

22 衝突予防支援方式の評価技術に関する研究

輸送高度化研究領域 高度運航研究グループ

* 有村信夫、福戸淳司、田中邦彦、岡崎忠胤
吉村健志

海上安全研究領域 総合安全評価研究グループ（元） 劉 峭

1. まえがき

内航船舶では、航行の安全確保と操船者の作業負担軽減の課題がある。

船舶の衝突事故予防支援情報は、操船者の避航操船判断感覚に適合した評価指標で衝突危険領域（以下、「避航領域」と言う。）を評価して、衝突予防支援装置で発生する警報情報及び避航操船判断支援情報と操船者間の情報伝達効率を向上してヒューマンエラーを少なくすることが重要である。さらに、避航操船判断支援情報としては、衝突の危険性の高い避航領域への他船の侵入を避けるために必要な最接近点方向の離隔距離（以下、「回避離隔距離」と言う。）と、衝突可能地点近傍の避航針路上の「最接近距離」、及び、避航領域への他船の侵入を回避するために必要な避航針路方位の「回避幅」が容易に分かる事が重要である。

本研究では、船舶の衝突事故予防と操船者の見張り作業負担軽減を目的に、避航操船判断を支援する「回避幅情報表示方式」を提案^{(1)、(2)}した。

なお、回避幅表示支援方式（Avoidance Width Display Support System.）の略称は「AWDSS or AWDAS」とする。

回避幅情報表示方式の安全性と支援効果は、①ARPA画面情報に基づく避航操船シミュレーション実験、②操船シミュレータを用いた避航実験、③実船のARPA航跡データを用いたシミュレーション実験を行って検証した。

実験の結果、回避幅情報表示方式は、船舶の衝突事故防止と航行安全の確保、及び、操船者の避航操船判断情報処理負担の軽減に寄与することが分かったので報告する。

2. 回避幅情報表示支援方式

操船者の避航操船判断を支援する回避幅表示方式では、衝突の危険性の高い避航領域への他船の侵入

を避けるために必要な最接近点方向の「回避離隔距離」と避航針路方位の「回避幅」、衝突可能地点近傍の避航針路上の「最接近距離」が容易に分かるように表示した。

2.1 回避幅情報表示方式の概要

回避幅情報表示方式の概要は、以下に述べる。

2.1.1 回避幅情報表示方式

回避幅情報は、自船(◎)に対する他船(A)の衝突可能地点における避航に必要な回避幅を図1のB点に表示した。

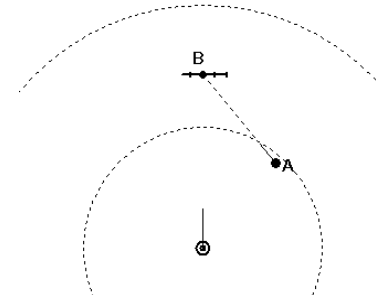


図1 回避幅表示情報

次に、回避幅の算出に必要な避航領域と避航方位上の回避離隔距離及び最接近距離の関係は、図2に示した。なお、図2の横軸には避航針路方位（単位：度）、縦軸には最接近距離（単位：nm）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）と、避航危険領域と避航十分領域の回避離隔距離を横鎖線で示した。

図1の回避幅の中心値は、図2の最接近距離の最小値に対応していて、衝突の危険性があることを示している。また、回避幅表示領域への侵入を避けるためには、左右いずれかに約8度以上変針して避航する必要があることを示している。

回避幅(左辺: H_L 、右辺: H_R)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_0)と、衝突可能地点(D_X 、 D_Y)までのY座標値: D_Y を要素にして、式(1)、(2)で算出式した。

$$H_L = D_Y \cdot |\tan(\theta_0 - \theta_L)| \quad \dots (1)$$

$$H_R = D_Y \cdot |\tan(\theta_0 - \theta_R)| \quad \dots (2)$$

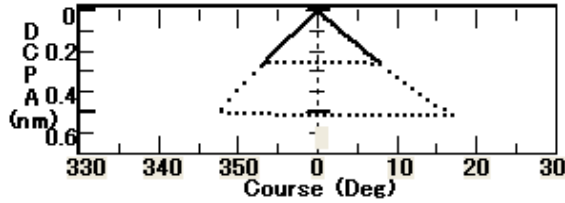


図2 避航針路とDCPA及び回避離隔距離の関係

2.1.2 避航領域の定義

回避幅算出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、その外側にあつて衝突の危険性が低い避航領域（以下、「避航十分領域」と言う。）を持つバンパーモデルで定義して、図3に示した。

避航領域の大きさは、実船調査で収集したARPA航跡データの解析で求めた閉塞領域の値を基にして、自船と相手船の見合い状態から相対速度ベクトルと最接近点方向の接近速度と換算船舶長、及び、停止距離を要素にして表した。

なお、図3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。

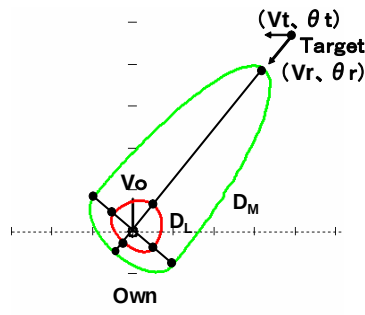


図3 評価指標の避航領域

避航領域の算出要素の停止距離: $D_S(L_K, V_S)$ は、操縦性能データを基に、自船と他船による換算船舶長: L_K と接近速度: V_S を要素とする式(3)で推定した。

$$D_S(L_K, V_S) = \exp(1.25 \cdot \log(L_K) + 0.35 \cdot \log(V_S) + 0.008) \quad (m) \dots (3)$$

図3に示す避航領域の半径 D_{LF} は避航危険領域の相対速度ベクトルに対して前後方向の避航危険距離、 D_{LS} は相対速度ベクトルに対して垂直左右方向の航過危険距離、 D_{MF} は避航十分領域の相対速度ベクトル前後方向の避航十分距離、 D_{MS} は相対速度ベクトルに対して垂直左右方向の航過十分距離、避航十分余裕時間: T 、相対速度移動距離: $V_S \cdot T$ 、停止距離で規格化した航行海域の評価指標換算係数:例えば C_{LS} を用いて、式(4)から式(7)で示した。

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 の中の最大速度に対する速度変動値は $V_S = 0.079 \cdot \max(V_o, V_t, V_r)$ とした。

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

$$D_{LF} = C_{LF} \cdot D_S(L_K, V_S) \quad (m) \dots (5)$$

$$D_{MS} = C_{MS} \cdot D_S(L_K, V_S) \quad (m) \dots (6)$$

$$D_{MF} = V_S \cdot T \quad (m) \dots (7)$$

避航領域の半径の避航距離は、実船調査データの解析で求めた他船が侵入しない閉塞領域の値を用いて、換算船舶長と接近速度を要素にした停止距離で規格化した。狭水域航行時の避航領域評価指標の停止距離換算係数は、式(8)から式(10)に示した。

$$\text{避航危険距離: } D_{LF} = 1 \cdot D_S(L_K, V_S) \quad \dots (8)$$

$$\text{航過危険距離: } D_{LS} = 0.6 \cdot D_S(L_K, V_S) \quad \dots (9)$$

$$\text{航過十分距離: } D_{MS} = 1.2 \cdot D_S(L_K, V_S) \quad \dots (10)$$

上式の記号は、以下に示す。

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

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

$$V_S = V_{SO} + V_{ST} : \text{接近速度}$$

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

$$\phi_B : \text{自船の接近速度方位}$$

$$\phi_{BT} : \text{他船の針路と接近速度方位間の仰角}$$

2.1.3 衝突危険度

衝突危険度 BI 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 間の距離で数量化した。

$$BI=100 \cdot (D_M-R)/(D_M-D_L), (D_L \leq R \leq D_M) \quad \dots (11)$$

$$BI=100 \quad (R \leq D_L), \quad BI=0 \quad (D_M \leq R)$$

2.2 回避幅情報表示画面

ARPA画面の図4には、回避幅情報を表示すると共に、右図には衝突危険船に対する評価指標の避航領域と相対速度ベクトル、避航方位に対する最接近距離、回避離隔距離等の情報を表示した。

なお、回避幅情報の表示範囲は、最接近点方位の左右50度の避航方位とした。

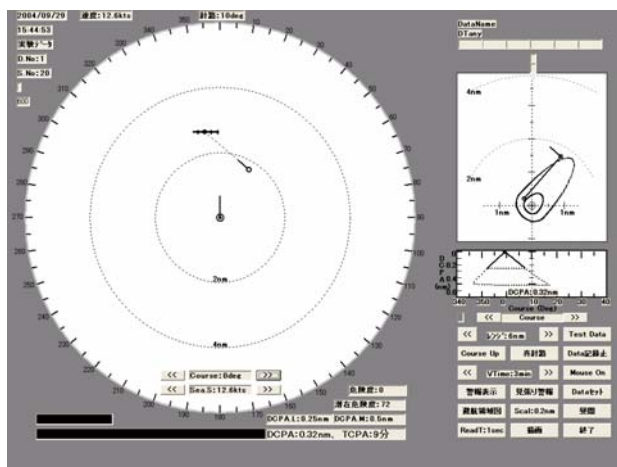


図4 回避幅情報表示画面

2.3 支援方式の評価実験方法

回避幅情報表示方式の安全性と支援効果の評価実験は、以下の3方式で行った。

(1) ARPA シミュレータを用いた避航操船実験

評価実験における被験者は、ARPA シミュレータ画面に表示された回避幅情報を見張り情報として、ARPA画面(図4)の下部には、操船操作ボタンを配置して避航操船を行った。また、避航実験の被験者は運航経験の無い人が行い、避航針路は5度毎に回避幅情報表示領域の外側に選択した。

実験では、1回の見合い関係で1回の避航操船を行い、避航操船のやり直しは行なわない事として、300回行った。

(2) 操船シミュレータを用いた評価実験方法

操船シミュレータを用いた評価実験では、見張り支援情報として、①ARPA情報表示方式、②ペダルセンVCASS表示方式(ここではPD方式と言う。)⁽³⁾、

③回避幅情報表示方式について各4回行って、支援方式を用いた避航操船による航行の安全性を比較検討した。また、航行の危険性を判断する避航領域評価指標の安全性評価は、海域の狭水域評価指標と狭水域評価指標の1/2倍の避航距離係数について検討した。また、操船実験では、操船実務経験者である被験者が操船シミュレータによる習熟運転を行った後に、各支援情報を見張り情報として、適宜、加減速または旋回による避航を行い、避航後は元針路に復帰した。

なお、船舶の操縦性運動モデルは100m級の一般内航貨物船のモデルを用いた。また、支援方式に対する操船者の主観的意見は、実験終了後、インタビューとアンケートで調査した。

(3) 実船航跡データを用いた評価実験

回避幅情報の実海域における安全性と適応性は、実船 ARPA 航跡データを用いたシミュレーション実験で検討した。

3. 実験の結果

回避幅情報表示方式を用いた航行安全性と支援効果の実験結果は、以下に示した。

3.1 回避幅情報表示方式の避航実験結果

回避幅表示情報を用いて航行の安全性を確保するためには、回避幅表示領域を避航した時に、避航後の最接近距離が避航目標の回避離隔距離より大きくなることが重要である。

実験結果は、①避航前の避航危険領域の回避離隔距離分布を図6に、②避航後の最接近距離と回避離隔距離比分布を図7に示した。

(1) 避航前の回避離隔距離分布

避航目標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)を採って図6に示した。また、避航目標の回避離隔距離は、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 $5L_K$ あつて、見合い状態で異なる。

(2) 避航前後の最接近距離と回避離隔距離の比較

避航操船の安全性評価は、見合い状態別に避航後最接近距離に対する避航目標の回避離隔距離との比を横軸に、また、縦軸には頻度(F)を採って、図7

に示した。図 7 の避航操船後の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 より大きい距離に分布して、避航危険領域への他船の侵入を回避していることを示している。

避航操船実験の結果、1 回の避航判断による操船で、避航危険領域への侵入を回避して、避航後の安全が確保されていることを確認した。

したがって、回避幅表示方式の支援情報が操船者に正確に伝達していることが分かった。

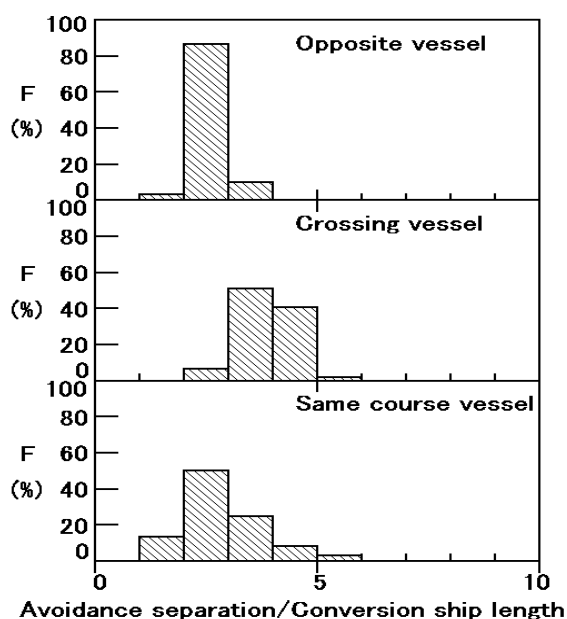


図 6 回避離隔距離の換算船舶長 (L_K) 比

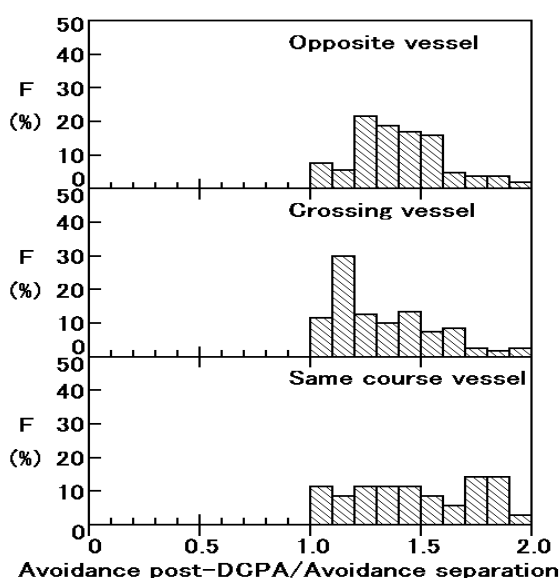


図 7 避航後の最接近距離と回避離隔距離の比

3. 2 操船シミュレータを用いた避航操船実験結果

操船シミュレータを用いた支援方式の安全性の評価実験では、被験者が ARPA 情報と回避幅情報を見張り情報として、避航操船を実施して、航行の危険性と航行安全の改善効果を解析した。

3. 2. 1 避航操船に伴う航跡の変化

避航操船結果の航跡は、ARPA 表示方式を図 8、回避幅表示方式を図 9 に示した。

なお、ARPA 画面の表示レンジは 1nm、航跡間隔は 120 秒、最接近点における航跡は、警報対象危険船の識別は衝突危険度 = 100 の点を●、警報対象注意船は衝突危険度 < 100 の点を○で示した。

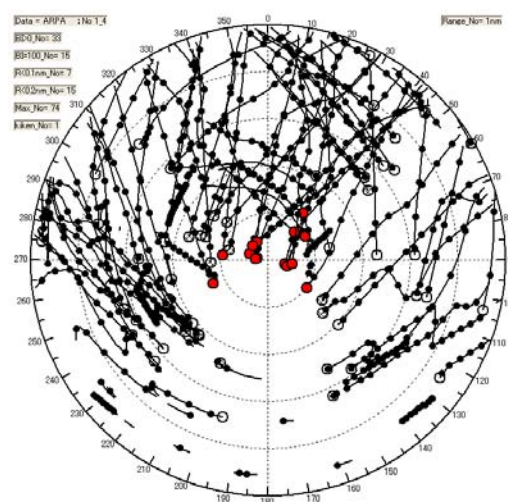


図 8 ARPA 表示情報による避航航跡

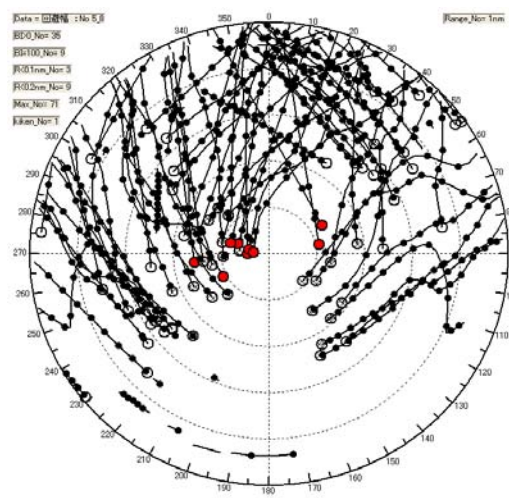


図 9 回避幅表示情報による避航航跡

3. 2. 2 避航操船に伴う避航操船危険船数

避航操船に伴う支援方式別、評価項目別の衝突危険船隻数の変化は、左からARPA情報表示方式、ペデールセン危険表示方式（PD方式）、回避幅危険領域表示方式（狭水域指標の1/2、狭水域指標）について、図10に示した。なお、図10の評価項目は、左側から警報対象船隻数、航過時の衝突危険度BI=100の危険船隻数、衝突事故船隻数、船首避航距離以内の通過船隻数、及び、警報対象船の1ステップ当たりの平均衝突危険度として、警報対象船を100隻として規格化して示した。

支援方式毎の危険船隻数変化は、次の通りである。

- ① ARPA表示方式の航行時の警報対象船隻数は50隻、通過時の衝突危険度BI=0以上の注意船は33隻、衝突危険度BI=100の危険船は15隻、衝突事故船隻数は1隻、船首避航距離0.2nm以内の通過船隻数は3隻、0.4nm以内の通過船隻数は9隻であった。また、警報対象船の1step当たり平均衝突危険度は67であった。
- ② 回避幅情報表示方式の航行時の警報対象船隻数は50隻、通過時の危険度BI=0以上の注意船は26隻、危険度BI=100の危険船は5隻、衝突事故は発生無し、船首避航距離0.2nm以内の通過船と0.4nm以内の通過船隻数は0隻であった。また、警報対象船の1step当たり平均衝突危険度は48であった。

支援方式の評価実験の結果、評価項目毎の避航操船による危険船隻数は、①ARPA情報表示方式、②ペデールセン危険表示方式（PD方式）、③回避幅情報表示方式（③狭水域指標の1/2倍、④狭水域指標）の順番で低下するので、視覚情報伝達量が表示方式によって異なるものと考えた。

3. 2. 3 避航操船の安全性改善度

回避幅情報表示方式を用いた避航操船の安全性評価は、ARPA表示方式を用いた避航操船による危険度指数を基準にして、定量的且つ「総合的避航操船危険度指数」で数量化した。また、避航操船の安全性の改善度は、ARPA表示方式を用いた場合に対する避航操船における航行安全の改善度指数で示した。

以下に、回避幅情報表示方式とARPA情報表示方

式を用いた避航操船の安全性評価結果を示す。

- ① 総合的避航操船危険度は、ARPA情報表示方式の評価指数を100%とすると、回避幅情報表示方式では31%であって、69%低下する。すなわち、避航操船に伴う航行の安全性が69%改善することが分かった。
- ② 回避幅情報表示方式の避航領域係数に狭水域評価指標を用いた場合の避航操船危険度は31%で有るのに対して、狭水域指標値の1/2倍を用いた場合の避航操船危険度は41%で高い。さらに、回避幅情報表示方式を用いた避航操船では、ARPA情報を用いた避航操船に比較して、自船の針路近傍に他船が侵入しない安全な閉塞領域が大きく確保されていて、避航後の最接近点通過時における危険船は少なく、衝突事故は発生していない。すなわち、狭水域評価指標の避航領域係数は、安全で妥当であることが分かった。
- ③ アンケートの結果、避航針路の危険範囲を示す回避幅（横棒）情報は、単純明快で受け入れやすく、使い易いと評価された。

したがって、回避幅情報表示方式による避航操船の安全性は、ARPA表示方式に比較して、69%改善向上する。すなわち、避航操船判断時の操船者への視覚情報伝達効率が改善して、避航操船判断情報処理時の表示情報判読精度が向上して、航行の安全確保に寄与しているものと考えた。

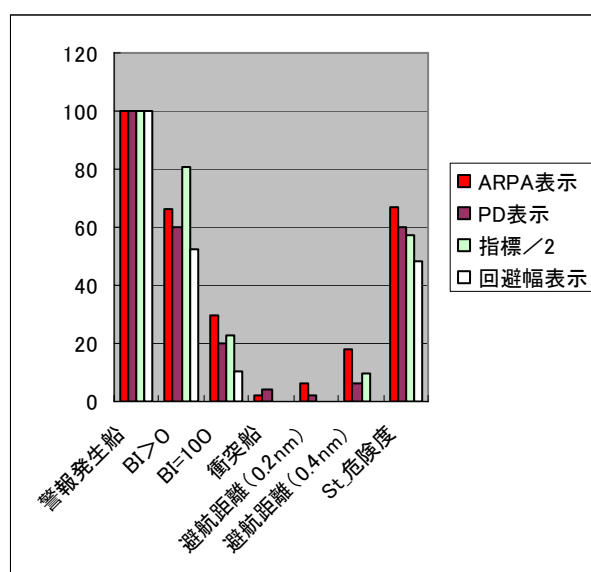


図10 支援方式による危険船とSt危険度の比較

3.3 実海域実船航跡データを用いた評価実験

回避幅情報表示方式の実海域における実船での使用状況と安全性を確認するために、実海域における実船調査の ARPA 航跡データを用いたシミュレーション実験を実施して、横切り船に対する航行状態量変移を図 11 に示した。なお、自船は幅横域航行時の「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。

図 11 の回避幅は、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、相手船が A1 点に来た時に、自船が第 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、回避幅情報は自船針路に接近して、自船は相手船が A2 点に来た時に、針路 189 度に 14 度左変針して、相手船の船尾側を安全に避航している。

シミュレーション実験の結果、回避幅表示情報は、幅横海域の実船においても、安全に表示されていて、避航操船判断時の支援情報として有効に機能していることを確認した。

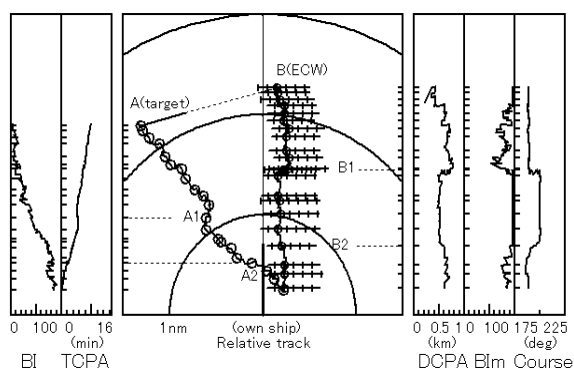


図 11 避航変針に伴う回避幅情報の変移

4. まとめ

本研究では、衝突事故予防の避航操船判断情報支援方式としては回避幅情報表示方式を提案した。

回避幅情報表示方式の安全性評価は、①ARPAシミュレータ、②操船シミュレータ、③実船調査のARPA航跡データを用いてシミュレーション実験を行

って検討した。また、実験結果は次に示した。

- ① 回避幅情報表示方式では、避航操船に伴う回避幅、針路上の最接近距離、回避離隔距離、航行状態量把握情報が確実に伝達できるため、1回の避航操船で安全確実に避航できることを確認した。また、操船者は、回避幅情報から、避航針路に対する最接近距離と避航目標値としての回避離隔距離の大きさを、グラフ情報から判断して、避航操船の効果を容易に把握することができることを確認した。
- ② 回避幅情報表示方式では、ARPA情報表示方式に比較して、避航操船によって他船が侵入しない閉塞領域が十分に確保されているので衝突事故が発生せず、避航操船判断の安全性が高上することを確認した。
- ③ 回避幅情報表示方式を用いた場合の総合的避航操船危険度はARPA情報表示方式に比較して69%低下する。したがって、航行の安全性が69%改善していることが分かった。
- ④ 回避幅情報表示方式は、実船データでも船舶の衝突事故を回避する支援情報として、また、複数船舶との見合い状態中에서도表示情報の重量が少ないので、航行状態の把握に有効である。したがって、回避幅情報表示方式では、衝突事故が予防回避されているので、操船者の避航操船判断時の視覚情報伝達効率が良く改善して、判読情報の精度が高上していることを確認した。よって、航行安全の確保と、見張り作業負担軽減に寄与する。

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) 有村信夫他：避航操船判断支援情報の支援効果に関する考察、日本航海学会論文集、第 112 号、P117～P123、平成 17 年 3 月
- (3) On Decision Making in Connection with Optimal Anti collision Manoeuvres by High Speed Craft in Waters Congested by Conventional SpeedVessels, Japan Institute of Navigation, Vol. 107, 2002, 10