避航操船判断情報の支援効果に関する考察

有村 信夫*・福戸 淳司*・田中 邦彦*・岡崎 忠胤*

Study on Support Effect of the Decision Making Information for Evasive Maneuvering

Nobuo ARIMURA, Junji FUKUTO, Kunihiko TANKA and Tadatugi OKAZAKI

Abstract

In this paper, we studied supporting effects of a system which presents avoidance width information necessary for avoiding areas with risks of collision, as supporting information for judgment of evasive maneuvers of an ARPA. In the observations, we conducted experiments of evasive maneuvers based on avoidance width indicating information, by using an ARPA simulator, and studied safety at the closest distance after avoidance.

The following points became clear as a result of the observations:

Avoidance width information enables to grasp areas with risks of collision and the effects of evasive maneuvers instantly. Moreover, this information is useful as supporting information, because it enables to make safety navigation a way from any area with a risk of collision, by making an evasive navigation through an area indicated by the avoidance width information.

keywords: collision avoidance, marine navigation support.

キーワード: 衝突回避、航行支援

1. はじめに

内航船では、少人数当直の運航体制が実施されており、避航操船時の操船者の見張り作業負担の軽減と航行安全の確保が課題になっている。また、輻輳海域における衝突事故を防止するためには、衝突危険船の衝突危険領域に関する情報を操船者が認識し易いように呈示して、確実に伝達することが重要である。

したがって、前報⁽¹⁾では、ARPAの避航操船判断支援機能を向上するため、衝突の危険性を評価する指標に避航領域を定義して、衝突の危険性の高い避航危険領域を避けるために必要な回避幅情報を表示する支援方式について提案した。

本考察では、回避幅の算出方式を改良して、避航操船判断情報としては避航危険領域への他船の侵入を避けるための回避幅と避航針路に対する最接近距離の情報を表示した。また、回避幅情報の支援効果は、ARPAシミュレータ画面の回避幅情報表示領域を被験者が避航するシミュレーション実験を行い、避航後の最接近距離と避航目標に関わる避航危険領域の回避離隔距離を解析して、回避幅情報を用いた航行の安全性について検討した。

2. 実験概要

ここでは、始めに、回避幅情報表示方式で用いる評価指標の避航領域と、回避幅情報について説明を行った後、実験方法について述べた。

2.1 避航領域

回避幅情報の評価指標に用いた避航領域と衝突危険度の算出式については前報⁽¹⁾で報告したので、ここでは横切り船に関する避航領域を Fig.1 に示して、避航領域の概要を説明した。

避航操船判断支援情報に使用する評価指標の避航領域は、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、その外側にあって衝突の危険性が低く、避航操船に余裕がある避航領域(以下、「避航十分領域」と言う。)を持つバンパーモデル⁽²⁾で構成した。また、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各方位の接近速度で停止距離を推定して求めた。さらに、避航領域の境界値は、夫々の半径で楕円形近似した。

* 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)

衝突危険度は、避航危険領域内を100、避航十分領域の外側の境界値を0として、相手船の相対方位上の距離を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 間の距離で、衝突の危険性を数量化した。

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、換算船舶長(L_K)は、自船舶長(L_o)、他船舶長(L_T)と置くと、 $L_K = ((L_o^2 + L_T^2) / 2)^{0.5}$ である。

Fig.1 Evading navigation risk area.

2.2 回避幅情報

船舶の衝突事故を予防するための避航操船判断支援情報としては、避航危険領域への他船の最接近点の侵入を回避するために必要な離隔距離(以下、「回避離隔距離」と言う。)と、衝突可能地点近傍の避航危険領域に対応する避航針路上の最接近距離を把握し易い事が重要である。

したがって、回避幅情報は、避航危険領域への他船の侵入を回避するために必要な回避離隔距離と最接近距離が等しくなる両端方位(Fig.3)から衝突可能地点近傍における回避幅を求めて、自船(◎)に対する他船(A)の回避幅(B)をFig.2に示した。

すなわち、回避幅情報は、前報では避航危険領域の横幅で、相手船が船首方向から接近する場合の避航危険領域の回避幅で近似したが、相手船が相対的に横方

Fig.2 Avoidance width information..

向から接近して、最接近点が自船の船首又は船尾方向の針路近傍にある場合には回避離隔距離が確保できない問題があったので、ここでは、回避幅の算出方法を改良して、Fig.3のグラフで最接近距離との対応付けを行い情報の補足をした。この回避幅の算出方式の改良によって、見合い関係に関わらず、回避幅の両端方位の外側に避航することによって避航危険領域を確実に回避できるようになった。

Fig.3は、横軸に避航針路方位、縦軸に最接近距離を採って、避航針路に対応した最接近距離(実線は避航危険領域、鎖線は避航十分領域)の変化と、避航危険領域と避航十分領域の回避離隔距離(横鎖線)を示す。

Fig.3 Evading navigation dangerous region and avoidance width azimuth information.

Fig.2とFig.3の対応関係では、回避幅情報(Fig.2)の中心が自船針路上にある時には最接近距離(Fig.3)が最小になる最接近点が針路上にあつて、衝突の可能性があることを示している。また、避航危険領域の回避離隔距離(Fig.3)は0.27nmあつて、避航危険領域への侵入を回避するためには左右に約8度以上変針して最接近距離を0.27nm以上に離す必要があることが分かる。

よって、操船者は、回避幅表示領域の外側に針路を採った時の避航針路に対する最接近距離を、Fig.3のグラフ情報から推測することができると共に、避航目標値の回避離隔距離の大きさを把握することができる。

したがって、回避幅は、最接近距離が避航危険領域の回避離隔距離と等しくなる方位(左端： θ_L 、右端： θ_R 、最接近方位： θ_o)、衝突可能地点座標(D_X 、 D_Y)、回避幅を(左辺： H_L 、右辺： H_R)と置いて、式(1)、(2)で与えた。

$$H_L = D_Y \cdot |\tan(\theta_o - \theta_L)| \quad \dots (1)$$

$$H_R = D_Y \cdot |\tan(\theta_o - \theta_R)| \quad \dots (2)$$

2.3 実験方法

避航操船判断支援情報の安全性を確認するためには、操船者が回避幅情報表示領域を避航した場合に、支援情報の避航目標値である避航危険領域の回避離隔距離以上の位置に最接近距離が離れていることが重要である。

したがって、回避幅情報の評価実験は、ARPA シミュレ

ータを作成して、被験者が ARPA シミュレータ画面に表示された回避幅情報の表示領域を避航した後の最接近距離と避航目標に関わる避航危険領域の回避離隔距離との関係を解析して、航行の安全性を確認した。

2. 3. 1 ARPA シミュレータ

実験で用いた ARPA シミュレータの機能は、ARPA 情報表示部、船舶発生部、操船操作部で構成した。

(1) ARPA 情報表示画面

ARPA シミュレータ画面 (Fig.4) には、回避幅情報の他、回避幅の補足情報として、衝突危険船に対する評価指標の避航領域と相対ベクトル、避航方位に対する最接近距離、及び、回避離隔距離等の情報を右図に表示して、ARPA 画面の下部には操船操作ボタンを配置した。

Fig.4 ARPA simulator screen.

(2) 船舶発生

船舶の発生は、見合い状態を反航船、横切り船、同航船に分けて、船舶長、速度、最接近距離、最接近時間、発生位置等を乱数で設定した。

発生船舶の長さは、50m、100m、150mとした。

発生船舶の速度は、船舶長(L)に対する統計値の満載速度(式.3)とした。また、自船の旋回特性は船舶長に対する統計値(式.4)、更に、増減速特性は統計値の停止距離(式.5)を用いて与えた。

$$V_M = \exp(0.368 \cdot \log L + 0.92) \quad \dots (3)$$

$$D_A = \exp(1.122 \cdot \log L + 0.584) \quad \dots (4)$$

$$D_S = \exp(1.446 \cdot \log L + 0.023) \quad \dots (5)$$

衝突危険船の最接近距離は 0.1nm 以下として、最接近時間は 10 分から 15 分の範囲とした。

衝突地点に対する発生位置方位範囲は、1 実験の発生隻数が 1 隻の場合は反航船: 0 度から 20 度、横切り船: 70 度から 110 度、同航船: 160 度から 180 度、また、発生隻数

が複数隻(3隻)の場合は 0 度から 180 度とした。

(3) 避航操船の操作

避航針路は、反航船と横切り船の場合は右舷又は左舷方向に、さらに、右舷から接近する同航船の場合は左舷方向に採った。また、実験における避航操船回数は、一実験で 1 回の避航として、避航針路は 5 度刻みで、回避幅情報表示領域の外側に選択した。さらに、被験者が船舶運航関係者の場合と一般人では、判断情報の収集に差が出ることも考えられるが、今回の実験は一般人によって行った。運航関係者による実験については改めて検討をする予定である。

3. 実験結果

実験では、被験者が ARPA シミュレータ画面に表示した回避幅情報の表示領域を避航した後の最接近距離と避航危険領域の回避離隔距離との関係を調べた。なお、実験は左右両舷からの接近船と複数船舶との見合い状態についても行ったが、実験結果の傾向は同じであったので、ここでは右舷からの 1 隻毎の接近に対する結果を示した。

3. 1 避航操船に伴う回避幅情報の変化

避航操船方法としては、変針避航と速度変更があるので、ここでは、始めに、衝突危険領域に関する回避幅(B)情報の表示領域が自船の針路上にあって、8.4kts で航行する衝突危険船(A)に対して、速度 12.6kts で航行する自船が変針 (Fig.5) と減速 (Fig.7) により避航した場合の回避幅情報と航行状態量の変化を示した。

なお、船舶長は自船: 150m、他船: 50m、回避幅は左舷: 0.35nm、右舷: 0.4nm、相対航跡の表示間隔は 1 分である。また、回避幅情報の表示領域は、自船の左右 50 度の避航範囲とした。

(1) 避航変針に伴う回避幅情報の変化

自船の針路上にある衝突危険船(A)に対して、自船が右舷に 10 度避航変針した場合の相対航跡と、回避幅情報の変化を Fig.5 に示す。

Fig.5 からは、自船針路と回避幅情報の間に少し離隔距離があるので、他船は避航危険領域への侵入を避けて避航十分領域を航行していることが分かる。

次に、自船の避航操船に伴う航行状態量の変化を Fig.6 に示した。なお、Fig.6 の縦軸は最接近時間(TCPA)、横軸には自船針路(Course)、速度、最接近距離(DCPA)、避航危険領域の回避離隔距離(DL)、回避幅の両端方位(θ_w)、潜在的衝突危険度(BI_m)を示す。

Fig.5 Avoidance width information with the veering evading navigation.

Fig.6 の航行状態量は、自船の避航変針に伴って、回避幅情報の表示方位が左に変移して、最接近距離が 0.3nm に増加すると共に、最接近点における衝突危険度（以下、「潜在的衝突危険度」と言う。）が 100 から 80 に低下して、避航危険領域への侵入を回避したことを示している。また、回避離隔距離 (0.25nm) に対する回避幅端の初期方位は、自船針路に対して左端が -7 度、右端が 8 度であるが接近に伴い拡大する。

Fig.6 Marine navigation quantity of state with the evading navigation veering.

(2) 減速に伴う回避幅情報の変移

速度 8.4kts で航行する衝突危険船(A)に対して、自船が速度を 12.6kts から 10.5kts に減速した場合の相対航跡と回避幅情報の変化を Fig.7 に、また、航行状態量の変化を Fig.8 に示した。なお、避航後の回避幅は左辺: 0.4nm 、右辺: 0.43nm である。

Fig.7 の回避幅情報は、自船の減速に伴って、右側に変移して最接近時間が一度大きくなると共に、最接近距離が避航危険領域の回避離隔距離以上に大きくなったことを示している。また、航行状態量からは、自船の減速に伴っ

Fig.7 Avoidance width information with the deceleration.

て、最接近距離 (0.32nm) が避航危険領域の回避離隔距離 (0.26nm) 以上に増加して、潜在的衝突危険度が 75 に低下しているので、安全に避航したことが分かる。

したがって、ARPA シミュレータの表示画面からは、針路や速度の変化に対する回避幅と最接近距離及び回避離隔距離等の航行状態量の変化を把握できる。

Fig.8 Marine navigation quantity of state with the deceleration .

3. 2 避航実験の結果

実験結果は、右舷からの接近船に対する避航変針の結果を示した。なお、実験回数は 300 回である。

3. 2. 1 避航後の回避離隔距離

回避幅情報に基づいて避航操船を行った時の実験結果としては、避航後の最接近距離が避航危険領域の回避離隔距離より大きくなることが重要である。

始めに、避航目標に関わる避航危険領域の回避離隔距離分布は、横軸に回避離隔距離の換算船舶長 (L_K) 比、

縦軸に頻度(F)を採って、Fig.9 に示した。

見合い状態毎の避航危険領域の回避離隔距離は、反航船では $1L_K$ から $3L_K$ 、横切り船では $2L_K$ から $5L_K$ 、同航船では $1L_K$ から $5L_K$ である。また、横切り船の回避離隔距離は、反航船に対して大きい。更に、同航船の回避離隔距離は、相対ベクトルが自船針路に平行な場合は小さいが、自船針路と相対ベクトルの交差角が大きい接近船の場合には大きくなっている。

Fig.9 Avoidance separation after the evading navigation.

3. 2. 2 避航後の最接近距離

避航操船後の最接近距離は、Fig.10 の横軸に最接近距離の換算船舶長比、縦軸に頻度(F)を採って、見合い状態毎に示した。

最接近距離の換算船舶長比分布は、反航船では $2L_K$ から $5L_K$ 、横切り船では $3L_K$ から $7L_K$ 、同航船では $2L_K$ から $10L_K$ あって、回避離隔距離分布に対して大きい。また、同航船の最接近距離は、接近状態の同航船で相対ベクトルと自船針路の交差角が大きい場合に大きくなっている。

3. 2. 3 避航後の最接近距離に対する回避離隔距離比

避航操船判断支援情報の安全性を確認するためには、避航後の最接近距離が回避目標の避航危険領域の回避離隔距離より大きいことが重要である。

ここでは、回避幅情報の支援効果を確認するために、

避航実験における避航後の最接近距離と回避離隔距離の比をFig.11 に示した。なお、Fig.11 の横軸は避航後の最接近距離に対する避航危険領域の回避離隔距離との比、縦軸は頻度(F)を見合い状態毎に示す。

最接近距離と回避離隔距離との比は、見合い状態に関わらず1より大きい。すなわち、避航後の最接近距離が回避離隔距離より大きいことは、避航危険領域への他船の最接近点の侵入を回避していることを示している。

Fig.10 Closest approach distance after the evading navigation.

3. 2. 4 避航後の潜在的衝突危険度

回避幅情報を用いた避航操船の安全性を確認するため、避航後の潜在的衝突危険度を Fig.12 に示した。

なお、Fig.12 の横軸は潜在的衝突危険度、縦軸は頻度(F)を示す。

潜在的衝突危険度分布は見合い状態によって異なるが、衝突危険度が100の避航危険領域への航行を回避して、100以下の避航十分領域へ避航している。

したがって、回避幅情報を避航する方式では、避航目標の避航危険領域への最接近点の侵入を回避しているので航行の安全が確保されていることが分かった。

3. 3 避航操船判断情報の支援効果

避航操船判断情報の支援効果は、次の通りである。

Fig.11 Correspondence condition independence evading navigation post-close approach distance and avoidance separation.

Fig.12 Degree of the latent collision risk after evading navigation.

- ① 回避幅表示情報を避航した後の最接近距離は避航目標の回避離隔距離以上の距離にあって、避航危険領域への他船の最接近点の侵入を回避しているため、回避幅情報は避航操船判断支援情報として安全に機能している。
- ② 操船者は、避航針路に対する最接近距離と避航目標値の回避離隔距離の大きさを、グラフ情報から推測することができると共に、自船及び相手船の避航操船効果を容易に把握することができる。

4. まとめ

本考察では、ARPA の避航操船判断支援機能を向上するため、評価指標要素に船舶の停止性能特性を取り入れて、衝突の危険性の高い避航危険領域への侵入を避けるために必要な回避幅情報表示方式の支援効果について検討した。

回避幅情報の支援効果は、ARPA シミュレータを用いた避航シミュレーションで、被験者が回避幅情報の表示領域を避航した後の最接近距離と、避航危険領域の回避離隔距離との関係を解析して、回避幅表示情報を用いた避航操船の安全性を調べた。

考察の結果は、次の通りである。

- ① 避航後の最接近距離は、避航危険領域の回避離隔距離よりも大きい距離に分布していて、避航目標の避航危険領域を回避しているため、航行の安全が確保されている。
- ② 避航針路に対する最接近距離のグラフ情報からは、回避幅情報の表示領域を避航するために必要な針路上の最接近距離と回避離隔距離の推測、及び、避航操船に伴う航行状態量の変化を容易に把握できる。

したがって、回避幅情報は、避航危険領域への他船の侵入を避けるための支援情報として、また、見張り情報収集負担の軽減、及び、航行の安全性向上に寄与する。

参考文献

- (1) 有村信夫他：避航操船判断支援情報に関する考察、日本航海学会論文集、第111号、P103～P111、平成16年10月
- (2) 藤井弥平：海上交通工学、海文堂出版、昭和46年11月

質疑応答

新井康夫（海技大学校）：実施されたシミュレーションにおいて、計器やレーダ映像のプロットポイントのズレなどによる影響はどの程度でしょうか。

有村信夫：計器の精度や捕捉誤差についての検討は、行っていませんが、ARPA データを用いた回避幅情報表示の適応実験では避航針路の変動に与える影響が約 ± 3 度の範囲でした。

広野康平（神戸大学）：ご提案の表示の中で、レーダ画面上に表示される「回避幅バー」の最接近までの時間は相対的な距離に応じていますでしょうか。つまり、この表示を見るもの（操船者）として、複数の船舶にかこまれた場合、一番近い「バー」からの避航判断の参考としていって問題ないでしょうか。

有村信夫：回避幅バーまでの最接近時間は、避航針路に対する最接近距離が最小となる点までの相対距離に対応しています。また、複数船舶との見合い状態においては、回避幅バーが自船針路に近いほど衝突の危険性が高いものと考えて避航操船を行う必要があります。