避航操船判断支援情報に関する考察

有村 信夫*・沼野 正義*・福戸 淳司*・田中 邦彦*

Study on decision making support information for evasive maneuvering

Nobuo ARIMURA, Masayoshi NUMANO,
Junji FUKUTO and Kunihiko TANAKA

Abstract

This paper discusses the method of displaying information on evasive course width for the sake of improvement of evasive maneuvering judgment support functions of the collision avoidance assistance apparatus. Display properties of the evasive course width information is investigated through simulations based on ARPA data, collected in actual sea area. As a result of discussions, it is considered that evasive course width information can be used effectively as an attention attracting information regarding the forecasted close point of approach or support information for judgment of a margin between evasive dangerous area and own course.

keywords: collision avoidance, marine navigation support, marine traffic engineering.

キーワード: 衝突回避、航行支援、海上交通工学

1. はじめに

輻輳海域を航行する内航船舶では、衝突事故を予防して航行の安全性向上を図ることが、重要な課題である。また、衝突事故発生時における操船者の多くは、衝突直前まで相手船が衝突危険船であることを認識せずに衝突に至っている。

一方、実船調査によると、自船の近傍で他船が侵入することを避けている閉塞領域が認められる。

この閉塞領域は、操船者が避航動作の判断時に航行海域の輻輳度や相手船の諸元・性能特性を推測して得た 2 船間の衝突防止に必要な操船者の主観的評価量を表しているものと考えられる。

したがって、航行の安全性向上を図るためには、航行の危険性を評価する要素に、船舶の諸元・性能特性と実船調査で得られる閉塞領域を取り入れて、航行実態に近い評価指標で支援情報を提供して、操船者が衝突の危険性を認識し易いように確実に伝達することが衝突予防支援機能として重要である。

本考察では、避航操船判断支援機能を向上するため、航行の危険性を評価する指標の避航領域にバンパーモデルを適用して、実船調査データの解析で得られた閉塞領域を用いて、避航領域をモデル化した。

そして、避航操船判断支援情報としては、衝突の危険性の高い領域への他船侵入を避けるために必要な回避幅と回避距離の情報を表示した。また、その表示効果は、他船の船舶長を含む ARPA データを用いたシミュレーションで検討した。

2. 航行環境評価指標

避航操船判断支援情報の呈示に使用する評価指標の避航領域は、閉塞領域を取り入れたバンパーモデルで実現するために、ARPA データを用いて解析した閉塞領域値(章 2.2.2)で、モデル化した。

バンパーモデルは、自船の近傍と、その外側に境界領域を持つ避航領域である。また、バンパーモデルの避航領域(Fig.1)は、衝突の危険性が高い自船近傍の避航領域(以下、「避航危険領域」と言う)と、外側の衝突の危険性が低く、避航操船に余裕が有る避航領域(以下、「避航十分領域」と言う。)で構成した。

以下に、閉塞領域と避航領域の概念、閉塞領域の算出方法及び避航領域モデルについて述べる。

ここで使用する用語は、次の通りである。

2.1 用語の定義

* 正会員 独立行政法人 海上技術安全研究所 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1)

a) 避航領域

- ① 「避航危険距離」は、避航危険領域の相対速度ベクトル方向の避航距離。また、「航過危険距離」は、相対速度ベクトルに対して垂直な最接近点方向の避航距離を言う。
- ② 「避航十分距離」は、避航十分領域の相対ベクトル方向の避航距離。また、「航過十分距離」は、相対速度ベクトルに対して垂直な最接近点方向の避航距離を言う。
- ③ 「衝突危険度」は、避航領域内の航行位置で衝突の危険性を数量化した値を言う。
- ④ 「潜在的衝突危険度」は、現在針路を直進した時に予測される最接近点での危険度を言う。
- ⑤ 「危険船」は、現在針路を直進した時に最接近点で避航危険領域を通過する船を言う。
- ⑥ 「注意船」は、現在針路を直進した時に最接近点で避航十分領域を通過する船を言う。
- ⑦ 「最接近予測点」は、他船の真針路上で、自船との相対距離が最接近となる点を言う。
- ⑧ 「回避幅」は、最接近点が避航危険領域を回避するために必要な針路の変移幅を言う。
- ⑨ 「回避距離」は、相対速度ベクトルが自船の船首・船尾方向の避航危険領域を回避するために必要な距離を言う。

b) 見合い関係

見合い関係の判別は、ヘッドアップ座標に対する他船針路(θ_i)を次のように定義した。

- ① 同航船： $345 \text{ 度} \leq \theta_i \leq 15 \text{ 度}$ 。
- ② 反航船： $165 \text{ 度} \leq \theta_i \leq 195 \text{ 度}$ 。
- ③ 横切り船： $15 \text{ 度} \leq \theta_i \leq 165 \text{ 度}$ 、
 $195 \text{ 度} \leq \theta_i \leq 345 \text{ 度}$ 。

2.2 避航領域

はじめに、閉塞領域と避航領域の概念について、述べる。

閉塞領域の形成要因⁽¹⁾の一つとしては、船舶が衝突しないための逆転制動停止距離と、逆転制動停止による針路不安定性に係わる横移動距離等の影響が上げられている。

この閉塞領域を求めるためには、船舶の種類別、輻輳度別及び見合い状態別の航跡データを集積して、閉塞領域の形成要因を総合的に解析して、定義することが望ましいが、船の種類別の航跡データを調査することは困難である。

ここでは、狭水域と輻輳域の航海経路で収集した

ARPA 航跡データを用いて、閉塞領域を解析した。

避航領域を決定するためには、相対速度ベクトル方向と相対速度ベクトルに対して垂直な最接近点方向の閉塞領域を把握する必要があるが、船側方向の閉塞領域には、航過時の最接近点に係わる航跡データが含まれているので、最接近点方向の閉塞領域に相当しているものと考えられる。

したがって、解析では、自船と相手船間の接近速度をパラメータにして、相対速度ベクトル方向と自船の船側方向の閉塞領域を求めた。また、閉塞領域を形成する船舶の船舶長は、自船と航行船舶の平均的船舶長で換算船舶長を推定した。さらに、閉塞領域の大きさは、接近速度と換算船舶長で推定した停止距離で規格化して、停止距離に対する換算係数を求めた。

そして、避航領域の半径は、相対速度ベクトル方向と相対速度ベクトルに対して垂直な最接近点ベクトル方向の4方位における自船と相手船間の接近速度を求めて、各方位の接近速度と換算船舶長で推定した停止距離値を、閉塞領域の解析値に代入して求めた。また、避航領域の境界値は、夫々の半径で楕円形近似した。

2.2.1 閉塞領域の算出方法

実船調査で収集した ARPA 航跡データの相対航跡位置における捕捉追尾隻数分布を接近速度毎に、距離100m間隔で集計して、それを航跡数分布の平均値で規格化した航跡数頻度分布を分析すると、他船の侵入を避けている閉塞領域が認められる。

解析では、避航領域の避航危険領域と避航十分領域をモデル化するために必要な、自船の船側方向と相対速度ベクトル方向の閉塞領域を調べた。

a) 避航危険領域に対応する閉塞領域

避航危険領域の「航過危険距離」に対応する船側方向の閉塞領域は、自船の近傍を航過している船舶による接近速度に対する航跡隻数頻度が10%の領域を求めた。また、「避航危険距離」に対応する相対速度ベクトル方向の閉塞領域は、相手船の相対速度ベクトルが自船に向かっていて、相対速度ベクトルと相手船の相対方位との仰角が ± 10 度以内にある船の接近速度に対する航跡数頻度分布が10%の領域を求めた。さらに、自船近傍の閉塞領域を形成する航行船舶の船舶長は、安全性を考慮して、他船の船舶長が約15mの小型船で構成されているものと推定して、自船と小型船による換算船舶長を用いた。この閉塞領域は、操船者が避航操船の判断時に航行の危険性を高く感じて、他船の侵入を避けている領域と考えられる。

b) 避航十分領域に対応する航跡数頻度分布

避航十分領域の「航過十分距離」に対応する閉塞領域の外側の分布領域は、自船の船側方向の航跡数頻度分布のピーク値分布が避航船舶の平均的な避航距離になっているものと考えて、ピーク値分布までの距離を求めた。また、このピーク値の分布領域を形成する船の船舶長は、航行船舶の分布が多い約 60m の船と推定して、自船との換算船舶長を用いた。

さらに、相対速度ベクトル方向の「避航十分距離」は、任意に定めた避航余裕時間における相対的移動距離とした。

この船側方向の航跡数頻度分布が増加する領域は、避航危険領域を避航した船が多く集まって航行しているので、航行の危険性が低い領域と考えられる。

2.2.2 閉塞領域の解析値

閉塞領域は、換算船舶長： L_K と接近速度で停止距離： D_{SLV} を推定して、停止距離で規格化した場合の換算係数を示した。また、解析結果は、避航領域の対応名称で次に示した。

①避航危険距離は、(狭水道航行域： $1 \cdot D_{SLK107V}$ 、幅員航行域： $1.6 \cdot D_{SLK82V}$)。②航過危険距離は、(狭水道航行域： $0.6 \cdot D_{SLK107V}$ 、幅員航行域： $1.02 \cdot D_{SLK82V}$)。③航過十分距離は、(狭水道航行域： $1.2 \cdot D_{SLK114V}$ 、幅員航行域： $1.58 \cdot D_{SLK92V}$) である。

なお、ARPA データの実船調査海域は、①狭水域は「フェリーこがね丸： $L=150m$ 」の大阪港・瀬戸内海水道・別府港間の航海経路において船舶が幅員する航行域。②幅員域は「銀河丸： $L=115m$ 」の東京港～大阪港間の航行経路で、13kts 以下で航行した幅員航行域である。

2.2.3 避航領域モデル

避航領域は、自船の針路を直角に横切る船に対する例を Fig.1 に示す。

なお、Fig.1 の記号は、 D_L ：避航危険領域、 D_M ：避航十分領域、 V_o ：自船速度、 V_t ：相手船速度、 θ_t ：ヘッドアップ(HUP)時の相手船の真針路、 V_r ：相対速度、 θ_r ：相対針路を示す。また、避航危険領域はバンパーモデルの内側の領域で、避航十分領域は外側の領域である。

避航危険領域と避航十分領域の半径は、航行状態から相対速度ベクトル方向と相対速度ベクトルに対して垂直な最接近点ベクトル方向の 4 方位の自船と相手船間の接近速度を求めて、自船と相手船の換算船舶長と

接近速度で停止距離を推定して、それに閉塞領域の停止距離に対する換算係数を乗じた。そして、避航領域は、夫々の半径で楕円形近似した。

Fig.1 Evading navigation risk area

避航領域の算出式については、次に述べる。

統計的操縦性能停止距離は、自船と他船による換算船舶長： L_K と接近速度： V_S を要素にして、式(1)で推定した⁽²⁾。

$$D_S(L_K, V_S) = \exp(1.25 \cdot \log(L_K) + 0.35 \cdot \log(V_S) + 0.008) \quad (m) \dots (1)$$

避航領域の半径は、避航危険領域の相対速度ベクトル方向の避航危険距離(他船方向と後方の距離)は D_{LF} 、相対速度ベクトルに対して垂直方向の航過危険距離(左右方向の距離)は D_{LS} 、避航十分領域の相対速度ベクトル方向の避航十分距離(他船方向と後方の距離)は D_{MF} 、相対速度ベクトルに対して垂直方向の航過十分距離(左右方向の距離)は D_{MS} と置いて、閉塞領域の解析で得られた式(2)から式(4)に、夫々の停止距離を代入して求めた。また、避航十分距離： D_{MF} は、避航十分余裕時間： T における相対速度の移動距離： $V_S \cdot T$ である。

さらに、接近速度の下限値： V_S は、自船速度： V_o 、相手船速度： V_t 、相対速度： V_r 中の最大速度に対する速度変動値 ($V_S = 0.079 \cdot \max(V_o, V_t, V_r)$) とした。

$$D_{LS} = C_{LS} \cdot D_S(L_K, V_S) \quad (m) \dots (2)$$

$$D_{LF} = C_{LF} \cdot D_S(L_K, V_S) \quad (m) \dots (3)$$

$$D_{MS} = C_{MS} \cdot D_S(L_K, V_S) \quad (m) \dots (4)$$

$$D_{MF} = V_S \cdot T \quad (m) \dots (5)$$

なお、避航領域式の変数は、次に示す。

$$L_K = ((L_o^2 + L_t^2) / 2)^{0.5} : \text{換算船舶長}$$

$$L_o : \text{自船船舶長}, L_t : \text{相手船舶長}$$

$$V_S = V_{SO} + V_{ST}, (V_{SO} \geq 0, V_{ST} \geq 0) \quad (kts)$$

$$V_{SO} = V_o \cdot \cos(\phi_B), V_{ST} = V_t \cdot \cos(\phi_{BT}) \quad (kts)$$

$$\phi_B : \text{自船の接近速度方位}$$

ϕ_{BT} : 他船の針路と接近速度方位間の仰角

C_{LS} : 避航航過距離係数

C_{LF} : 避航危険距離係数

C_{MS} : 避航十分航過距離係数

(狭水域の定数: $C_{LS}=0.6$ 、 $C_{LF}=1$ 、 $C_{MS}=1.2$ 、

幅狭域定数: $C_{LS}=1.02$ 、 $C_{LF}=1.6$ 、 $C_{MS}=1.58$)

2.2.4 衝突危険度

相手船との相対距離: R における衝突危険度: BI は、相手船の相対距離: R を相手船の相対方位上の避航危険領域境界値までの距離: D_L と避航十分領域境界値までの距離: D_M で内分して、衝突の危険性を示した。

なお、避航危険領域内の危険度は 100、避航十分領域の危険度は 0 にした。

$$BI=100 \cdot (D_M - R) / (D_M - D_L), \quad (D_L \leq R \leq D_M) \quad \dots (6)$$

$$BI=100, \quad (R \leq D_L)$$

$$BI=0, \quad (D_M \leq R)$$

2.3 避航領域の最接近予測点分布

操船者は、航行の危険性を判断する場合、相手船の相対位置の変化と、相手船の真針路上の最接近予測点を推測して避航操船を行っているものとする。

ここでは、航行時の最接近予測点の分布傾向を把握するために、狭水域航行時における避航領域内の船舶の最接近予測点分布を調べた。

最接近予測点分布は、衝突危険度が 0 以上の船を警報対象船として Fig.2 に、また、衝突危険度が 100 の危険船分布を Fig.3 に示した。

なお、自船は、図中の X 軸と Y 軸の交点に位置する。

警報対象船の最接近予測点頻度は、危険船では反航船(439)、横切り船(800)、また、衝突危険度が 100 以下の注意船では反航船(2454)、横切り船(1077)である。

さらに、(危険船の頻度/注意船の頻度)の比は、反航船では $(439/2454=0.17)$ 、横切り船では $(800/1077=0.74)$ である。

2.3.1 最接近予測点の分布領域

自船の船首方向において他船の最接近予測点が侵入しない避航領域は、Fig.2 の反航船(Fig.2(a))の場合は広いが、横切り船(Fig.2(b))では狭いことが分かった。

警報対象船(Fig.2) の最接近予測点分布領域は、避航操船時における最接近予測点の認識状態を表しているものと考えられる。

Fig.3 の危険船の最接近予測点分布領域からは、横切り船(Fig.3(b))の場合は船首近傍に最接近予測点が多く

分布するので、反航船(Fig.3(a))に比較して、避航操船時期が遅れていて、自船との離隔距離の余裕が十分に得られていないことが分かった。

(a) Opposite vessel

(b) Crossing vessel

Fig.2 Closest approach prediction point distribution of the alarm object ship.

(a) Opposite vessel

(b) Crossing vessel

Fig.3 Closest approach prediction point of the dangerous ship.

2.3.2 避航操船判断支援情報の必要性

反航船の場合には、危険船の最接近予測点が侵入しない領域が広く、また、注意船の頻度に対する比が小さい。この理由は、次のように考える。

① 反航船の場合は、最接近点が避航危険領域に入

って危険船になったら速やかに避航を行っているので、横切り船の見合い状態に比較して、危険船の認識が容易である。

- ② 横切り船では、(危険船の頻度/注意船の頻度)の比が大きいため、危険船に対す最接近予測点の認識が困難であるために、避航動作時期が遅れて危険船の最接近予測点頻度が多くなっている。

したがって、見合い状態に関係なく危険船に対する認識を向上するためには、操船者に最接近予測点と避航危険領域の情報を迅速に、且つ確実に伝達して、衝突危険の注意を喚起することが重要である。また、最接近予測点は、自船と他船が直進している場合、自船の針路に平行に接近してくるので、危険船に対しては、避航危険領域への最接近点の侵入を避けるために必要な回避情報を呈示することが、有益であると考えた。

3. 避航操船判断支援情報

操船者の見張り作業負担を軽減して、航行の安全性向上を図るためには、見合い状態に関係なく、衝突の危険性を一律に認識できるように、警報情報を確実に伝達することが重要である。

ここでは、避航危険領域への他船の最接近点の侵入を避けるために必要な回避情報を表示する方式について検討を行った。

3.1 避航操船支援情報の表示方式

避航操船判断支援情報としては、避航危険領域への侵入を回避するために必要な、最接近予測点と自船針路間の離隔距離の余裕と、相対速度ベクトルと自船船首方向の避航危険領域間の余裕が重要である。

Fig.4 Information of avoidance width and avoidance distance.

避航操船判断支援情報は、避航操船時に避航危険領域を回避するために必要な最接近点からの回避幅情報 (P0) と、相対速度ベクトルに対する自船船首・船尾方向の回避距離情報 (H, P0) を Fig.4 に示した。

表示条件は、相対速度ベクトルが回避距離: H の外側にある時には回避幅情報 (P0) を表示して、相対速度ベクトルが回避距離: H の内側にある時には回避幅情報 (P0) に加えて、回避距離情報 (H, P0') を表示した。また、回避幅及び回避距離の情報と避航危険領域の横幅: A-O-B と縦幅: H-O-H' の関係は、Fig.5 に示して、次に述べた。

Fig.5 Evasive navigation area and avoidance width.

3.1.1 回避幅情報

避航危険領域の横幅: A-O-B と、回避幅: P1-P0-P2 の関係は、Fig.5 に示す。

回避幅: P1-P0-P2 と避航危険領域の横幅: A-O-B の関係は、線分 P0-P1=O-A, P0-P2=O-B である。また、最接近予測点 (P0) 上の回避幅: P1-P0-P2 は、自船が左右に針路を変移して、避航危険領域への最接近予測点の侵入を回避するために必要な自船針路の回避幅を示している。

さらに、回避幅情報は、相手船の真針路上の最接近予測点に自船が避航危険領域を避けるために必要な回避幅: P1-P0-P2 を表示して、最接近予測点と自船針路間の余裕に対する注意を喚起した。

3.1.2 回避距離情報

Fig.5 の避航危険領域の縦幅: H-O-H' は、相対速度ベクトルと自船針路上の避航危険領域との接近を避けるために必要な回避距離を示す。

相対速度ベクトルに対する船首方向の回避距離は、避航危険領域の上限値: O-H、又は下限値: O-H' とした。また、回避距離情報は、船首針路上の回避距

離点 (H) に表示した。(Fig.4)

さらに、回避距離情報は、相対速度ベクトルが回避距離: $H-O-H'$ の内側にある時に、回避距離点 (H) と相手船の相対速度ベクトル上の最接近点における回避幅情報を表示して、避航危険領域への相対速度ベクトルの接近に対する注意を喚起した。

3.1.3 見合い状態による回避幅の変化

回避幅の見合い状態による変化は、Fig.6 に示す。

なお、Fig.6 の船速度は $V_o=12\text{kts}$ 、 $V_t=10\text{kts}$ 、船舶長は $L_o=100\text{m}$ 、 $L_T=100\text{m}$ 、 $L_K=100\text{m}$ 、回避幅情報のスケール目盛は 0.1nm である。

避航危険領域を避けるために必要な回避幅 (D) は、Fig.6 の見合い状態 (相手船の真針路: θ_t) の場合、(a) 反航船: $\theta_t=180$ 度、 $D=\pm 2.4L_K$ 、(b) 横切り船: $\theta_t=270$ 度、 $D=-6.9L_K \sim 3.4L_K$ 、(c) 横切り船: $\theta_t=340$ 度、 $D=-5.8L_K \sim 2.7L_K$ 、(d) 同航船: $\theta_t=0$ 度、 $D=\pm 1.9L_K$ である。

この回避幅は、相手船との見合い状態によって変化して、見合い関係に伴う最接近予測点と避航回避幅の

Fig.6 Information of the avoidance width.

値を推測できるので、避航操船時の自船針路と避航危険領域との離隔距離の余裕を判断する時の支援情報になるものと考えた。

3.2 避航操船判断支援情報の有効性

避航操船判断支援情報の表示効果は、実船調査で収集した ARPA データを用いたシミュレーションで検討した。

ここでは、避航操船時の見合い状態の変化に対する相対航跡 (A) 位置に対応した回避幅情報 (B)、現在の衝突危険度 (BI)、最接近時間 (TCPA)、最接近距離 (DCPA)、最接近点での潜在的衝突危険度 (BI_m) 及び自船針路 (Course) 等状態量の推移特性を Fig.7 から Fig.11 に示した。なお、Fig.9 は、Fig.8 の見合い状態において発生した回避距離情報の表示例を示している。

Fig.7 から Fig.11 の中央図は、30 秒間隔の相対航跡 (A) に対応した最接近予測点と回避幅情報 (B) を示す。また、相対航跡点 A1、A2 は、最接近予測点 B1、B2 に対応する。

縦軸の左側図のスケール (BI、TCPA) は相対航跡位置に、右側図のスケール (DCPA、 Bim 、Cours) は避航回避幅情報の最接近予測点位置に対応する。

なお、避航領域のパラメータには、狭水域の定数を用いた。

a) 同航横切り船

Fig.7 には、右舷から左舷への横切り船に対する避航操船時の航行状態の変移を示す。

なお、Fig.7 の自船は輻輳域航行時の「銀河丸」、速度は $V_o=13.4\text{kts}$ 、針路は $\theta_o=188$ 度、相手船速度は $V_t=5.1\text{kts}$ 、針路は $\phi_T=202$ 度 (HUP 時の真針路 $\theta_t=327$ 度)、船舶長は $L_o=115\text{m}$ 、 $L_T=112\text{m}$ 、換算船舶長は $L_K=113\text{m}$ 、回避幅情報の目盛は 0.1nm である。

Fig.7 の相手船 (A) が A1 点に到達するまでは、回避幅情報 (B) が自船針路上に接して、最接近予測点と針路間の離隔距離は 0.1nm から 0.2nm の範囲で変動して接近して来るので、相手船の最接近点は避航危険領域を通過して、潜在的衝突危険度が 100 になることを示している。また、自船は、A1 点を通過後、衝突危険度が 44 の時に針路を 191 度から 201 度に変針して避航を行った後に直進して、A2 点で針路を 187 度に戻して、避航を完了している。

すなわち、回避幅情報は、この避航動作に伴って B1 点を通過後に左側に変移して、自船針路と最接近予測点の離隔距離が約 0.4nm あることを示している。また、B2 点では、回避幅は相手船の船首側 (440m)・船尾側

(370m)、最接近距離は610m あって、船尾側の避航回避幅との離隔距離の余裕を大きく採って、避航十分領域の針路に安全な避航が行われたことを示している。

したがって、回避幅情報の変移と潜在的衝突危険度の間には相関があるので、回避幅情報を観ることによって、最接近予測点と自船針路との離隔距離の余裕を推測できる。また、輻輳航行域の場合は、回避幅と自船針路間の余裕を大きく採って、安全な航行を行っていることが分かる。

Fig.7 Relative track and avoidance width information.

b) 横切り船

Fig.8 には、左舷から右舷への横切り船に対する避航操船時の航行状態の変移を示す。また、Fig.8 の A1 点において相対速度ベクトルが船首方向の回避距離内に入った時の回避距離情報の表示例を Fig.9 に示す。

なお、Fig.8 の自船は輻輳域航行時の「銀河丸」、 $V_o=13\text{kts}$ 、 $\theta_o=188$ 度、 $V_t=9\text{kts}$ 、 $\phi_T=154$ 度 (HUP 時の真針路 $\theta_t=74$ 度)、 $L_o=115\text{m}$ 、 $L_T=141\text{m}$ 、 $L_K=126\text{m}$ である。

Fig.8 の回避幅情報は最初、自船の針路近傍にあって、避航危険領域は、相手船の船首方向では約 0.4nm、船尾方向では約 0.2nm あることを示している。また、回避幅情報が自船針路に接する個所では、潜在的衝突危険度は 100 であるので、最接近予測点が避航危険領域内を通過することを示している。

さらに、この見合い関係では、捕捉後少し経てから相手船が少し増速して、自船針路と回避幅との余裕が少し出来たが、相手船が A1 点に来た時に、自船が他船(第3船)を避航するために針路を 188 度から 201 度に変更したことによって、再び、回避幅情報が自船針路に接近している。Fig.9 は、第3船を避航するために針路を変更したことによって、相対速度ベクトルが回避距離 (940m) の内側に入って、接近した場合の回避距離情報を示している。

Fig.8 Relative track and avoidance width information.

なお、Fig.9 の A1 点、B1 点は Fig.8 のそれらの点に対応していて、Fig.9 の回避距離情報は、回避距離点 (H) と相対速度ベクトル上の最接近点に表示した回避幅情報 (B1') を示している。

この回避距離情報は、両船がこのまま直進すると、相対速度ベクトルが船首方向の避航危険領域内を通過するので、自船の船首方向の距離的余裕が減少して、衝突の危険性が増加することを示している。

したがって、自船は、その後、相手船が Fig.8 の A2 点に来た時に、針路 189 度に 14 度左変針して、回避幅と船首の回避距離の余裕が無い状態で、相手船の船尾側を航過している。

航過時の船尾側の回避幅は 350m、針路と最接近予測点の離隔距離は 400m、最接近距離は 660m あって、潜在的衝突危険度が約 80 に低下しているので、避航十分領域を通過して避航危険領域との間に余裕が少し出来たことを示している。

すなわち、回避幅情報は、自船針路に対して横方向の余裕の判断情報となり、また、回避距離情報は、相対速度ベクトルに対する船首方向の余裕の判断情報となるので、避航操船判断支援情報として有効である。

Fig.9 Avoidance width information and Avoidance distance information.

c) 反航横切り船

Fig.10 には、右舷から左舷への反航横切り船に対する避航操船時の航行状態の変移を示す。

なお、Fig.10 の自船は幅員域航行時の「銀河丸」、 $V_0=14\text{kts}$ 、 $\theta_0=219$ 度、 $V_t=13\text{kts}$ 、 $\phi_T=50$ 度(HUP 時の真針路 $\theta_t=186$ 度)、 $L_0=115\text{m}$ 、 $L_T=126\text{m}$ 、 $L_K=120\text{m}$ である。

Fig.10 の相手船が A1 点にある時、回避幅情報は B1 点にあるので、衝突の危険が高いことが分かる。また、自船は、この見合い関係では避航義務船であり、針路を 219 度から 233 度に避航したことによって、相手船は A2 点に移動して、B2 点での最接近予測点は左側に約 0.3nm 変移して、自船針路と回避幅との余裕を大きく採っている。

さらに、避航変針後の回避幅は 310m、最接近予測点と針路との離隔間距離は 680m あって、潜在的衝突危険度は 10 以下に低下しているので、避航危険領域との余裕を大きく採って、避航十分領域を航行していることが分かる。

したがって、回避幅情報を観る事によって、避航操船の効果を瞬時に把握できる。また、回避幅は、自船と他船の速度、見合い状態、船舶長によって変化するので、航行状態の変化を把握できる。

Fig.10 Relative track and avoidance width information.

d) 反航船

Fig.11 には、左舷から右舷への反航船に対する避航操船時の航行状態の変移を示す。

なお、Fig.11 の自船は狭水域航行時のフェリー「こがね丸」、 $V_0=19\text{kts}$ 、 $\theta_0=249$ 度、 $V_t=11\text{kts}$ 、 $\phi_T=244$ 度(HUP 時の真針路 $\theta_t=164$ 度)、 $L_0=150\text{m}$ 、 $L_T=84\text{m}$ 、 $L_K=121\text{m}$ である。

相手船は、A1 点では回避幅情報が自船針路近傍の B1 点にある避航義務船である。また、相手船は A1 点通過後に真針路を 164 度から 181 度に避航変針してい

る。さらに、避航後の B2 点での回避幅は 350m、最接近予測点と自船針路との離隔距離は 310m ある。

したがって、この回避幅情報からは、相手船の避航操船に伴う最接近予測点と自船針路との余裕の変化が良く分かるので、自船は、相手船の避航操船の効果を瞬時に把握することができる。また、この狭水域航行の場合は、針路と避航危険領域間の余裕が無い状態で航行していることが分かる。

Fig.11 Relative track and avoidance width information.

3.3 避航操船判断支援情報の表示効果

避航操船判断支援情報の表示効果は、次の通りである。

- ① 避航操船判断支援情報からは、避航操船に伴う自船針路と最接近予測点との余裕及び相対速度ベクトルと船首方向の回避距離との余裕の変化が読み取れるので、表示情報を観る事によって、自船及び相手船の避航操船の効果を瞬時に把握することができる。
- ② 相対速度ベクトルと船首方向の回避距離との余裕がある場合、回避幅情報を観る事によって、最接近予測点と自船針路間の余裕と、最接近点までの余裕を推測できる。
- ③ 操船者は、周りの航行環境状態を判断して、回避幅情報を見て、最接近予測点と針路間の離隔距離を大きく採るように操船することによって、避航危険領域を避けて避航十分領域に安全な航行を行うことができる。
- ④ 避航操船判断支援情報は、他船の表示情報と重畳することが少ないので、複数船舶との見合い状態においても航行状態の把握が容易である。

したがって、回避幅と回避距離の表示情報は、避航危険領域に関する注意喚起の警報表示情報として、また、避航操船の判断支援情報として有効である。

4. まとめ

衝突予防援助装置の避航操船判断支援機能の向上を図るために、バンパーモデルの避航領域をモデル化して、実海域で収集した ARPA データを用いたシミュレーションで、避航操船判断支援情報の有効性を検討した。

考察の結果は、次の通りである。

- ① 操船者は、避航操船判断支援情報から自船針路と最接近予測点間の離隔距離の余裕及び相対速度ベクトルと船首上の回避距離との余裕を推測できるので、針路上の衝突の危険性と、自船及び相手船の避航操船の効果を瞬時に把握することができる。
- ② 避航操船判断支援情報は、他船情報と重畳することが少ないので、狭水域航行時の複数船舶との見合い状態においても適用できる。
- ③ 危険船に対して、避航操船判断支援情報を呈示する方式は、見合い状態に関係なく最接近予測点と回避幅及び回避距離に対する認識を一律に向上する方式として有効である。

したがって、回避幅と船首上の回避距離の情報は、避航危険領域に関する注意喚起の警報情報として、また、最接近予測点と自船針路及び船首上の回避距離と相対速度ベクトル間の余裕を判断する時の操船判断支援情報として有効に活用できる。

さらに、将来的には、AIS 搭載船が増えるので、航行船舶の情報精度が向上して航行の安全性向上に寄与するものと考ええる。

参考文献

- (1) 藤井弥平：海上交通工学、海文堂出版、昭和 46 年 11 月
- (2) 有村信夫他：避航領域と衝突危険度判定に関する考察、日本航海学会論文集、第 105 号、P47～P54、平成 13 年 10 月

質疑応答

三好晋太郎（三菱重工業株式会社）：

「避航航路幅」の意味合いについて詳細な説明をお願いしたい。

有村信夫：

予稿集で使った「避航航路幅」は、発表と本文では「回避幅」に言い改めて使ったので、回避幅についてお答えします。

「回避幅」は、他船の真針路上の最接近予測点を自船が避航する場合において、自船の避航危険領域に他船の最接近予測点が侵入するのを避けるために必要な針路の左右への変移幅を言います。

庄司るり（東京海洋大学）：

警報の発生タイミングについては、検討を行っていますか。

有村信夫：

回避情報の警報呈示タイミングは、潜在的衝突危険度が 100 で、且つ現在衝突危険度が 1 以上になった場合に表示します。また、警報の発生タイミングについては、音声警報で別途衝突危険度レベルを考慮した検討を行っています。