OZT 表示装置なしの場合は途中で数回大きく変針しているが、OZT 表示装置ありの場合は、前半で大きく変針した後は微修正程度の操船になっていることが分かる。このことから、OZT 表示装置を使用することで避航操船の判断が早まったと考えられ、実験後のヒアリングでは、数名の被験者からは普段よりも先の状況を考慮して操船できたとのコメントがあった。

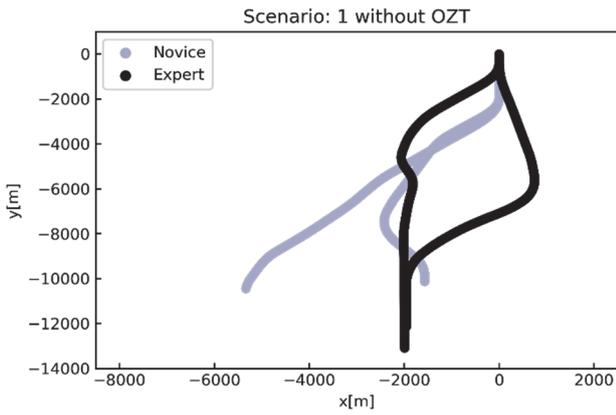


図-11 航跡：シナリオ1 OZT表示装置なし

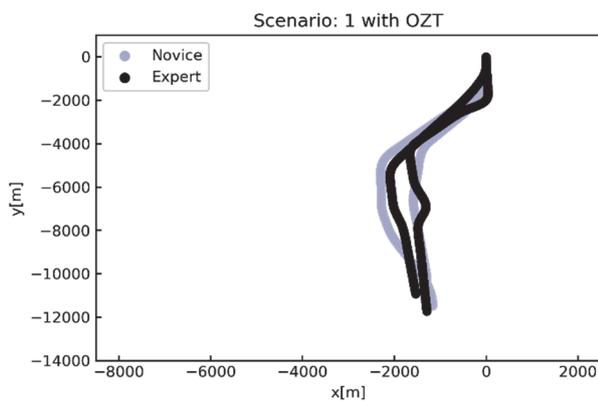


図-12 航跡：シナリオ1 OZT表示装置あり

6. まとめ

本研究において、線分による OZT 表示を用いた表示装置のプロトタイプを作成し、操船リスクシミュレータによる被験者実験を行い、NASA-TLX や SUS による主観的な評価と、ヒアリングによる調査を実施した。その結果、OZT 表示装置は操船経験の浅い被験者に対して、主観的な精神負荷を低減させる効果が高い事が分かった。また、熟練者においても、普段の操船に新たな装置が加わるため、習熟に時間はかかるものの、操船判断に役立つ情報を提示できることが分かった。航跡に関しては、OZT 表示装置を導入することで航跡のばらつきが少なくなるとともに、変針の回数が減少し、より安定した航跡となっていた。今後、ヒアリングなどにより挙げられた改善点の充実などによって、さらに使い勝手が良いシステムの開発を目指す。

謝辞

本研究は、株式会社商船三井、商船三井テクノトレード株式会社、東京海洋大学との共同研究により実施しました。関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

1) 平成 30 年海難の現況と対策 国土交通省, 2018.

- 2) Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2018, European Maritime Safety Agency, 2018.
- 3) Ożoga, Bartosz, and Jakub Montewka, Towards a decision support system for maritime navigation on heavily trafficked basins, *Ocean Engineering* 159, 2018, pp.88-97.
- 4) 今津 隼馬：新 OZT とその特性について、第 2 回 航行妨害ゾーン(OZT)の利用と展望, 2019.
- 5) Xie, Bin, and Gavriel Salvendy, Prediction of mental workload in single and multiple tasks environments, *International journal of cognitive ergonomics* 4(3), 2000, pp.213-242.
- 6) A. Bangor, P.T. Kortum, and J.T. Miller, Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale, *Journal of Usability Studies*, 4(3), 2009, pp.114-123.