

OZT をもとにした避航操船アルゴリズムの開発

佐藤 圭二*, 齊藤 詠子**

Development of a Ship Avoidance Algorithm Based on Obstacle Zone by Target

by

SATO Keiji and SAITO Eiko

Abstract

This paper proposes an automatic collision avoidance algorithm for ships. In order to assess the risk of collision, we used a method based on Obstacle Zone by Target (OZT), which predicts areas where ships will collide with each other. First, a network is created which includes the next way point as a candidate avoidance route. Next, each edge is set with a distance and penalty as a cost. Finally, an avoidance path is obtained by using Dijkstra's algorithms to determine the path with the lowest cost to reach the next way point. We have also developed a ship avoidance system that displays the avoidance route and the OZT. Experiments were conducted using a ship handling simulator and actual ships to validate the effectiveness of the system. In the simulator experiment, the trajectories obtained by maneuvering with the ship avoidance algorithm were compared with the trajectories obtained by maneuvering with the crew. The results indicated that the ship avoidance algorithm was feasible for maneuvering from the crew's point of view. In the actual ships experiment, the ships were able to avoid the target ship at almost the same distance as the safe passing distance set in the ship avoidance algorithm.

* 知識・データシステム系 **国土交通省 (研究当時 知識・データシステム系)

原稿受付 令和4年5月9日

審査日 令和4年6月7日

目 次

1. まえがき	60
2. 相手船による航行妨害ゾーンを用いた避航航路計画アルゴリズム	60
2.1 相手船による航行妨害ゾーン	61
2.2 相手船による航行妨害ゾーンを用いた避航航路計画アルゴリズム	62
2.3 避航操船システム	63
3. 避航操船実験	64
3.1 シミュレータによる避航実験	64
3.2 実船による避航実験	65
4. おわりに	68
謝 辞	68
References	68

1. まえがき

近年、特に内航海運業界では船員の高齢化や人手不足が課題となっている。一方で、海難事故はヒューマンエラーに起因するものも多く、例えば、日本国内での過去5年間における衝突事故は2,177隻発生しており、その原因の多くが見張り不十分や、操船不適切等のヒューマンエラーとなっている。これらの課題を解決するために自動運航船の開発が進められており、その要素技術の1つとして自動避航操船が挙げられる。本稿では、相手船による航行妨害ゾーン(OZT: Obstacle Zone by Target, 以下、「OZT」と記す)の表示による避航航路計画アルゴリズムと、そのアルゴリズムを搭載した避航操船システムについて報告する。

2. 相手船による航行妨害ゾーンを用いた避航航路計画アルゴリズム

従来、安全航行のための装置として、レーダーから得る情報をもとに、自動的に物標をプロットして目標の相対運動や真運動を解析する自動衝突予防援助装置(ARPA: Automatic Radar Plotting Aids)や、船舶の位置や船速、航行状態などの安全に関する情報を自動的にVHF(Very High Frequency)電波帯で送受信を行う船舶自動識別装置(AIS: Automatic Identification System)が導入されてきている。高機能なレーダー上では両装置から得られた他船情報を用いて最接近点(CPA: The Closest Point of Approach)解析が行われ、これをもとに警報を発している。しかし警報を受け、自船の進路を変更した場合、全ての遭遇他船とのCPAが変化するため、輻輳海域での安全に避航操船を行うためには経験を要する。この問題に対し、CPA解析から得られる最接近距離(DCPA: Distance of Closest Point of Approach)、最接近時間(TCPA: Time to Closest Point of Approach)や安全航過距離を用いて現進路を航行した場合の衝突の危険を知らせる方法や、知識ベース(たとえば、危険とみなす遭遇状況をあらかじめデータベース化しておくこと)で衝突の危険を評価し表示するもの、避航航路を計算するものなどがあるが、衝突の危険を直感的にどの程度危険なのかを把握することは難しい。Bartos²⁾らは、レーダー画面上に安全な方位を示す手法を提案しているが、あくまでも現在安全な進路を示すのみであるため、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、著者らは船同士が将来的に衝突する領域を算出することのできる相手船によるOZTを用いた避航航路計画アルゴリズムを提案する。OZTを使用する事で、船舶がどの領域を通ると安全かどうかを先々まで考慮することができるので、2段階先、3段階先まで考慮した避航航路を求めることができる。避航航路とともにOZTの情報を表示する情報表示システムも開発した。

2.1 相手船による航行妨害ゾーン

相手船によるOZTとは、その名の示す通り、自船の変針に対して、相手船に妨害される進路を、相手船の予定進路上に領域として示したものである。本節では、今津³⁾により改良された線分形式のOZT表示について述べる。

図1に衝突進路の計算方法を示す。衝突進路とは、自船Oおよび相手船Tに設定した2つの破線の円が接する場合の自船の2つの進路のことであり、自船の進路がこの2つの進路の範囲内にある場合には2船間の航過距離が、あらかじめ設定した安全航過距離 (PD : safe Passing Distance) の範囲内となる。図1は自船位置を原点とした相対座標系によって表され、x軸が東西方向、y軸が南北方向を示す。また、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、これら2つの円が接するとき、両船の距離は安全航過距離PDとなる。ここで、安全航過距離PDは2つの破線で示された円における半径の和によって表される。

ここで衝突進路を求める手順は以下の通りである。

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 $\overline{P_1T}$ 、 $\overline{P_2T}$ を描く。
3. 相手船Tから相手船の運動 (=速度) ベクトル \vec{V}_T と同じ長さのベクトル $\overline{TB_P}$ を相手船の位置がベクトルの先端になるように引き (=相手船の位置Tがベクトルの始点、点 B_P が終点となるようにベクトルを作成し)、点 B_P を決定する。(すなわち、 $|\vec{V}_T| = |\overline{TB_P}|$ となるような点 B_P を求める。)
4. 点 B_P を中心として半径が自船速力 $|\vec{V}_O|$ の円を描き、この円と、接線 $\overline{P_1T}$ 、 $\overline{P_2T}$ との交点をそれぞれ Q_1 、 Q_2 とする。
5. 自船が $\overline{B_PQ_1}$ の進路 (C_1) で進むと、その時の相対進路は $\overline{Q_1P_1}$ となり、相手船Tが点 P_1 に到達する時間 $TCPA_1$ は $\overline{Q_1T}$ の速力で $\overline{TP_1}$ 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 が衝突進路となる。

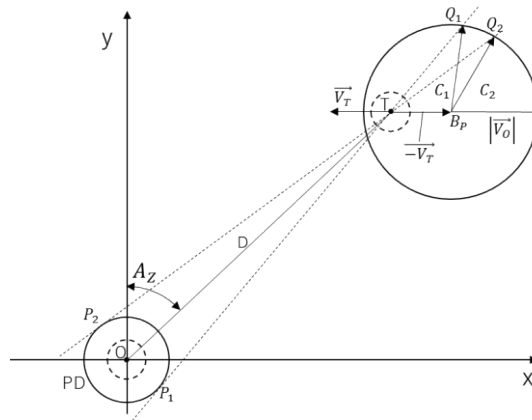


図1 衝突進路計算

この衝突進路を求めるために、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、

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

$\overline{B_PQ_1}$ 、 $\overline{B_PQ_2}$ の向きを衝突進路 C_0 、相手船の方角を Az 、進路を 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。

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

衝突進路 C_0 は、式(2.3)の右边が式(2.4)の条件を満足する場合にのみ存在し、合計で最大4つの解が存在する事になる。図1は解が2つ存在するケースで、 C_1 、 C_2 に該当する。

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

$$\left| \frac{V_T}{V_O} \sin(Az \pm \alpha - C_T) \right| \leq 1 \quad (2.4)$$

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。ここで点 T_1 、点 T_2 は、相手船が初期位置 T を起点として、自身の進路 C_T 上をそれぞれ $TCPA_1$ および $TCPA_2$ の時間航走して到達する位置に占有空間の円を描いたものである。また、点 O_1 、点 O_2 は、自船が初期位置 O を起点として、衝突進路 C_1 、 C_2 上をそれぞれ $TCPA_1$ および $TCPA_2$ の時間航走して到達する位置に占有空間の円を描いたものである。OZTは点 O_1 と点 O_2 を結ぶ直線により表現することができる。

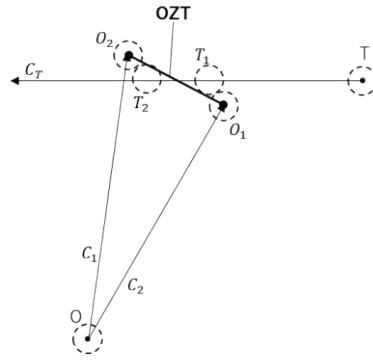


図2 線分OZT導出

2.2 相手船による航行妨害ゾーンを用いた避航航路計画アルゴリズム

本研究で開発した避航アルゴリズムは、OZTをもとに避航計画を立案する。OZTは前述の通り、相手船と衝突の危険がある領域を求めるものであり、自船の予定航路がOZTと重ならないような避航計画を作成することで、相手船と衝突を避けることができる航路が生成できる。図3に航路を生成するために用いるネットワークのイメージを示す。自船の船首方向に避航航路の候補をネットワーク状に張り巡らせるため、自船から角度を $\theta_{interval}$ 刻みで、長さ $d_{interval}$ のネットワークをそれぞれ n ステップ分作成する。線分をエッジ、エッジが結びつく箇所をノードと呼ぶ。最後に、次の変針点へ向けてそれぞれエッジを伸ばすが、次の変針点上にOZTが重なる場合は衝突するおそれがあるため、ゴールの候補として変針点の両脇に終着点の候補を複数作成する。

ネットワークを構築した後、目的地へ到達するための経路を求めるために各エッジにコストを付与し、ダイクストラ法を用いて、コストが最小となる経路を選択する。コストの計算式は以下の通りである。

$$Cost_i = Distance_i + Penalty_{i1} + Penalty_{i2} \quad (2.5)$$

$$Penalty_{y1} = \alpha \times \frac{1}{Dist_{OZT}} \quad (2.6)$$

$$Penalty_{y2} = \begin{cases} 0 & (\text{turn right}) \\ \beta & (\text{turn left}) \end{cases} \quad (2.7)$$

ここで、 $Cost_i$ は、 i 番目のエッジのコスト、 $Distance_i$ は i 番目のエッジの距離、 $Dist_{OZT}$ はエッジに一番近い OZT との最短距離、 α 、 β は外部から与える。 $Penalty_1$ の項は OZT との距離によるペナルティーである。 α が大きければ大きいほど、OZT から離れた経路が得られやすくなる。OZT とエッジが交差する場合は値が $+\infty$ に設定され、そのエッジ上を通る航路は通過不可能となる。 $Penalty_2$ は海上衝突予防法 (COLREGs: Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea) を意識した項で、 β の値が高いほど右転することにより得られる避航航路が得られやすくなる。海上衝突予防法では相手船を右手に見る船を義務船、その反対を保持船と称し、義務船は保持船の進路を妨げてはならず、避けなければならない。一般に衝突のおそれなくなるように相手船の後ろを通過するため、右に舵を切って避航を行い、左に舵を切ることはほとんどない。また、自船と OZT の関係は時間が進む度に変わるため、ネットワークのノードに自船がいるときの OZT を計算し直し、コストの計算を行う。図4に各ノードの OZT の様子を示す。中心の二重丸が自船の位置を示しており、左から0ステップ、1ステップ、2ステップ目の位置に自船が到着したときの OZT の様子を示している。

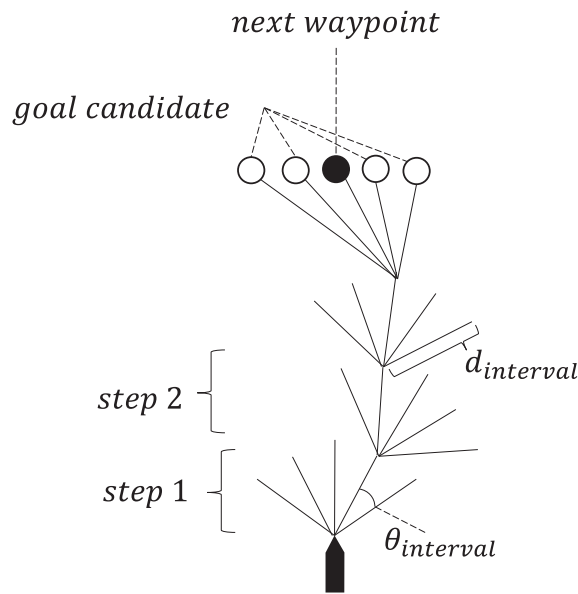


図3 避航航路用ネットワーク作成

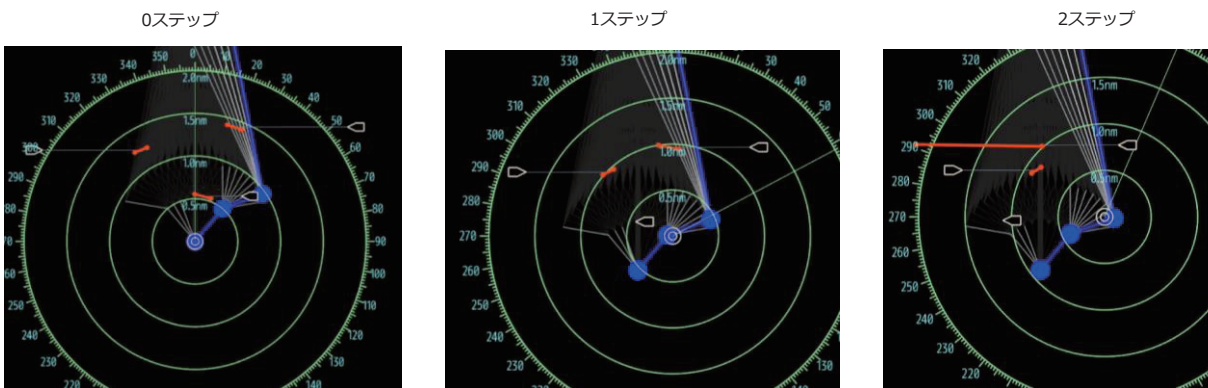


図4 ノード毎の OZT の様子

2.3 避航操船システム

図5に避航操船システム情報表示画面を示す。自船の位置情報である GPS (Global Positioning System) 情報や、相手船の AIS 情報は LAN (Local Area Network) 経由で UDP (User Datagram Protocol) 通信により取得する。他船情報は、AIS からのデータと、レーダーで捕捉した相手船情報 (TT: Target Tracking) を区別して表示する。船橋視点表示は自船の船橋からの視点で OZT を描画する表示方法で、横軸は自船の進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。レーダー表示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、相手船との DCPA に応じて色を分けて表示した。具体的には、DCPA が 0.5NM 以下なら赤色、DCPA が 0.5~1.0NM なら黄色、DCPA が 1.0 NM を超えるなら青色とした。また、レーダー表示でも同様に描画した。船橋視点表示、レーダー表示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と共に、対応する船舶、OZT および対象船の予定航跡をハイライトするようにした。OZT は衝突の危険が存在する領域を示すものであり、例えば、図 5 の船橋視点表示の自船から 2NM の距離の 150 度から 160 度に OZT が描画されているため、本船がこの領域に進路を向けた場合に衝突の危険があるということが分かる。避航操船システムは Windows タブレットで動作し、タッチ操作で手軽に情報の選択および表示切り替えの実施が可能である。また、避航操船システムからは、LAN 経由で避航航路に追従するように舵角指示を送ることでシステムから直接操船することができる。

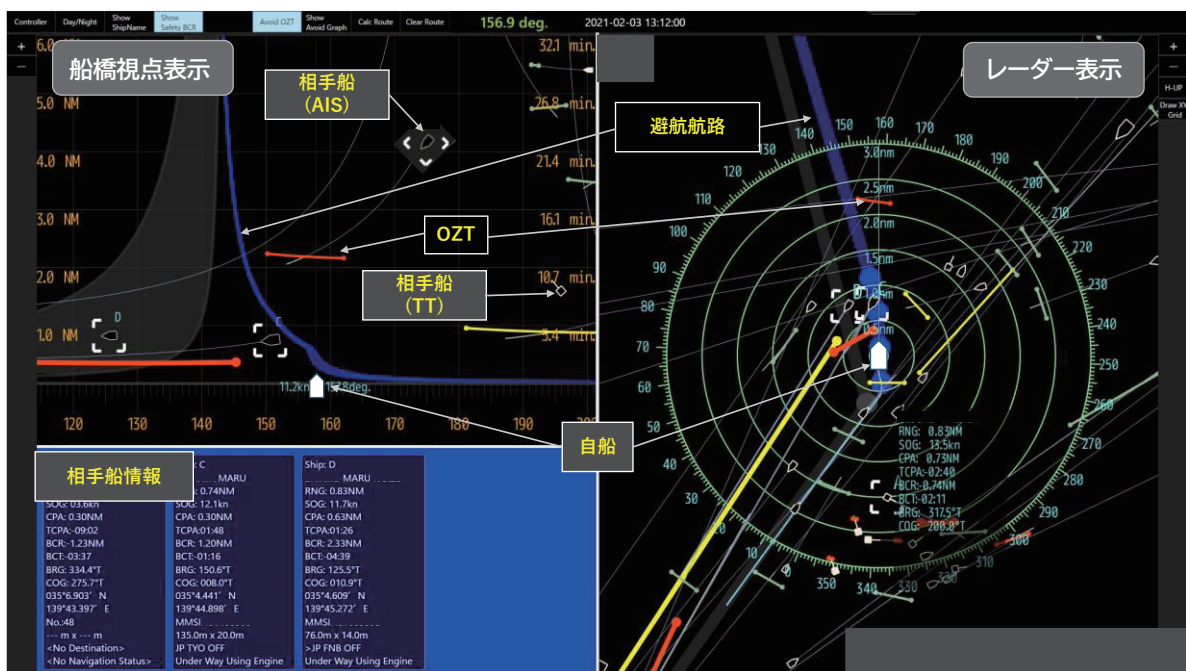


図 5 避航操船システム情報表示画面

3. 避航操船実験

3.1 シミュレータによる避航実験

避航操船システムの有効性を検証するために、当所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。まず、実務経験のある 2 級海技士 (航海) の免許を所有している被験者がシミュレータの航海計器 (レーダーなど) をもとに手動で操船を行う。つぎに同じシナリオを用いて、避航操船システムが直接自動操船を行い、被験者による操船と避航操船システムによる操船から得られた航跡との比較を行う。避航操船システムと操船リスクシミュレータは UDP 通信で接続しており、システムが衝突のおそれを判断するために用いられる本船・相手船の動静に関する情報は、UDP 通信によって取得でき、避航航路を追従するように UDP 通信で操舵信号を送ることで自動操船を行った。避航操船システムによる自動操船中は、被験者にブリッジから操船の様子を確認してもらい、実験終了後にインタビューを行うことにより、避航操船システムによる自動操船を見て主観的に感じたことをヒアリングした。図 6、図 7 に今回用いたシナリオを示す。1 マスの距離は 1km で、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であり、OZT を円列で示している。前半で数隻避航し、その後東西に

航行する幅轉した交互通航の航路を横切るというシナリオになっている。また、避航アルゴリズムのパラメータは安全航過距離 $PD=0.5\text{NM}$, $\theta_{interval}=10$ 度, $d_{interval}=0.5\text{NM}$, $\alpha=0.1$, $\beta=185.2$ として設定した。これらのパラメータの値は、著者らがこれまで分析してきた熟練船長による避航操船方法をもとに、相手船に対して余裕を持った距離で避航できると考えたうえで設定した値である。

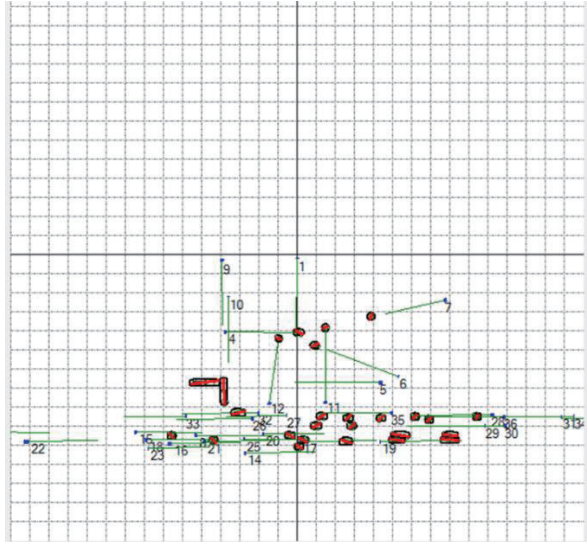


図6 シナリオ1

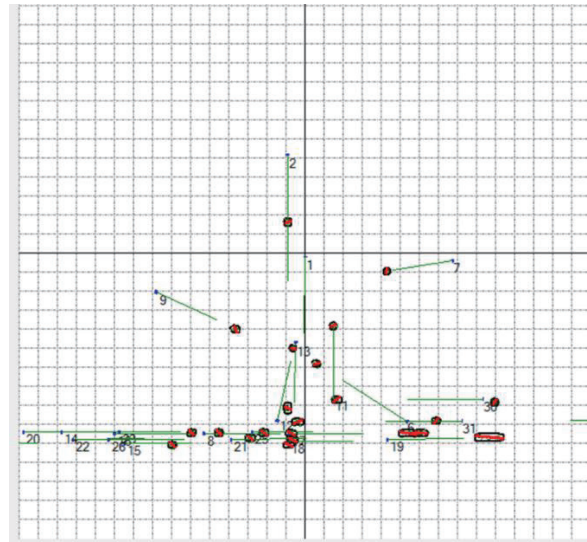


図7 シナリオ2

図8, 図9に被験者と避航操船システムによって操船された航跡をそれぞれ示し, 図10と図11に舵角の時系列図を示す。航跡図を見るとシナリオ1では被験者と避航操船システムでの操船結果はほとんど同じであった。一方, シナリオ2では, 被験者と避航操船システムとの航跡は異なっており, 避航操船システムの方がより短い距離で目的地へと到達していた。実験後のインタビューで, 被験者はシナリオ1に関しては自身の操船と類似しており, 安心して見ていられたとのことであった。一方, シナリオ2に関しては, 被験者と避航操船システムの航跡は異なっていたが, どちらの航跡も人によって取り得る操船であり, 違和感はないとのことであった。全体を通して, 避航操船システムの操船は判断が早く, 相手船との余裕をもって早期に避航できるので余裕が生まれるのではないかとの意見があった。図10のシナリオ1の舵角を見ると, おおよそ舵の応答は同じ傾向を示しているが, 避航操船アルゴリズムのほうが早めに舵を切っていることが見て取れる。また, 図11のシナリオ2の舵角を見ると, 避航操船アルゴリズムの方が被験者よりも操舵の回数も少なく, 早くシナリオが終了しており, 効率的な操船ができていることが分かる。また, 表示装置に関しては, 避航航路に加えてOZTが表示されており, 将来どのような見合い関係になるのか分かりやすいとのコメントがあった。

3.2 実船による避航実験

国立大学法人 東京海洋大学 (以下, 「東京海洋大学」と記す) が保有する練習船汐路丸とやよい (図12) を用いた実船実験を行うことにより, 避航操船システムの有効性を検証した。汐路丸に避航操船システムを設置し, 汐路丸がやよいを避航するシナリオで実験を行った。なお, 避航操船システムは直接汐路丸に舵角信号を送り, 自動避航できる仕組みを設けているが, 実験にあたっては安全のため汐路丸上の避航操船システムで避航航路を計算した後に, 船員が指示する方位へと船首を向かわせる方法で避航操船を行った。

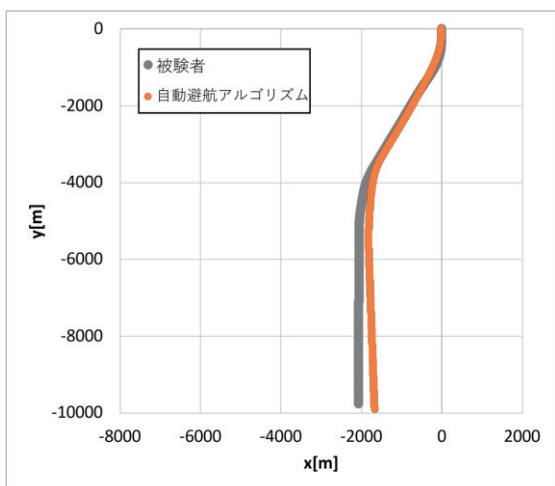


図8 シナリオ1 航跡

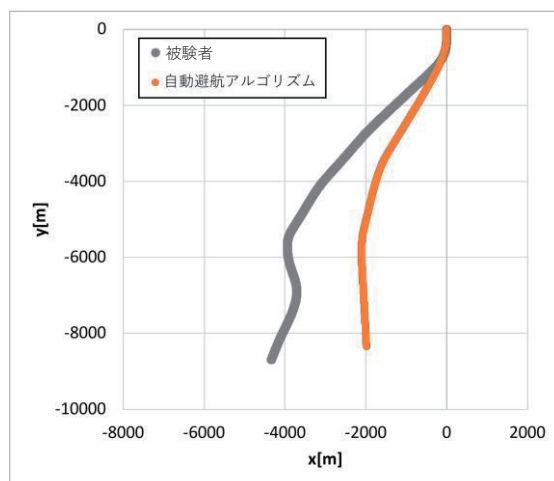


図9 シナリオ2 航跡

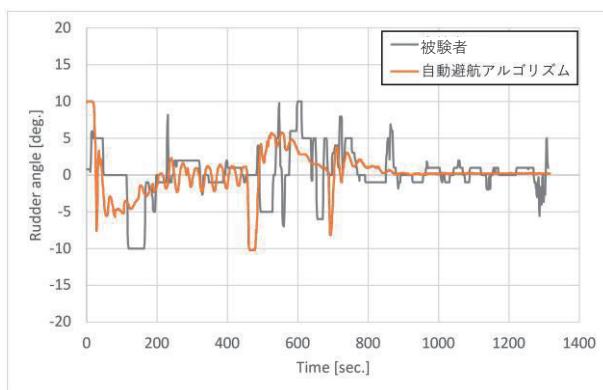


図10 シナリオ1 舵角

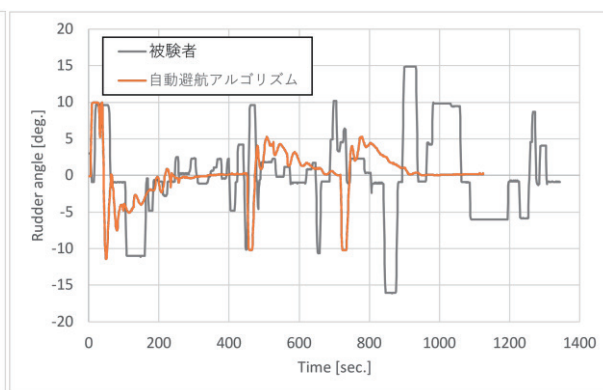


図11 シナリオ2 舵角



図12 汐路丸(左) やよい(右)

図13に実験開始時点の汐路丸とやよいの位置を示す。やよいは汐路丸から見て右手方向から交差する状況となっている。互いの距離は2.5NMで、互いに10knotで進んだ。避航アルゴリズムのパラメータは、OZTの安全航過距離PD=0.3NM, $\theta_{interval}=10$ 度, $d_{interval}=0.2$ NM, $\alpha=0.1$, $\beta=185.2$ として設定した。実船実験を行った海

域は船舶が輻輳する海域であり、シミュレータ実験で設定した周囲が開かれた海域とは異なるため、安全航過距離と $d_{interval}$ は汐路丸船長らへのヒアリングにより、シミュレータ実験に比較し短く設定することとした。

図14に、避航開始時点の避航航路を表示している画面と、汐路丸とやよいの航跡を示す。避航航路表示画面では、やよいのOZTを避けるように避航航路が提示されていることが確認できる。航跡を確認すると、汐路丸はやよいの距離1NM手前から避航を開始し、最接近距離は0.28NMと、OZTの安全航過距離に設定した0.3NMと近い結果となった。実験後のインタビューでは、避航航路に問題は無いが、もう少し早めに舵を切る操船者もいるのではないかとのコメントがあった。

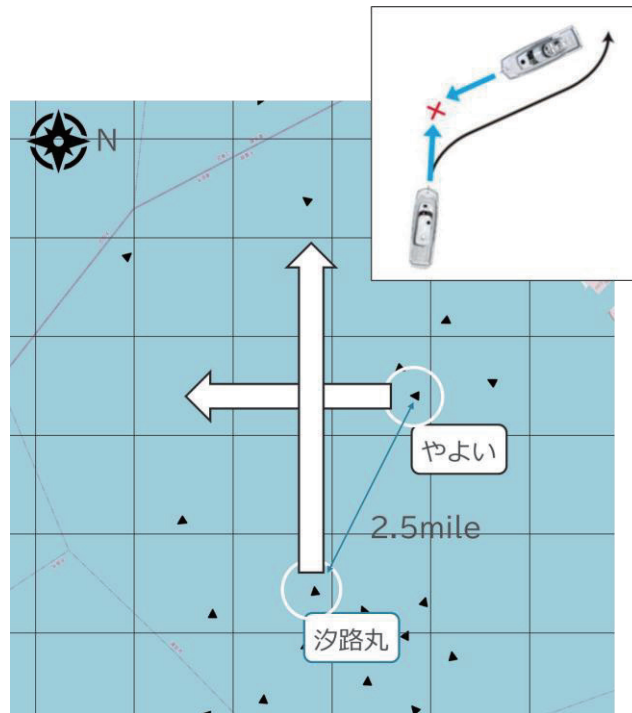


図13 避航開始状況

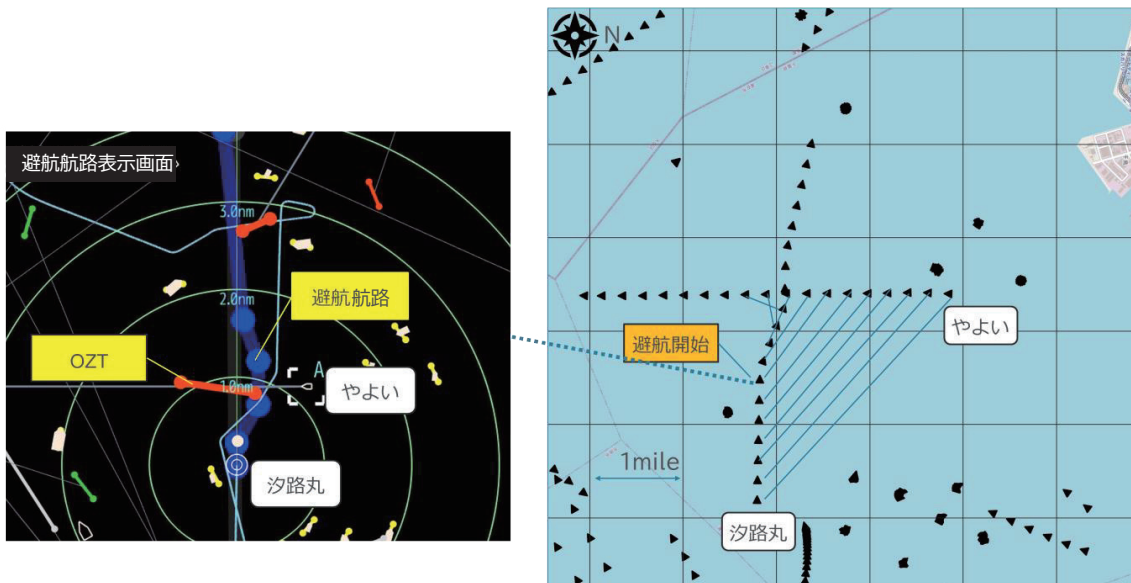


図14 避航開始時点の避航航路と航跡

4. おわりに

本研究では、特に内航海運業界における船員の高齢化や人手不足の問題解決、および海上安全の確保に向け、OZTを活用した避航操船システムを開発し、その検証を行った。その結果、シミュレータでは避航操船システムによって提示された避航航路は、実際に海技者が取り得る操船を行っていることを確認し、汐路丸とやよいを用いた実船実験後のインタビューからも、実際に取り得る避航航路を作成できたことを確認した。また、表示装置については、避航航路とともにOZTを表示しているため、どのような意図で避航航路が作成されたのかということが多少理解できるが、もうすこし、「なぜこの避航航路が設定されたのか」といった、作成された根拠を示す情報があれば、人間はシステムにより安心して操船を任せられるのではないかというコメントもあった。

今後も外部との連携を行いつつ、インタビューなどにより挙げられた改善点の充実などによって、引き続きシステムの改良、検証、および実装に向け研究を進めていく。

謝 辞

避航操船システムの研究の一部は、株式会社商船三井、MOL マリン&エンジニアリング株式会社、商船三井テクノトレード株式会社、株式会社YDKテクノロジーズ、東京海洋大学との共同研究、JSPS 科研費 JP20K14968 の助成をうけ実施した。関係各位に深く感謝申し上げます。

References

- 1) 令和2年 海難の現況と対策, 海上保安庁, (2021).
- 2) Ozoga Bartosz and Jakub Montewka, Towards a decision support system for maritime navigation on heavily trafficked basins, *Ocean Engineering* 159, (2018), pp.88-97.
- 3) 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).
- 4) 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.