

## 15 自動避航アルゴリズムの評価に関する検討

南 真紀子\*, 丹羽 康之\*, 佐藤 圭二\*, 間島 隆博\*

### **Evaluation of Automatic Collision Avoidance Algorithm for Autonomous Ship**

by

MINAMI Makiko, NIWA Yasuyuki, SATO Keiji  
and MAJIMA Takahiro

#### Abstract

Interest in autonomous ships has increased in recent year, which has led to the increased promotion of autonomous ship development in Japan. One of the main issues when developing such ships is collision avoidance maneuvering. Reducing the possibility of accidents due to human error is necessary to improve the safety of autonomous ships. In order for autonomous ships to be used widely, a certified safety evaluation method is needed to verify the safety of the ships. In this paper, we examined a method for evaluating the collision avoidance algorithm using a program developed by the authors. The method is used to evaluate the degree of compliance with COLREGs. We fabricated various scenarios in which a target ship was encountered, then performed simulations, and recorded the track data. The data was then used to evaluate the collision avoidance maneuver. From the trial results of the evaluation method, we found that it is necessary to consider the setting of various parameters and the simulation start position. We also found that it is necessary to evaluate the return to the original course. Thus, we plan to improve this evaluation method in order to evaluate the safety of the collision avoidance algorithm more accurately.

---

\* 知識・データシステム系

原稿受付 令和2年4月30日

審査日 令和2年6月9日

## 1. はじめに

近年、自動運航船に対する関心が高まり、日本でも自動運航船の実現に向けた取り組みが進められている。この開発において、重要な課題の一つが避航操船である。運輸安全委員会の年報によれば、2018年に調査の対象となった船舶事故等は958件あり、そのうち衝突が最も多く242件となっている<sup>1)</sup>。また、それらの事故原因として見張り不十分や思い込み等の人的要因が挙げられている。自動運航船では、人的要因による事故が減少すること、さらに人が操船する場合においても自動運航システムの支援により、人的要因による事故の発生を抑制されることで安全性の向上が期待できる。

一方、自動運航船が航行するためには、技術の開発だけではなく、社会に受容されることも必要である。そのためには自動運航船が安全であること、すなわち想定されるリスクが許容可能な範囲に抑制されていることを示す必要があり、安全性の評価方法や評価に必要なシステムの構築など認証技術について検討を進めることも必要である。

本報では、避航アルゴリズムを評価するため検討したシミュレーションシナリオの作成及び避航操船の The Convention on the International Regulations for Preventing Collision at Sea (COLREGs) への適合程度を評価する方法について概要を述べる。

## 2. シミュレーションによる評価方法の検討

著者らは、自動避航操船機能等の自動化システムの安全評価についての検討をすすめており、認証は次に示す4段階で実施することを考えている<sup>2)</sup>。

- ・設計審査
 

申請者が提示した仕様に基づき、所定の機能が有効であるか書類ベースで確認及び評価を行う。また、申請者が実施したリスクアセスメント等の妥当性を評価する。
- ・シミュレーションによる評価
 

認証側が使用環境条件等に基づきシナリオを設定し、避航アルゴリズムの機能を評価する。
- ・操船シミュレータによる評価
 

実在しないシステムの場合、有効性等を評価する際は、操船経験者等エキスパートの判断が必要である。また、人の関与を含めたシステムの安全性の評価を実施する。
- ・試験船を用いた実海域運航による評価
 

最終段階として、実海域での評価を実施する。

ここで、シミュレーションによる評価及び操船シミュレータによる評価では、まず評価の対象とするハザードを特定し、それを評価するシナリオを作成する必要がある。ソフトウェアの信頼性や妥当性の検証には、作成したシナリオを用いたシミュレーションを行い、問題がないことを確認することが必要である。

### 2.1 シナリオの作成

避航アルゴリズムの評価には、多種多様な環境条件下での

シミュレーションが必要となる。そこで、実時間での出力処理を行わず高速で計算を実行するファストタイムシミュレーションを用いて、人の関与を考慮しないシミュレーションを短時間に数多く実施することとする。その際の評価シナリオとしては、1対1の遭遇で基本機能を確認するためのシナリオと、輻輳海域を想定した他船との多重遭遇シナリオがある。1対1の遭遇については、見張りが行われる範囲内に相手船を配置し、針路、速度を網羅的に設定することでシナリオが作成される。また、他船との多重遭遇については、シナリオが無限に作成できるため、避航操船機能を対象にした場合は、以下の観点からシナリオを作成する。

- ・ランダムに遭遇他船を設定
- ・避航操船関係の論文等から、避航操船機能評価に使われたシナリオを収集
- ・AIS等により記録された航跡から避航操船が困難と思われる見合い関係を抽出
- ・海難事故例からシナリオを抽出

なお、シミュレーション評価の際に避航操船が困難な状況に陥ったシナリオをデータベースとして管理し、操船シミュレータによる評価につなげることが重要であると考えられる。例えば、システムによる対応をメインとしながら必要時には人が対応することを想定している場合、機械から人への操船権の移譲のタイミング等を評価する必要があるが、その際のシナリオ案としての利用が考えられる。

### 2.2 評価方法

自動避航操船機能の評価には操船シミュレーションを利用し、評価方法としてシミュレーションで得られた航跡や操船記録を用いて最接近距離(DCPA)、最接近時間(TCPA)、衝突危険度などの従来の定量的な評価を組み合わせることが考えられる。また近年、ノルウェーを中心に法令への適合性を判定する評価法が提唱されている<sup>3)4)</sup>。この評価法では、COLREGsに挙げられる3種類の船舶見合い関係である行会い(head-on)、横切り(crossing)、追い越し(overtaking)における避航の評価が行われている。

なお、定量評価を行う場合は、しきい値の設定が必要である。例えば、最接近距離の最小値が何マイル以上であれば問題なしと判断するか、また前述した法令への遵守に関する評価法の場合では、得点が何点までであれば問題なしと判断するか等である。

## 3. シミュレーションによる評価

本報告では、OZT(Obstacle Zone by Target: 相手船による航行妨害ゾーン)<sup>5)</sup>を指標としたルールベースに基づく避航アルゴリズムを使用し、1対1の基本的な見合い関係についてシミュレーションを実施し、COLREGsの適合の程度を評価した。

### 3.1 避航アルゴリズム

避航操船は、情報収集・認知・判断・対応(操船)の4プロ

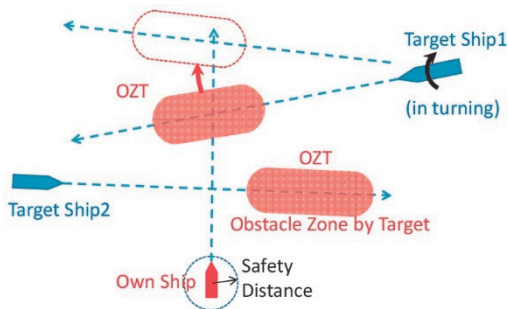


図-1 OZT

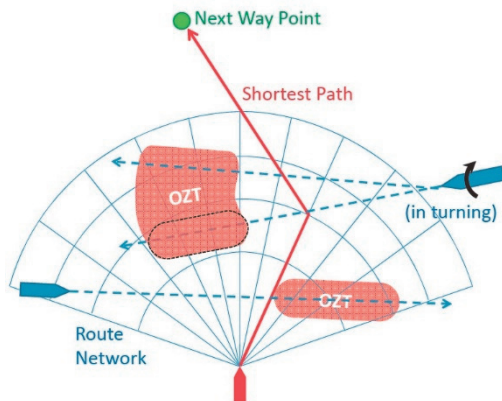


図-2 避航経路ネットワーク

セスの繰り返しである<sup>6)</sup>。認知では情報収集により検知された船舶等に対し衝突のおそれの有無を判断し、判断では変針等の操船手段を決定する。避航アルゴリズムではこれらのプロセスのうち、認知及び判断を対象とする。著書らは、図-1に示すOZTを利用した避航アルゴリズムの開発を進めている<sup>7)</sup>。最接近点(CPA)等の相対運動による指標では対象船毎に相対運動を計算し自船の行動を決定する必要があるが相手船が複数になると判断が煩雑になるが、OZTを指標に用いた場合は、相手船の進路上に示されるOZTを避けるよう避航航路を決定すれば良いため判断が容易になる。また、避航航路の計算は、認知された自船を取り巻く環境条件の下、取るべき進路を決定する過程が核となる。この過程はいくつかの方法が検討されているが、本報告ではルールベースとよばれる手法により避航航路を決定するアルゴリズムを使用した。船舶は計画航路のWay Point(WP)の情報に従い航路をトレースしていくが衝突等の危険が認知された場合は、図-2に示すように自船の進行方向に仮想的な避航経路ネットワークを張り、OZTと重なるノード及びリンクを除去し、次のWPに向かう経路を最短経路探索により求める。なお、本アルゴリズムでは、避航操船は増減速せず変針のみである。

### 3.2 シミュレーションシナリオ

1対1の基本機能を評価する際の遭遇シナリオを図-3及び図-4に示す。図-3のグリッドの間隔は1マイルであり、

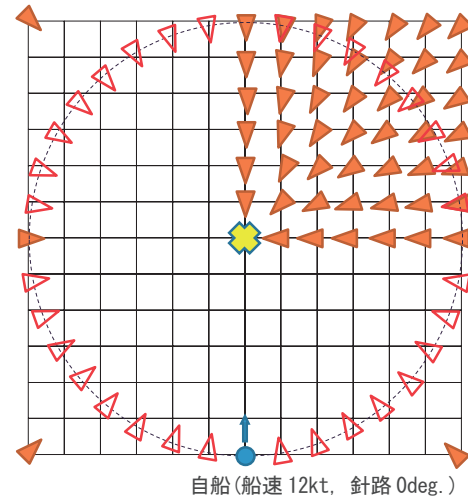


図-3 1対1の遭遇シナリオ(1)

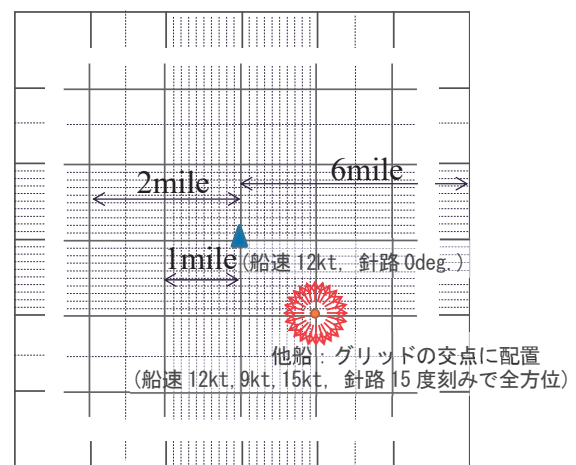


図-4 1対1の遭遇シナリオ(2)

丸印で示したのが自船の初期位置である。他船の設定は、三角で示すグリッドの交点及び白抜きの三角で示す中心から半径6マイルの円周上に10°間隔に配置し、それぞれ中心で自船と衝突するように、すなわちTCPA 30min., DCPA 0.0mとなるように船速及び進路を設定した。また、図-4に示すように自船の出発点を中心とし自船から1マイルまでは0.1マイル、1~2マイルまでは0.5マイル、2~6マイルまでは1マイルとグリッドの間隔を変化させ、他船をグリッドの交点に配置し、針路を全方向(15度刻み)に設定し、船速を12kt(自船と同速)、15kt、9ktの3種類に設定したシナリオでも評価を実行した。シナリオ数は、グリッド及び円周に配置した他船との遭遇が202件、各点から全方向に航行したものについては、開始時のTCPA及びDCPAに条件を付けたため、12ktの場合は7,300件であり、15kt及び9ktについてはそれぞれ3,819件及び4,297件となった。なお、本報告では他船は避航せず直進するものとした。

### 3.3 COLREGsの適合程度の評価

Woernerらにより提案された評価法<sup>3)4)</sup>を用いて、COLREGsへの適合の程度を定量化し評価した。なお、対象としたのは、

衝突を避けるための行動に関する Rule8, 及び互いに他の船舶の視野のうちにある船舶について適用される Rule13-17 である.

評価プロセスは, 次の 4 ステップである.

- 1) シナリオの各遭遇の安全性を評価
- 2) シナリオの各遭遇の出会い状態と対応する Rule を決定
- 3) Rule 毎の評価基準を用いて各遭遇のスコアを計算
- 4) シナリオ内の遭遇で計算されたスコアのうち最低のスコアをシナリオスコアとする

本評価法では, 評価は S(Safety score) または P(Penalty score) で表され, とともに 0~1 の値をとり, S は 1 が安全となり, P は 0 が最適な操船を表す.

ステップ 1 の安全性は, CPA 時の 2 船間距離により (3.1) 式で表される.

$$S_{safety}(r_{cpa}) = \begin{cases} 1, & R_{min} \leq r_{cpa} \\ 1 - \gamma_{nm} \left( \frac{R_{min} - r_{cpa}}{R_{min} - R_{nm}} \right), & R_{nm} \leq r_{cpa} < R_{min} \\ 1 - \gamma_{nm} - \gamma_{col} \left( \frac{R_{nm} - r_{cpa}}{R_{nm} - R_{col}} \right), & R_{col} \leq r_{cpa} < R_{nm} \\ 0, & r_{cpa} < R_{col} \end{cases} \quad (3.1)$$

$r_{cpa}$ : CPA 時の 2 船間距離

$R_{min}$ : CPA 時の許容最小 2 船間距離

$R_{nm}$ : ニアミスと判定される 2 船間距離

$R_{col}$ : 衝突が発生する可能性がある 2 船間距離

$\gamma_{nm}, \gamma_{col}$ : 各距離範囲の重要度を示すパラメータ

ステップ 2 では, 出会い状態及び適用される Rule は次の 5 タイプに分類される.

- 自船が避航義務船となる追越し (Rule13, 16)
- 自船が保持船となる追越し (Rule13, 17)
- 行会い (Rule14)
- 自船が避航義務船となる横切り (Rule15, 16)
- 自船が保持船となる横切り (Rule15, 17)

ステップ 3 では, Rule 毎の次の評価基準を用いて各遭遇のスコアを求める.

Rule13

$$S^{13} \triangleq \begin{cases} S^{16} - \gamma_{ahead}^{13} \mathcal{P}_{ahead}^{13}, & \text{避航義務船} \\ S^{17} & \text{保持船} \end{cases} \quad (3.2)$$

$\mathcal{P}_{ahead}^{13}$ : 相手船の前方通過に対するペナルティスコア

Rule14

$$S^{14} \triangleq \left( 1 - \gamma_{nsb} \mathcal{P}_{nsb}^{14} - \gamma_{delay}^{14} \mathcal{P}_{delay} - \gamma_{\theta_{cpa}}^{14} \mathcal{P}_{\theta_{cpa}}^{14} \right) * \left( 1 - \mathcal{P}_{\Delta\chi_{app}} \right) \quad (3.3)$$

$\mathcal{P}_{nsb}^{14}$ : 右転以外の変針に対するペナルティスコア

$\mathcal{P}_{delay}$ : 操船の遅れに対するペナルティスコア

$\mathcal{P}_{\theta_{cpa}}^{14}$ : 右舷対右舷通過に対するペナルティスコア

$\mathcal{P}_{\Delta\chi_{app}}$ : 明確でない変針に対するペナルティスコア

Rule15

$$S^{15} \triangleq \begin{cases} S^{16} - \gamma_{ahead}^{15} \mathcal{P}_{ahead}^{15}, & \text{避航義務船} \\ S^{17} & \text{保持船} \end{cases} \quad (3.4)$$

$\mathcal{P}_{ahead}^{15}$ : 相手船の前方通過に対するペナルティスコア

Rule16

$$S^{16} \triangleq S_{safety}(1 - \mathcal{P}_{delay})(1 - \mathcal{P}_{\Delta}) \quad (3.5)$$

$$\mathcal{P}_{\Delta} \triangleq \mathcal{P}_{\Delta U_{app}} \mathcal{P}_{\Delta\chi_{app}}$$

$\mathcal{P}_{\Delta U_{app}}$ : 明確でない速度変化に対するペナルティスコア

Rule17

$$S^{17} \triangleq \begin{cases} 1 - \gamma_{safety}^{17}(1 - S^{safety}) - \mathcal{P}_{\Delta}^{17}(\mathcal{P}_{\Delta U}^{17} + \mathcal{P}_{\Delta\chi}^{17}) & \text{追越し} \\ 1 - \gamma_{safety}^{17}(1 - S^{safety}) - \mathcal{P}_{\Delta}^{17}(\mathcal{P}_{\Delta U}^{17} + \mathcal{P}_{\Delta\chi}^{17}) - \gamma_{P_{turn}}^{17} \mathcal{P}_{P_{turn}}^{17} & \text{横切り} \end{cases} \quad (3.6)$$

$\mathcal{P}_{\Delta U}^{17}$ : 保持船の速度変化に対するペナルティスコア

$\mathcal{P}_{\Delta\chi}^{17}$ : 保持船の変針に対するペナルティスコア

$\mathcal{P}_{\Delta}^{17}$ : 保持船の操船タイミングに対するペナルティスコア

$\mathcal{P}_{P_{turn}}^{17}$ : 保持船の左転に対するペナルティスコア

$\gamma$  は, ペナルティスコア等の重要度を示すパラメータであり, 評価者により調整が可能である. なお, 各スコアの詳細については, Woerner らによる文献<sup>3)4)</sup>に述べられている.

#### 4. シミュレーション結果及び評価

15,416 件のシナリオから図-5 に示す 2 つの見合い関係の結果を示す. また, 避航アルゴリズムで用いる仮想的な避航経路ネットワークは, 進行方向の広がり  $I$  が 500m 刻みで 7,500m まで, 幅方向の広がり  $W$  が 10deg 刻みで 100deg とした. また, 他船の船速が 12kt の場合, 避航経路ネットワークを次のように変化した場合についてもシミュレーションを実施した.

- ① 進行方向 ( $I$ ) 7,500m, 刻み ( $\Delta I$ ) 500m, 幅方向 ( $W$ ) 100deg, 刻み ( $\Delta W$ ) 20deg
- ② ( $I$ ) 7,500m, ( $\Delta I$ ) 500m, ( $W$ ) 60deg, ( $\Delta W$ ) 10deg
- ③ ( $I$ ) 7,500m, ( $\Delta I$ ) 250m, ( $W$ ) 100deg, ( $\Delta W$ ) 10deg
- ④ ( $I$ ) 7,500m, ( $\Delta I$ ) 250m, ( $W$ ) 100deg, ( $\Delta W$ ) 20deg
- ⑤ ( $I$ ) 7,500m, ( $\Delta I$ ) 250m, ( $W$ ) 60deg, ( $\Delta W$ ) 10deg

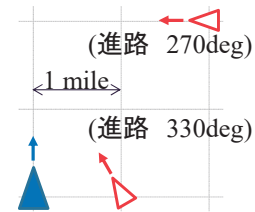


図-5 結果例を示す他船の配置

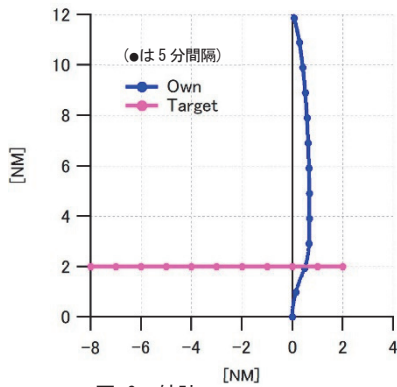


図-6 航跡  
(他船, 進路 270deg 船速 12kt)

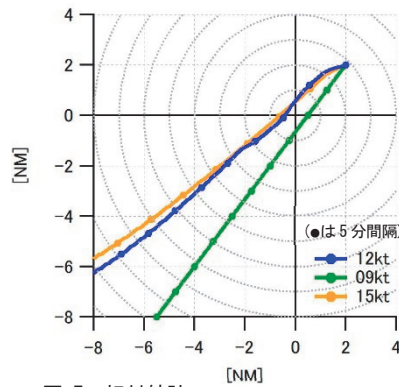


図-7 相対航跡  
(他船速度, 12kt, 9kt, 15kt 進路 270deg)

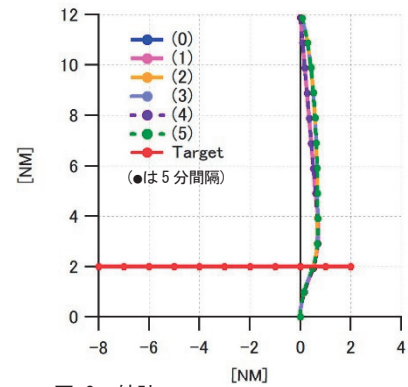


図-8 航跡  
(他船, 進路 270deg 船速 12kt)

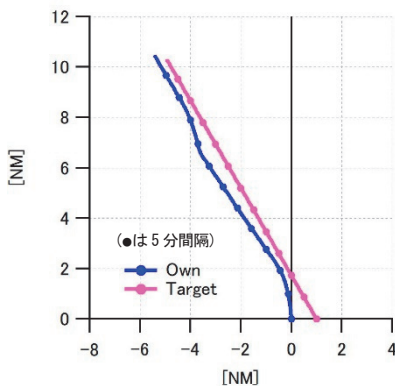


図-9 航跡  
(他船, 進路 330deg 船速 12kt)

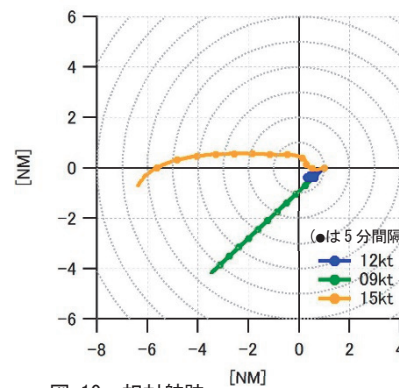


図-10 相対航跡  
(他船速度, 12kt, 9kt, 15kt 進路 270deg)

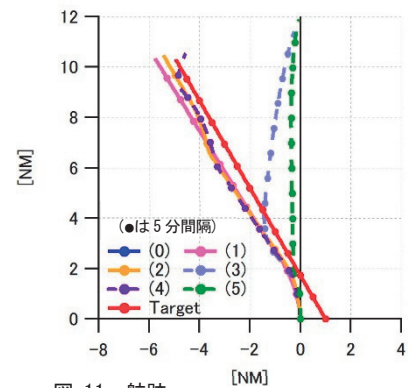


図-11 航跡  
(他船, 進路 330deg 船速 12kt)

図-8, 11 共通

(0)  $\Delta I$ : 500m  $W$ : 100deg  $\Delta W$ : 10deg (1)  $\Delta I$ : 500m  $W$ : 100deg  $\Delta W$ : 20deg (2)  $\Delta I$ : 500m  $W$ : 60deg  $\Delta W$ : 10deg  
(3)  $\Delta I$ : 250m  $W$ : 100deg  $\Delta W$ : 10deg (4)  $\Delta I$ : 250m  $W$ : 100deg  $\Delta W$ : 20deg (5)  $\Delta I$ : 250m  $W$ : 60deg  $\Delta W$ : 10deg

他船の針路を 270deg とした場合の結果を図-6～図-8 に示す。図-6 は、他船の速度が 12kt の場合の航跡である。シミュレーション開始直後に右に変針し相手船の船尾を航過した。図-7 は、他船の速度が 9kt, 12kt, 15kt の場合の相対航跡を自船を原点として示す。15kt の場合、12kt と同様にシミュレーション開始直後に右に変針し相手船の船尾を航過しているが、9kt の場合は直進し相手船の船首を航過した。また、CPA 時の 2 船間距離は 12kt, 9kt 及び 15kt でそれぞれ 618m, 741m, 730m であった。図-8 は避難経路ネットワークを変化させた場合の航跡である。元の進路に復帰する際の航跡にわずかな差がみられるが、避航操船はほぼ同じであったことがわかる。

他船の針路を 330deg とした場合の結果を図-9～図-11 に示す。図-9 は、他船の速度が 12kt の場合の航跡であり、図-10 は、他船の速度が 9kt, 12kt, 15kt の場合の相対航跡である。避航操船手段が変針のみであるため、同速の場合相手船を交わすことができなかった。なお、シミュレーション例と同様にほぼ同速、同航する船舶により操船が妨げられ衝突事故が発生した事例<sup>8)</sup>もあることから操船困難なシナリオ例として記録する必要があると考える。9kt の場合は相手船の船首を航過し最接近距離が 1,265m であった。15kt の場合は相手船の船尾を航過し最接近距離が 577m であった。図-11

は避難経路ネットワークを変化させた場合の航跡である。進行方向の間隔が 250m で幅方向の間隔が 10deg であった場合(図中の(3)(5)), シミュレーション開始後 10 分～25 分の間に相手船の船首を航過し、20deg であった場合(図中の(4)), 開始後 57 分で相手船の船首を航過した。

表 1 及び表 2 に COLREGs への適合程度の評価結果を示す。パラメータ等は文献 4) の値を用いた。なお、評価に用いたアルゴリズムでは変速を考慮していないため、変速動作に基づくペナルティ ( $P_{\Delta Upp}$ ) は評価に入れていない。本評価では、船首航過があった場合、不適切な操船とし 1 のペナルティとするため、表中太字で示したシナリオスコアが 0 となったものがあつた。また、シミュレーション開始時の他船の配置が自船から 1.0 及び 2.8 マイルと近い場合  $S_{safety}$  や  $P_{delay}$  で良い評価とならなかったと考えられる。なお、元の進路に復帰することは評価の対象となっていないため、他船の進路が 330deg のシナリオで原針路に戻らなかった場合にスコアが高くなっており評価法の修正の検討が必要である。

## 5. まとめ

避航アルゴリズムに関するシミュレーション評価法について検討を行った。

海技研で開発した避航アルゴリズムの一つを用いて、他船

表 1 COLREGs への適合程度の評価 (他船 進路 270deg)

|      | Score       | $S^{15}$ | $S^{16}$ | $S_{\text{safety}}$ | $P_{\text{delay}}$ | $P_{\Delta}$ | $P_{\text{ahead}}^{15}$ |
|------|-------------|----------|----------|---------------------|--------------------|--------------|-------------------------|
| 12kt | <b>0.28</b> | 0.28     | 0.28     | 0.42                | 0.13               | 0.24         | 0.00                    |
| 9kt  | <b>0.00</b> | 0.00     | 0.00     | 0.54                | 1.00               | 1.00         | 1.00                    |
| 15kt | <b>0.07</b> | 0.07     | 0.07     | 0.53                | 0.26               | 0.83         | 0.00                    |
| (1)  | <b>0.33</b> | 0.33     | 0.33     | 0.47                | 0.12               | 0.20         | 0.00                    |
| (2)  | <b>0.28</b> | 0.28     | 0.28     | 0.42                | 0.13               | 0.24         | 0.00                    |
| (3)  | <b>0.28</b> | 0.28     | 0.28     | 0.42                | 0.13               | 0.24         | 0.00                    |
| (4)  | <b>0.33</b> | 0.33     | 0.33     | 0.47                | 0.12               | 0.20         | 0.00                    |
| (5)  | <b>0.28</b> | 0.28     | 0.28     | 0.42                | 0.13               | 0.24         | 0.00                    |

表 2 COLREGs への適合程度の評価 (他船 進路 330deg)

|      | Score       | $S^{15}$ | $S^{16}$ | $S_{\text{safety}}$ | $P_{\text{delay}}$ | $P_{\Delta}$ | $P_{\text{ahead}}^{15}$ |
|------|-------------|----------|----------|---------------------|--------------------|--------------|-------------------------|
| 12kt | <b>0.59</b> | 0.59     | 0.59     | 0.75                | 0.21               | 0.00         | 0.00                    |
| 9kt  | <b>0.00</b> | 0.00     | 0.00     | 1.00                | 1.00               | 1.00         | 1.00                    |
| 15kt | <b>0.23</b> | 0.23     | 0.23     | 0.38                | 0.20               | 0.23         | 0.00                    |
| (1)  | <b>0.79</b> | 0.79     | 0.79     | 1.00                | 0.20               | 0.01         | 0.00                    |
| (2)  | <b>0.59</b> | 0.59     | 0.59     | 0.75                | 0.21               | 0.00         | 0.00                    |
| (3)  | <b>0.00</b> | 0.00     | 0.11     | 0.22                | 0.53               | 0.00         | 1.00                    |
| (4)  | <b>0.00</b> | 0.00     | 0.12     | 0.14                | 0.11               | 0.00         | 1.00                    |
| (5)  | <b>0.00</b> | 0.00     | 0.08     | 0.36                | 0.59               | 0.44         | 1.00                    |

の配置, 船速及び進路を変化させ約 15,000 のシナリオでシミュレーションを実施し, COLREGs への適合程度を評価した. 本評価法では, 適用するパラメータ等を船舶や航行海域の特性等に合わせる必要があり, 精度の向上には事故調査報告書や海難審判録等の調査, シミュレータ等による実験が必要であると考えている. シミュレーション評価では, 数多く試験を実施する必要がある, 本評価法によりスコアの評価基準を定めることで自動的に試行結果を判断するシステムの構築が可能となる. なお, 本評価法以外に操船者の主観的評価及び評価領域図による主観的危険度評価を適用した評価, OZT を利用した評価等いくつか提案されており, 対象により使用する評価法を変えることも考慮する必要があると考えられる. 開発された避航アルゴリズムの安全性をよりの確に評価するため今後も評価法の検討をすすめていく予定である.

### 謝辞

本研究の一部は, 交通運輸技術開発推進制度 (JPJ002223) (課題名: 自律型海上輸送システムの技術コンセプトの開発) の支援により実施されました. また, 本研究の一部は JSPS 科研費 JP19K15228, JP19H02371, JP20K14968 の助成を受けたものです. 関係各位に感謝申し上げます.

### 参考文献

- 1) 運輸安全委員会: 運輸安全委員会年報 2019(2019), pp. 132-134.
- 2) 丹羽康之: 操船シミュレータによる自動航行プラットフォームの構築, 海上技術安全研究所報告, 第 19 巻別冊 (2019),

pp. 77-80.

- 3) K.Woerner et al.: Quantifying protocol evaluation for autonomous collision avoidance, Autonomous Robots, Vol. 43(2019), pp. 967-991.
- 4) P.K.E.Minne: Automatic testing of maritime collision avoidance algorithms, <http://hdl.handle.net/11250/2452112>. (2017)(最終アクセス 2020/4)
- 5) 福戸淳司, 今津隼馬: 相手船による妨害ゾーン(OZT)を用いた衝突警報の検討, 日本航海学会論文集, vol. 128(2013), pp. 49-54.
- 6) 竹本孝弘他: 衝突海難事故における人的エラーの分類について, 日本航海学会論文集, vol. 106(2002), pp. 39-46.
- 7) 間島隆博他: 自動避航操船の計算アルゴリズムの開発, 海上技術安全研究所報告, 第 19 巻別冊 (2019), pp. 73-76.
- 8) 運輸安全委員会: 船舶事故調査報告書 MA2012-1 “貨物船 TY EVER 貨物船 LOFTY HOPE 衝突” (2012).