

衝突予防援助装置の機能向上と支援効果の評価に関する研究

福戸 淳司*、有村 信夫*、丹羽 康之*、沼野 正義*
岡崎 忠胤**、劉 峭***

Study on Function Improvement of Automatic Radar Plotting Aids and Evaluation of the Support Effect

Junji FUKUTO, Nobuo ARIMURA, Yasuyuki NIWA, Masayoshi NUMANO,
Tadatsugi OKAZAKI and Qiao LIU

Abstract

This paper discusses functional improvement of ARPA (Automatic Radar Plotting Aids) and its effectiveness for the prevention of collision.

In sea traffic, since ships are operated by the limited number of watch officer, there are some problems of preventing possible human errors when avoiding collision situation. To prevent possible collision accident, it is vitally important that the support function of assessing collision risk by ARPA should be improved and its effectiveness of support should also be assessed.

To solve this problem, we recommended in this study an advanced ARPA in which navigational and environmental assessment function and avoiding and maneuverable assessment support function are added to and incorporated into the function of the conventional ARPA.

We also discussed and studied on the effectiveness of avoidance with display from the aspects of information reading and recognizing error, reliability of information indicated on the affordability of avoiding possible collision and effectiveness to reduce the danger in avoiding collision when ships sail and maneuver.

After discussion and study, it was found that the support effectiveness by the advanced ARPA was far improved and recognized compared to the conventional ARPA indicating system. Improvements thus made cover the following;

- (1) It was found that information reading and recognizing error by the advanced ARPA has been considerably reduced compared to the conventional one.
- (2) With the advanced type ARPA in use, a ship is able to avoid the risk of entering dangerous area feared to collide with other ship simply by a judgment once made in maneuvering and avoiding collision of ship.
- (3) The danger of collision when ships sail and maneuver can be reduced to approx. 32% of the level when using the conventional ARPA indicating system.

* 運航・システム部門、** 東京海洋大学、*** 日本原子力研究開発機構

原稿受付 平成20年 3月 24日

審査済 平成20年 7月 3日

目次

1.	はじめに	34
2.	衝突事故予防対策に関する課題	34
2.1	衝突事故発生原因の分析	34
2.2	見張り観測距離誤差の調査	36
2.3	衝突事故の予防対策	38
3.	改良型 ARPA の開発	38
3.1	改良型 ARPA システムの構成	38
3.2	航行環境評価指標	39
3.2.1	閉塞避航領域モデル	39
3.2.2	閉塞避航領域要素の解析方法	40
3.2.3	操縦性能制動停止距離特性の解析	40
3.2.4	閉塞避航領域の調査	41
3.2.5	閉塞避航領域のシミュレーションによる検証	42
3.3	回避幅情報表示呈示支援方式	48
3.3.1	回避幅表示情報	48
3.3.2	回避幅情報のシミュレーション	50
4.	支援機能の評価	51
4.1	実験方法	51
4.1.1	回避幅表示情報の安全性に関する実験	51
4.1.2	支援情報の判読認識エラーに関する実験	52
4.1.3	避航操船判断支援効果に関する実験	52
4.2	実験結果	53
4.2.1	回避幅表示情報の安全性	53
4.2.2	支援情報の判読認識エラー	54
4.2.3	避航操船判断支援効果	56
4.3	まとめ	59
5.	あとがき	59
	参考文献	60

1. はじめに

海上交通では、航行海域が輻輳化する中で、航行船舶の大型化、高速化、運航要員の少人数化が進んでいるため、航行安全の確保と操船者の見張り作業負担の軽減が重要な課題になっている。また、衝突予防援助装置（ARPA：Automatic Radar Plotting Aids）¹⁾では、衝突危険船に対する警報情報を、ブザー、ベクトル、シンボル等で呈示しているために、操船者は、ベクトル情報から衝突危険船、衝突位置、衝突危険領域等の情報を推測して避航操船判断を行っているが、ARPA ベクトル情報判読時の認識誤差があるために、避航操船判断時においてヒューマンエラーが発生する原因になっている。さらに、不要な警報の発生頻度が高いため、警報の確

認作業を繁雑に感じて、警報発生機能を停止して航行する事態が発生しており、衝突事故の発生が懸念されている。

一方、近年、船舶自動識別システム（AIS：Automatic Identification System）²⁾の搭載が、内航船においては500トン以上の船で義務化されていて、相手船の航行情報の他に、諸元情報を得る事ができる様になった為、船舶の諸元や性能特性の情報を、警報検出要素の中に組み入れて、衝突予防援助機能の高度化を図ることが現実に可能になった。

本研究では、衝突予防援助機能を高度化することを目的として、各々の船舶が ARPA や AIS 等で入手した他船データを基に、相手船の制動停止距離特性を推定して、航行の危険性を判断する航行環境評価指標の“閉塞避航領域”を算出する手法と、避航操船の原点となる周囲の航行環境状態の的確な把握、及び、避航操船判断の最適化が図られる様に支援情報を提供する改良型衝突予防援助方式（以下、「改良型 ARPA」と言う。）を提案して、その支援効果について検討した。

本報告では、始めに、衝突事故の発生原因について分析して、衝突事故の予防対策上の課題を示した。

次に、ARPA の航行環境評価指標を実現する際に重要な要素となる船舶制動停止性能特性の解析、実船観測データを基にした避航最小領域の調査と航行環境評価指標のモデル化、及び、回避幅情報表示呈示支援方式について検討して、改良型 ARPA を提案した。

考察の結果、改良型 ARPA は、在来型 ARPA に比較して、情報判読認識エラーが低減して、避航操船判断支援効果が向上することを検証したので報告する。

2. 衝突事故予防対策に関する課題

ここでは、衝突事故予防支援対策を示す目的で、船舶の衝突事故発生原因の分析と、ヒューマンエラーの一要素である見張り作業時の目視距離観測誤差の調査を行った。

2.1 衝突事故発生原因の分析

船舶衝突事故の原因は、海難審判の現況、狭水域における海難事故実態等の調査資料（海難審判の現況・平成12年度版³⁾、海難審判庁発行の狭水道に於ける海難の実態⁴⁾、及び、海難レポート2007・平成19年度版⁵⁾）のデータを引用して分析した。

始めに、平成18年度海難事故裁決件数を、図2-1に示す。

平成18年度海難事故裁決の対象となった船舶数は、全体で1,061隻、また、主な海難種類別裁決隻数は、衝突事故は568隻、衝突（単）は63隻、乗り揚げは167隻であって、衝突事故の裁決頻度が特に高く、衝突事故予防支援対策が特

に重要であることが分かる。

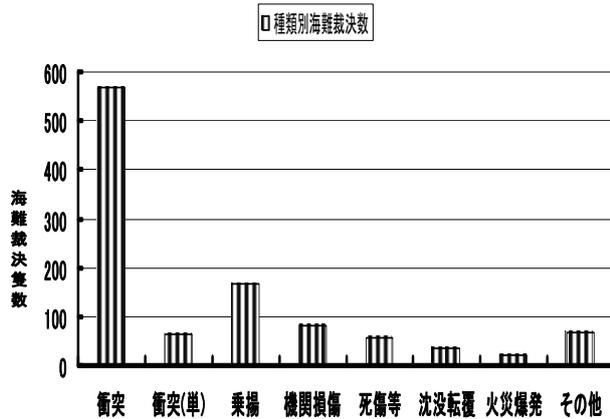


図 2-1 海難事故の種類別裁決件数

以下、ここでは、衝突事故の発生原因と発生状況を把握するために、衝突事故船の船種別分布、衝突事故発生時の避航措置状況及び避航措置時期、当直者数、見会い状態別事故発生頻度等を示した。

(1) 衝突事故原因

平成 18 年度の衝突事故原因の内訳は、見張り不十分は 54%、航法不遵守は 18%、信号不履行は 11%で、操船判断時のヒューマンエラーが約 86%発生している。

見張り不十分と判定された被衝突事故船による相手船の認識状況は、次の通りである。

- 見張り行為がなかった船；28%
- 衝突直前まで相手船を認識していない船；45%
- 相手船を視認していたが衝突判断の動静監視が不十分であった船；27%

見張り行為が無かった船について分類すると、不在橋は 62%、操舵室内で他の作業中は 29%である。また、衝突直前まで相手船に気づかなかった原因は、漫然と航行が 30%、死角を補う見張りを行わなかったが 25%である。

さらに、相手船を視認していたが動静監視が不十分で衝突事故に至った理由は、次の通りである。

- そのままで危険は無いと思った船；49%
- 相手船が避けてくれると思った船；22%
- 避航措置を取ったので大丈夫と思った船；11%
- 接近までまだ余裕があると思った船；5%
- その他；10%

即ち、衝突事故予防対策としては、船橋及び船橋以外に居る操船者に対しても衝突の危険を確実に伝達する必要がある。

(2) 衝突事故船の船種別分布

衝突事故裁決船の船種別分布 (568 隻) を、図 2-2 に示す。

衝突事故件数の高い船種は、貨物船は 128 隻、漁船は 225 隻、プレジャー船は 81 隻であって、漁船が突出している。

即ち、漁船等では、ARPA 等の航行支援装置を搭載していない船による衝突事故が際だつ傾向にあるためと考えられる。

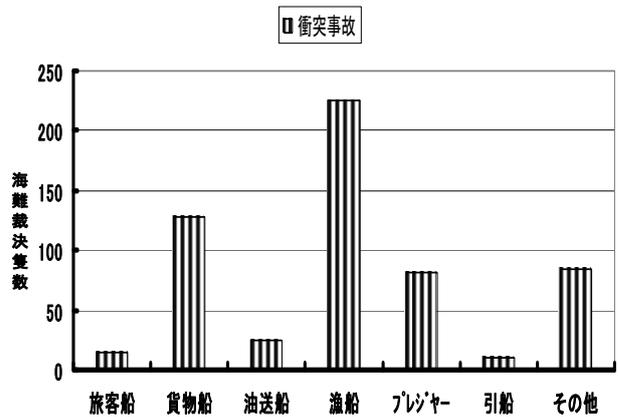


図 2-2 衝突事故裁決船の船種別分布

(3) 避航措置状況

衝突事故船の避航措置状況 (288 件) を調べると、避航措置頻度の高い船種は、旅客船は 80%、貨物船は 70%、油送船は 70%である。また、反対に避航措置を採らないで衝突した頻度の高い船種は、プレジャーボートは 100%、漁船は 80%である。

即ち、避航措置を採らなかった船の多くは、動静監視を怠って、衝突危険船に関する認識が欠落した為と考えられる。

(4) 避航措置の時期

避航措置を採った衝突事故船の避航開始時期の分布 (147 件) を、図 2-3 に示す。

避航措置を採った時期は、衝突直前 1 分未満は 81%、1 分以上 2 分未満は 15%である。また、避航措置時期が 2 分未満であった船は、全体の 96%を占めていて、最接近時間余裕が 3 分以上ある場合には事故発生頻度が大幅に減少することが分かる。さらに、衝突事故船の多くは、衝突直前まで相手船を視認していないか、衝突危険判断の動静監視及び操船判断に錯誤があって、避航時期が遅れた場合が多いものと考えられる。

即ち、見張り支援情報は、最接近時間の余裕が 3 分以上ある早い時期に、伝達する必要があることが分かる。また、航行の安全を確保するためには、衝突危険船の接近に関する“警報対象船”を自動検出して、早期に確実に情報伝達する支援システムが有用であるものと考えられる。

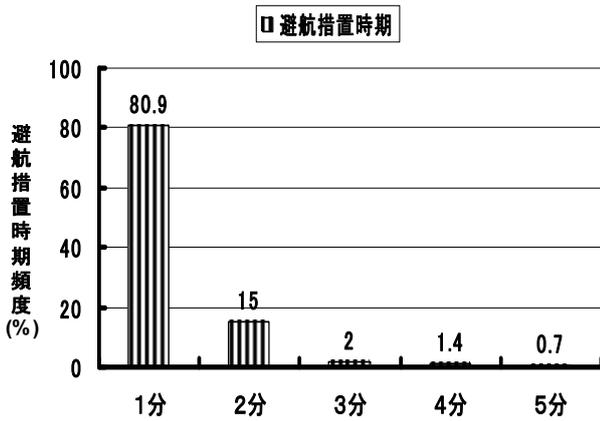


図 2-3 衝突事故船の避航措置時期

(5) 事故発生時の船橋当直者数

衝突事故発生時の船橋当直者数分布（データ数：128 隻）を、図 2-4 に示す。

衝突事故は、船橋当直者が 1 名の時には 78%、2 名当直時は 16%、3 名当直時は 4% 発生している。また、船橋当直者が 2 名以下時の衝突事故は、全体の約 96% 発生しているので、少人数当直体制下では特に支援対策を講じる必要性が高いことが分かる。

即ち、船橋当直者が少ない船橋では、接近船を ARPA、AIS 等で自動検出して、見張り情報を合成音声情報と画像情報で呈示して、操船者の見張り作業の負担を軽減する支援対策と、操舵室以外の場所に居る操船者に対しても、緊急時には警報情報を確実に伝達する支援対策が重要である。

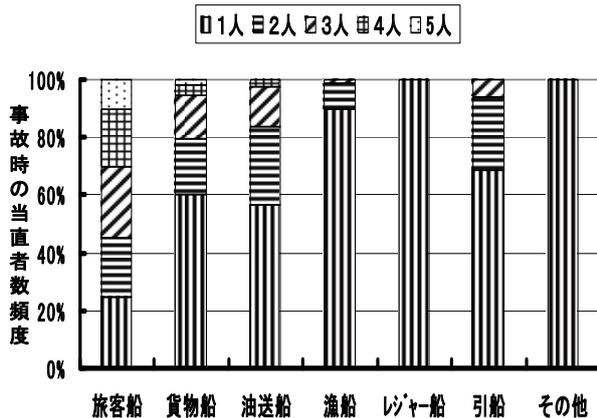


図 2-4 衝突事故発生時の船橋当直者数

(6) 船の大きさ分布

衝突事故船の大きさ分布（483 隻）を調べると、500 トン未満の小型船は、衝突事故船の約 76% を占めている。

即ち、小型船では一人当直が多く、また、ARPA、AIS 等

の不装備船が多いので、小型船に対しても、AIS 搭載の普及を図って、見張り支援対策を講じる必要がある。

(7) 見会い状態別の事故発生頻度

見会い状態別の衝突事故発生分布（292 件）を、図 2-5 に示す。

見会い状況別頻度は、横切り状態では 34.9%、行き会い状態では 21.9%、追越し状態では 20.5%、漂泊状態では 15.9%、錨泊状態では 6.9% である。

衝突事故の発生頻度が見会い状態で異なる理由としては、避航操船判断の困難性が異なるためと考える。また、避航操船判断時の錯誤を予防するためには、操船判断時における衝突危険領域の評価作業の一部を支援装置で分担する支援方式が有用であるものとする。

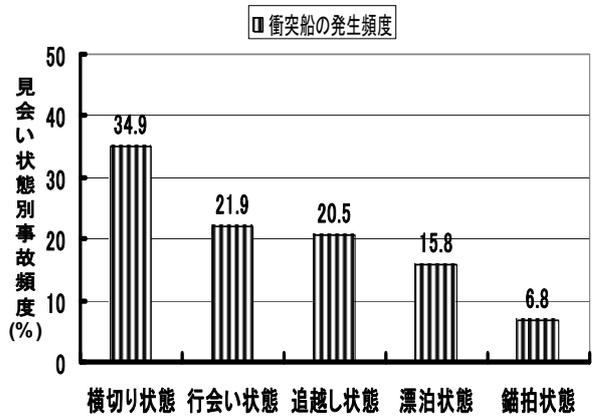


図 2-5 衝突事故の見会い状態別頻度

(8) まとめ

衝突事故の原因は、次の事項に集約できる。

- 接近船に対する初認の遅れと、他船動向の判断認識錯誤、及び、操船判断の錯誤が生じたことに起因する。
- 少人数化された船橋における当直では、作業負担が大きいため、危険船に関する見張り情報が確実に伝達していない問題があるものとする。

したがって、衝突事故を防止する支援対策としては、従来、操船者が推測していた衝突危険船、及び、避航危険領域等を支援装置で評価して、避航操船判断に関わる警報情報、及び、衝突危険領域等の支援情報を、操船者に迅速、且つ、確実に伝達する支援技術が重要である。

2. 2 見張り観測距離誤差の調査

操船者は、船橋での見張り作業において、目視情報から衝突危険船を判断する場合、同一目標船に対しては、各人が同じ情報認識の基に操船判断を行っているものと考えられているが、実際には視認情報に錯誤が発生しているために、同一

見合い状態を目視観測した場合であっても、操船者によって衝突の危険判断認識に差が生じているものとする。

したがって、操船者による見張り時の目視観測距離誤差を把握するため、東京湾沖合に錨泊中の銀河丸（航海訓練所・練習船）の船橋において、目視観測実験を実施して、収集した目視観測データ（223 隻）を基に、目視観測距離の誤差特性を解析した⁶⁾。また、目視観測実験では、観測目標船の相対距離と方位データを ARPA で測定すると共に、各々の被験者が、目標船までの相対距離を目視で観測した。さらに、目視観測実験の被験者は、運航経験年数が6年の3等航海士（以下、「航海士」と言う。）と、乗船訓練期間が9ヶ月の訓練実習生（以下、「訓練生」と言う。）3名の計4名である。

誤差の定義は、次の通りである。

- 観測誤差は、目視による観測距離；D、レーダによる観測距離；Cと置いて、式（2.1）で求めた。
- 平均誤差は、観測誤差の平均値を言う。
- 絶対値平均誤差は、観測誤差の絶対値の平均値を言う。

ここでは、目視観測距離の短回帰係数、観測距離の平均誤差、絶対値平均誤差等の目視観測距離誤差特性を示した。

(1) 目視観測距離誤差特性

目視距離の観測誤差分布を、図 2-6（航海士）、図 2-7（訓練生 1）、図 2-8（訓練生 2）、図 2-9（訓練生 3）に示す。

なお、図中の横軸は観測目標船までの相対距離、縦軸は目視観測距離を示す。また、鎖線は目視観測距離の単回帰直線、実線はレーダによる観測距離単回帰直線を示す。さらに、観測距離の単回帰直線式 ($Y = a \cdot X + b$ 、Y: 目視観測値、X: レーダによる観測値) の係数: a、bは、航海士では $a=1.28$ 、 $b=-416(m)$ 、訓練生 1 では $a=1.42$ 、 $b=-151(m)$ 、訓練生 2 では $a=1.04$ 、 $b=592(m)$ 、訓練生 3 では $a=1.8$ 、 $b=-392(m)$ である。

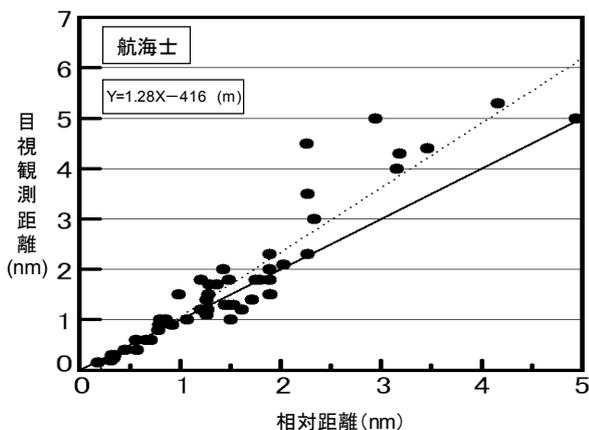


図 2-6 航海士の目視観測距離分布

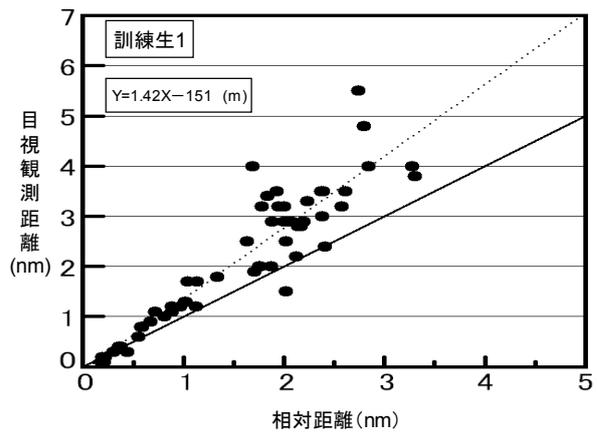


図 2-7 訓練生 1 の目視観測距離分布

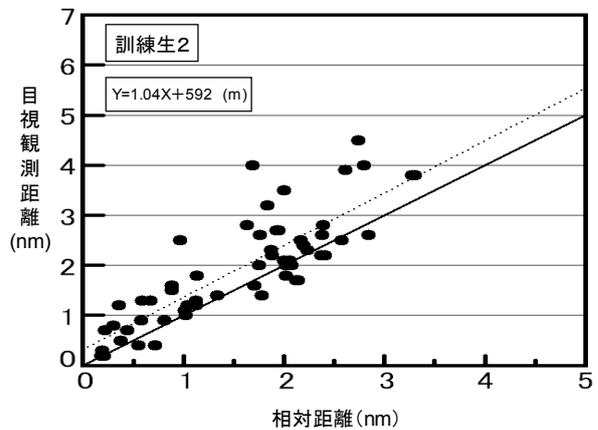


図 2-8 訓練生 2 の目視観測距離分布

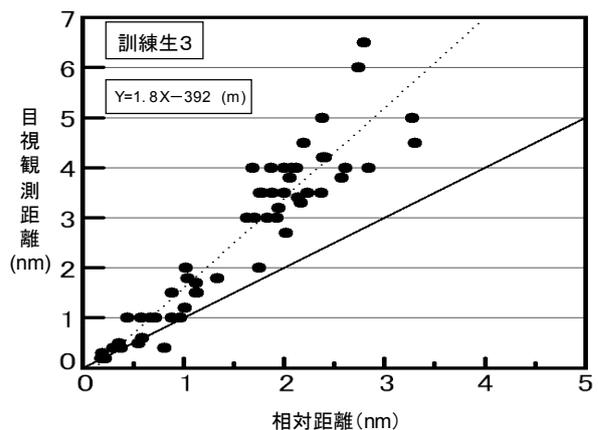


図 2-9 訓練生 3 の目視観測距離分布

(2) 平均誤差

観測誤差の分布範囲 (□: 最大誤差、■: 最小誤差) と平均誤差 (○) を、図 2-10 に示す。なお、図中の横軸は被験者、

縦軸は観測誤差を示す。

目視距離の平均誤差は、航海士では約 6%、訓練生 1 では 30%、訓練生 2 では 36%、訓練生 3 では 57%である。

即ち、目視観測では、観測値を遠い方に見誤る頻度が高いことが分かる。

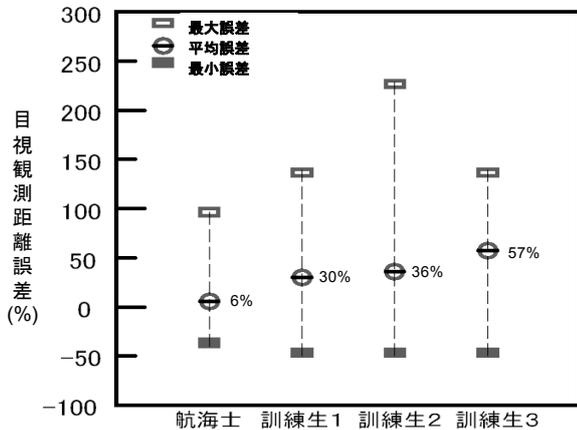


図 2-10 観測誤差範囲と平均観測誤差

(3) 絶対値平均誤差

目視観測距離の絶対値平均誤差を、図 2-11 に示す。

なお、横軸は被験者、縦軸は絶対値平均誤差を示す。

絶対値平均誤差は、航海士では 21%、訓練生 1 では 35%、訓練生 2 では 43%、訓練生 3 では 59%である。

即ち、目視観測では、観測値を遠い方に見誤る確率が高いので、避航操船判断時に避航余裕が無い状態を引き起こす原因になっているものと考えられる。

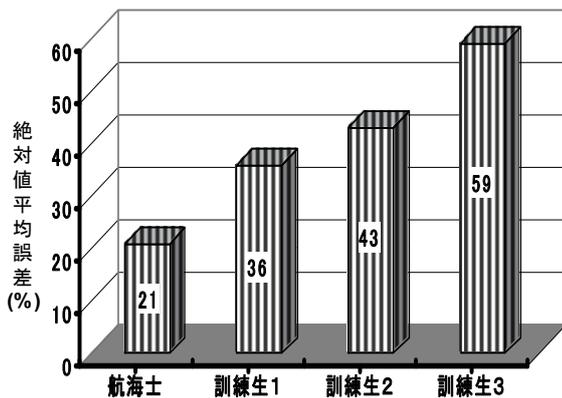


図 2-11 目視観測距離の絶対値平均観測誤差

(4) まとめ

目視距離観測誤差の平均誤差は、航海士では約 6%、訓練生全体の平均値は約 41%であった。また、絶対値平均誤差は、航海士では約 21%、訓練生全体の平均値は約 46%であった。

即ち、目視距離観測誤差は、目標までの相対距離に比例して大きくなる傾向があることが分かった。また、誤差は、操船経験により改善されており、経験の少ない船員への支援が必要であることが分かった。

2. 3 衝突事故の予防対策

当直者が少人数化された船橋では、見張り時の作業負担が大きいため、危険船に関する見張り支援情報が正確に伝達していない問題がある。また、目視距離の観測誤差を完全に排除することは困難であるものと考えるので、避航操船を早期に行うと共に、ARPA、又は、AIS 等を活用して、相手船の位置確認を行うことが重要である。

即ち、従来、操船者が目視観測を行って判断している衝突危険船に関する情報は、衝突予防援助装置の航行環境評価指標を用いて評価して、避航操船判断に関わる警報と衝突危険領域の情報を、視覚と聴覚の両面から操船者に確実に伝達して支援する必要性があるものと考えられる。

したがって、衝突予防支援技術は、次の事項に集約できる。

- 衝突危険船の動静監視を支援する技術。
- 最接近までの余裕が大きい、早い時期に他船の位置及び衝突危険領域に関する支援情報を確実に伝達する支援技術。
- 避航操船判断情報を表示呈示する支援技術。
- 警報を、合成音声と画像情報を用いて当直者に伝達する支援技術。

3. 改良型 ARPA の開発

ここでは、衝突予防援助機能を高度化することを目的に、在来型 ARPA 機能に、“航行環境評価指標”と、衝突危険領域を回避するために必要な“回避幅情報”を表示する機能を付加して、改良型 ARPA を開発した。

即ち、衝突予防対策課題の一つである衝突危険船に対する接近や見張りに必要な支援情報を合成音声で提示する警報システムについては、前報で報告^{7), 8)}したが、衝突危険領域の情報を ARPA レーダ画面に表示する場合に、輻輳海域において他船の衝突危険領域情報が重畳して、見張り作業が煩雑になる問題が残っている。

したがって、ここでは、これらの問題を改善するために、衝突予防援助装置に航行環境評価機能を取り入れて、避航操船判断時の支援機能の向上を図った。

3. 1 改良型 ARPA システムの構成

操船者に支援情報を確実に伝達して、避航操船判断を支援

する改良型 ARPA システムのフローを、図 3-1 に示す。

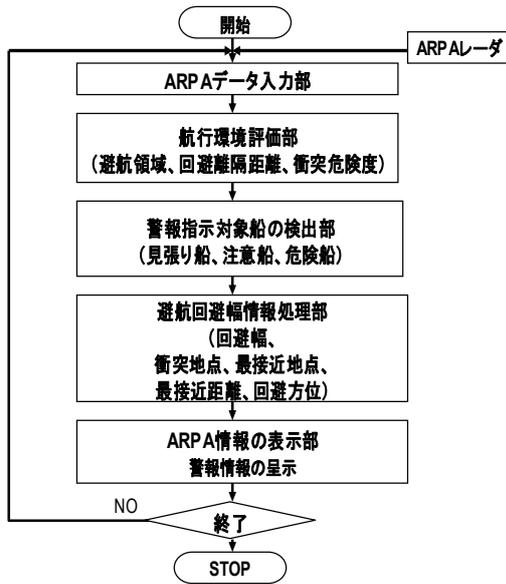


図 3-1 改良型 ARPA のシステムフロー

以下に、改良型 ARPA システムの概要を説明する。

(1) ARPA データ入力部

ARPA データ入力部では、他船の相対位置、相対針路、速度、船舶長データを入力する。

(2) 航行環境評価部

航行環境評価部では、自船と他船の位置、見合い関係、船舶長、速度、接近速度、停止距離を要素にして、閉塞避航領域、避航目標の回避離隔距離、衝突危険度等を評価する。

(3) 警報指示対象船の検出部

警報指示対象船の検出部では、航行船舶の衝突危険度を基に、警報指示対象船を検出すると共に、警報指示対象船に対しては、警報語彙情報を作成する。

(4) 避航回避幅情報処理部

避航回避幅情報処理部では、警報対象船の旋回避航に伴う最接近距離の変化と最接近距離目標値(以下、「回避離隔距離」と言う。)、衝突位置、衝突危険度、避航回避幅、回避幅の両端方位及び位置等の表示データを作成する。

(5) ARPA 情報表示部

ARPA 情報表示部では、在来型 ARPA の他船情報の他、警報情報、回避幅情報、変針避航に伴う最接近距離情報、回避離隔距離情報、衝突地点及び最接近点情報を ARPA 画面(図 3-2)に表示した。

次に、表示画面の内容を、示す。

(1) 回避幅情報

画面中央には、他船のベクトル上に、横切り船と反航船による回避幅情報を表示する。

(2) 航行環境評価指標の避航領域情報

画面右側上段には、警報指示対象船の航行環境評価指標の閉塞避航領域を表示する。

(3) 避航針路上の最接近距離情報

画面右側中段には、警報指示船の避航変針に伴う最接近距離の情報を表示する。なお、図中の横軸には変針角度、縦軸は最接近距離の予測値を表示する。

(4) 文字警報情報

画面中央の下段には、文字情報による警報を提示する。

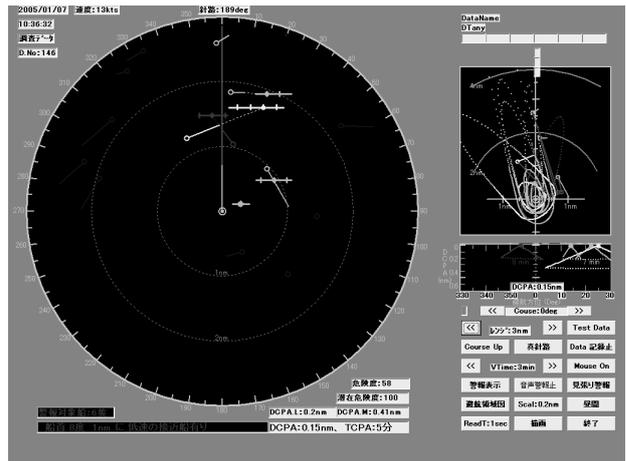


図 3-2 回避幅情報表示呈示支援方式の表示画面

3. 2 航行環境評価指標

操船者は、航行の安全を判断する場合、目視及び ARPA レーダ、AIS 等で、相手船の大きさや速力、針路を観測して、航海経験から相手船の諸元・操縦性能特性を推測すると共に、避航操船開始時の時間的・距離的余裕、及び、最接近距離の余裕を判断要素にして避航操船を行っている。

ここでは、このような操船者の判断様式を採り入れるために、避航操船判断時に得られる相手船の船舶長と速力等の要素データを基に、航行環境評価指標の閉塞避航領域を導出して、警報検出方法を確定した。⁹⁾

3.2.1 閉塞避航領域モデル

(1) 用語の定義

航行海域と閉塞避航領域に関わる用語の定義は、次に示す。

- 狭水道航行域は、フェリーが航行した大阪港・瀬戸内海水道・別府港間の航海経路の輻輳航行海域を言う。
- 輻輳航行海域は、東京港～大阪港間の航海経路で、低速航行(13kt以下)した海域を言う。
- 沿岸航行海域は、中速航行(14kt以上)した沿岸海域を言う。
- 避航最小領域は、航行海域毎の他船が侵入することを避ける閉塞領域の10%分布領域を言う。
- 避航最小距離は、避航最小領域の長半径を言う。

- 航過最小距離は、避航最小領域の短半径を言う。
- 避航危険領域は、狭水道航行域の避航最小領域を言う。
- 避航危険距離は、避航危険領域の長半径を言う。
- 航過危険距離は、避航危険領域の短半径を言う。
- 避航余裕領域は、狭水道航行域以外の余裕を持って航行する避航最小領域を言う。
- 避航余裕距離は、避航余裕領域の長半径を言う。
- 航過余裕距離は、避航余裕領域の短半径を言う。

(2) 閉塞避航領域の概念図

始めに、閉塞避航領域の概念図を、図 3-3 に示す。

なお、記号は、 D_S : 避航危険領域、 D_M : 避航余裕領域、 V_o : 自船速度(kt)、自船針路はコース UP、 V_t : 他船速度(kt)、 θ_t : 他船の真針路(deg)、 V_r : 相対速度(kt)、 θ_r : 相対針路(deg)である。

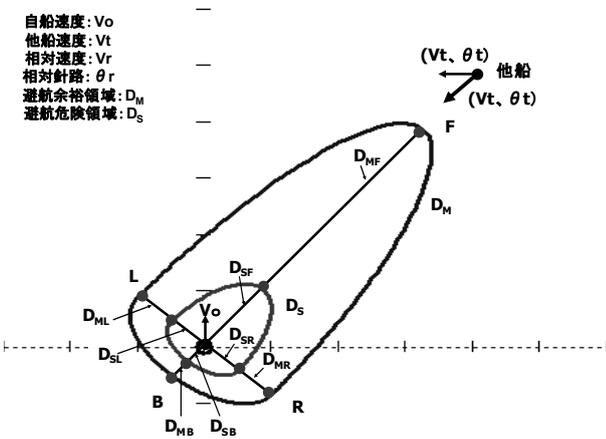


図 3-3 閉塞避航領域のバンパーモデル

航行環境評価指標としては、避航開始時の避航距離と、自船と相手船がすれ違う時の最接近距離の余裕が、交通実態と適合することが重要である。

したがって、閉塞避航領域は、航行船舶の衝突危険度の算出、及び、警報検出指標として活用する目的で、狭水道航行域において衝突の危険性が最も高い自船近傍の避航最小領域“避航危険領域； D_S ”と、その外側にあつて衝突の危険性が低くて、避航操船に余裕がある避航最小領域“避航余裕領域； D_M ”を併せ持つバンパーモデルで構成した。

また、実態調査結果を基に、閉塞避航領域の避航危険領域の長半径（避航危険距離； D_{SF} 、 D_{SB} ）と短半径（航過危険距離； D_{SL} 、 D_{SR} ）、避航余裕領域の長半径（避航余裕距離； D_{MF} 、 D_{MB} ）と短半径（航過余裕距離； D_{ML} 、 D_{MR} ）を導出した。

(3) 閉塞避航領域の定義

閉塞避航領域は、避航危険領域半径（ D_{SF} 、 D_{SR} 、 D_{SB} 、 D_{SL} ）の算出では狭水道航行域の定数を、又、避航余裕領域半径（ D_{MF} 、 D_{MR} 、 D_{MB} 、 D_{ML} ）の算出では輻輳航行域と沿岸航行

域の中間の実験定数を適用して、式(3.1)から式(3.5)で定義した。また、避航余裕領域は、航行域によって異なるものと考えた。例えば、狭水道域航行の場合は、輻輳航行域の定数を適用する方がよいものと考えた。さらに、閉塞避航領域の導出方法は、3-2-4 節に示した。

$$D_{SF} \text{ or } D_{SB} = 1 \cdot D_S(L_K, V_{FS}) \quad (m) \quad \dots (3.1)$$

$$D_{SR} \text{ or } D_{SL} = 0.6 \cdot D_S(L_K, V_{FS}) \quad (m) \quad \dots (3.2)$$

$$D_{MF} = \max(2 \cdot D_S(L_K, V_{FS}) \text{ or } V_{FS} \cdot T) \quad (m) \quad \dots (3.3)$$

$$D_{MB} = 2 \cdot D_S(L_K, V_{FS}) \quad (m) \quad \dots (3.4)$$

$$D_{MR} \text{ or } D_{ML} = 1.3 \cdot D_S(L_K, V_{FS}) \quad (m) \quad \dots (3.5)$$

なお、閉塞避航領域式に関わる記号は、次の通りである。

- $D_S(L_K, V_{FS})$: 制動停止距離(m)
- L_o : 自船舶長(m)、 L_T : 他船舶長(m)
- 換算船舶長 : $L_K = \{(L_o^2 + L_T^2) / 2\}^{1/2} (m)$
- T : 見張り余裕時間 (sec)
- V_{FS} : 各半径上の接近速度和(kt)
- $\max ()$: () 内要素の最大値を選択

(4) 衝突危険度

衝突危険度は、衝突予防援助装置の警報船検出、及び、避航操船航行危険度等の算出要素として適用した。

衝突危険度； C_R は、避航危険領域以内では 100、避航余裕領域の境界領域値は 0 と置いた。また、中間位置の衝突危険度は、他船の相対方位上の相対距離； D_r 、相対方位上の避航危険領域までの距離； D_S 、避航余裕領域までの距離； D_M と置いて、式(3.6)で指標化した。

$$C_R = 100 \cdot (D_M - D_r) / (D_M - D_S), \quad (D_S \leq D_r \leq D_M)$$

$$C_R = 100 \quad (D_r \leq D_S)$$

$$C_R = 0 \quad (D_M \leq D_r) \quad \dots (3.6)$$

3.2.2 閉塞避航領域要素の解析方法

閉塞避航領域要素の解析は、次の順で行った。

- ① 操縦性能制動停止距離特性の解析では、操縦性能試験データを基に、制動停止距離特性を算出した。
- ② 閉塞避航領域の調査では、実船調査で収集したAR PA航跡データを基に、航行海域の避航最小領域を解析して、閉塞避航領域を導出した。
- ③ 閉塞避航領域のシミュレーションによる検証では、見会い状態に対する接近速度和と閉塞避航領域の算出方法を示した。

3.2.3 操縦性能制動停止距離試験特性の解析

制動停止距離特性を把握するためには、船上で他船に関する要素データを入手できることが重要であるが、制動停止距離の理論式¹⁰⁾、¹¹⁾の要素データ（船の形

状、機関出力、後進発令時の速力)を他船の船上で得ることは困難である。ここでは、ARPA、又は、AISで入手することができる船舶長と速力から制動停止距離を推定するために、操縦性能特性試験データ¹²⁾を用いて、制動停止距離特性を解析した。

(1) 諸元と制動停止距離特性の相関

操縦性能試験データの船舶長及び航海速力と制動停止距離試験特性との関係を図3-4に、また、船舶長；L(m)と航海速力；V(kt)を要素に採り入れた制動停止距離特性； $D_S(L, V)$ について、自然対数の重相関式を、式(3.7)に示す。

$$\ln D_S(L, V) = 1.253 \cdot \ln L + 0.351 \cdot \ln V + 0.0035 \quad (m) \quad \dots (3.7)$$

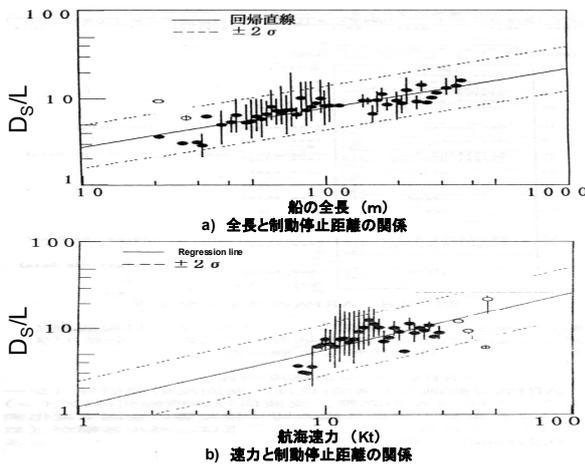


図3-4 制動停止距離試験特性

(2) 制動停止距離の推定

閉塞避航領域の算出要素である制動停止距離； $D_S(L_K, V_{FS})$ は、船上で入手できる換算船舶長； L_K と、接近速度和； V_{FS} を要素にした式(3.8)で算出した。

$$D_S(L_K, V_{FS}) = \exp(1.253 \cdot \ln L_K + 0.351 \cdot \ln V_{FS} + 0.0035) \quad (m) \quad \dots (3.8)$$

3.2.4 閉塞避航領域の調査

閉塞避航領域は、実船調査で収集したARPA航跡データを基に、航行海域における避航最小領域を解析して、導出した。^{13)、14)、15)、16)}

なお、解析で使用した航跡データは、次の航行海域で収集した。

- 輻輳航行域と沿岸航行域のデータは、銀河丸(航海訓練所・練習船、全長；L=115m)の航海経路(東京港・大阪港間)で収集した。
- 狭水道航行域のデータは、こがね丸(関西汽船(株)フェリー、全長；L=150m)の航海経路(大阪港・神戸港・瀬戸内海狭水道・大分港間)で収集した。

a) 避航最小領域の解析方法

避航最小領域の解析方法は、次の通りである。

- 航跡数頻度分布は、航跡データの相対航跡位置における捕捉追尾船隻数分布を接近速度毎に分けて航跡密度(船の航跡数/100m²)を集計して、接近速度毎の平均頻度で規格化した。
- 避航最小領域の解析では安全性を考慮して、相手船は小型船(L_T=20m)によるものと仮定した。
- 避航最小領域は、航跡数頻度分布の航跡数頻度が10%の分布領域を求めた。
- 避航最小領域の長半径(避航最小距離)と、短半径(航過最小距離)は、自船と相手船間の接近速度と換算船舶長；L_Kを要素に採った制動停止距離； D_{SLV} で規格化して、その換算係数を求めた。

b) 避航最小領域の解析結果

避航最小領域の半径(避航最小距離、航過最小距離)の解析結果を表3-1に示す。また、表3-1の避航最小距離と航過最小距離は、制動停止距離； D_{SLV} で規格化して、その換算係数を示している。

表3-1 航行海域毎の避航最小領域

避航最小領域	狭水道航行域	輻輳航行域	沿岸航行域
避航最小距離	1D _{SLV}	1.6D _{SLV}	2.5D _{SLV}
航過最小距離	0.6D _{SLV}	1D _{SLV}	1.6D _{SLV}

(1) 避航最小距離

始めに、輻輳航行域における避航最小距離の航跡数頻度分布を、図3-5に示す。また、図3-5の横軸は接近速度、縦軸は相対距離、図中下部の鎖線は避航最小距離を示す。

図3-5で、避航最小距離は、制動停止距離の約1.6倍 ($1.6 \cdot D_{SLV}$) に相当する。また、航行海域毎の避航最小距離は、狭水道航行域では約 $1 \cdot D_{SLV}$ 、輻輳航行域では約 $1.6 \cdot D_{SLV}$ 、沿岸航行域では約 $2.5 \cdot D_{SLV}$ である。

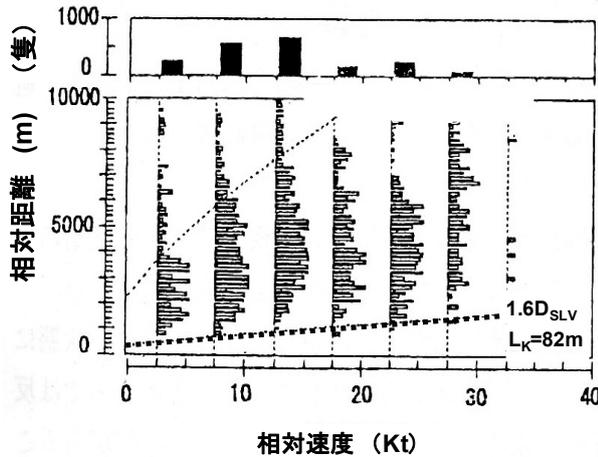


図3-5 輻輳海域における避航危険距離

(2) 航過最小距離

図3-6に、輻輳航行域の航過最小距離分布を示す。また、図3-6の横軸は接近速度、縦軸は相対距離を示す。

図3-6の輻輳航行域の航過最小距離は制動停止距離の約1倍 ($1 \cdot D_{SLV}$) であって、航行海域の航過最小距離は、狭水道航行域では約 $0.6 \cdot D_{SLV}$ 、輻輳航行域では約 $1 \cdot D_{SLV}$ 、沿岸航行域では約 $1.6 \cdot D_{SLV}$ である。

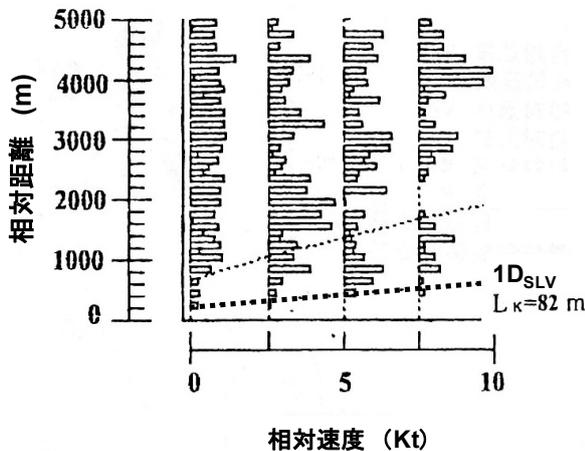


図3-6 輻輳海域における航過危険距離

c) まとめ

解析の結果は、次の通りである。

避航最小領域の大きさは、航行海域によって、異なり、狭水道航行域の避航最小領域は、全航行海域の中で、一番余裕が小さく、全航行海域の避航限界領域と考えられる。また、沿岸航行域の避航最小領域は、輻輳航行域のそれよりも大きいことが分かった。

したがって、閉塞避航領域は、狭水道航行域において衝突の危険性が最も高い自船近傍の“避航最小領域=避航危険領域; D_S ”と、その外側にあつて衝突の危険性が低くて、避航操船に余裕がある狭水道域以外の“避航最小領域=避航余裕領域; D_M ”を併せ持つバンパーモデル (図3-3) で構成した。

即ち、閉塞避航領域の避航危険領域と避航余裕領域の定数は、表3-1の狭水道航行域、輻輳航行域及び沿岸航行域における避航最小領域の解析結果を式(3.1)から式(3.5)に適用して、導出した。

3.2.5 閉塞避航領域のシミュレーションによる検証

閉塞避航領域半径の算出方法と、閉塞避航領域を警報検出に適用した場合の警報発生の低減効果は、シミュレーションで検証した。

a) 閉塞避航領域半径の算出方法

閉塞避航領域の半径は、相対速度ベクトルに平行な軸に長半径、相対速度ベクトルに垂直な軸に短半径を採っている。

即ち、閉塞避航領域の半径は、図3-7における自船 (◎) に対する他船 (○) の相対位置関係において、自船と他船が各々の速度ベクトルを一定に保った状態で、自船の周りを相対ベクトルに対して平行な見合い関係で航行する場合を想定して、自船と他船が接近状態を形成するために有効な分速度の和 (以下、「接近速度和」と言う。) を求めて、その接近速度和から制動停止距離を算出して、各半径を決定した。

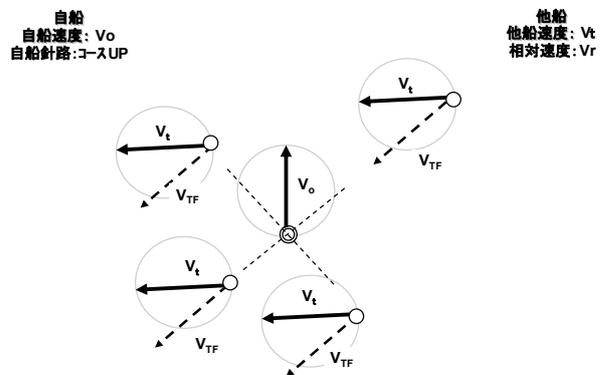


図3-7 閉塞避航領域半径算出における自他船の見合い関係

以下、ここでは、閉塞避航領域半径の算出方法を示す。

(1) 接近速度和の算出

図 3-8 に、閉塞避航領域の半径上における自船と他船の分速度と、接近速度和の概念図を示す。

なお、図 3-8 において、自船速度は $V_o(kt)$ 、自船針路はコース UP、他船速度は $V_t(kt)$ 、他船真針路は $\theta_t(deg)$ 、相対速度は $V_r(kt)$ 、相対速度の針路は $\theta_r(deg)$ である。

また、図 3-8 の V_F 、 V_R 、 V_B 、 V_L は、閉塞避航領域の各半径上の接近速度和であって、 V_F は相対速度ベクトルに平行な他船側の接近速度和、 V_B は他船と反対側の接近速度和、 V_R は相対速度ベクトルに垂直で他船に向かって右側の接近速度和、 V_L は他船に向かって左側の接近速度和である。

さらに、 V_{OF} 、 V_{OR} 、 V_{OB} 、 V_{OL} は自船の接近状態の形成に寄与する分速度、 V_{TF} 、 V_{TR} 、 V_{TB} 、 V_{TL} は他船の接近状態の形成に寄与する分速度であって、自船の分速度は、 V_{OF} は相対速度ベクトルに対して平行で他船側の分速度、 V_{OB} は相対速度ベクトルに対して平行で他船とは反対側の分速度、 V_{OR} は相対速度ベクトルに対して垂直で他船に向かって右側の分速度、 V_{OL} は相対速度ベクトルに対して垂直で他船に向かって左側の分速度である。

そして、他船の分速度は、 V_{TF} は相対速度ベクトルに対して平行な自船側の分速度、 V_{TB} は自船とは反対側の分速度、 V_{TR} は相対速度ベクトルに対して垂直で自船に向かって右側の分速度、 V_{TL} は自船に向かって左側の分速度である。

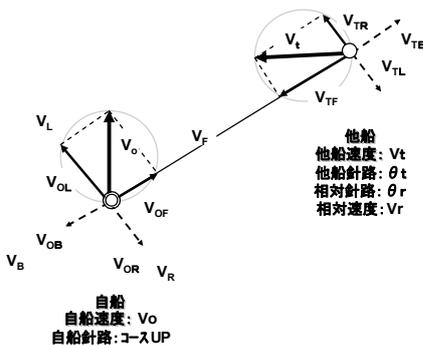


図 3-8 自船・他船の接近に関わる分速度の概念図

閉塞避航領域は、①自船と他船の接近状態の形成に有効な分速度、②各半径上の接近速度和、③各半径上の制動停止距離の順で算出する。

① 分速度の算出

各半径上における接近状態の形成に有効な自船と他船の分速度は、相対速度ベクトルに平行な分速度と、相対速度ベクトルに垂直な分速度に分けて、求める。

自船の分速度は、式(3.8)に示す。

$$\begin{aligned} V_{OF} &= V_o \cdot \cos(\theta_r + 180) & (kt) \\ V_{OR} &= V_o \cdot \cos(\theta_r + 90) & (kt) \\ V_{OB} &= V_o \cdot \cos(\theta_r) & (kt) \\ V_{OL} &= V_o \cdot \cos(\theta_r + 270) & (kt) \end{aligned} \dots (3.8)$$

また、他船の分速度は、式(3.9)に示す。

$$\begin{aligned} V_{TF} &= V_t \cdot \cos(\theta_t - \theta_r) & (kt) \\ V_{TR} &= V_t \cdot \cos(\theta_t - (\theta_r + 270)) & (kt) \\ V_{TB} &= V_t \cdot \cos(\theta_t - (\theta_r + 180)) & (kt) \\ V_{TL} &= V_t \cdot \cos(\theta_t - (\theta_r + 90)) & (kt) \end{aligned} \dots (3.9)$$

但し、接近速度和の算出では、接近状態を形成するために有効な分速度、即ち、分速度の符号が (+) 値 (分速度 > 0) の分速度を用いる。また、接近状態の形成に有効でない分速度、即ち、離れて行く分速度は分速度の符号が (-) 値 (分速度 < 0) となるので、分速度値は 0 と置く。

② 接近速度和の算出

各半径方向の接近速度和は、自船と他船間で、接近状態の形成に有効な、自船の分速度 (式(3.8)) と、他船の分速度 (式(3.9)) を式(3.10)に代入して、算出する。

$$\begin{aligned} V_F &= V_{OF} + V_{TF} & (kt) \\ V_R &= V_{OR} + V_{TR} & (kt) \\ V_B &= V_{OB} + V_{TB} & (kt) \\ V_L &= V_{OL} + V_{TL} & (kt) \end{aligned} \dots (3.10)$$

なお、接近速度和の下限値 ($V_{FBRLmin}$) は、自船速度 ; V_o 、他船速度 ; V_t 、相対速度 ; V_r 中の最大速度の 0.079 倍と置いて、式 (3.11) で与えた。⁹⁾

$$V_{FBRLmin} = 0.079 \cdot \max(V_o, V_t, V_r) \quad (kt) \quad \dots (3.11)$$

(2) 分速度と接近速度和の算出例

ここでは、図 3-8 の条件で、分速度と接近速度和の算出例を示す。

閉塞避航領域の各半径上の接近速度和は、自船の周りを他船が 360 度平行移動した時に自船と他船が接近状態を形成するために有効な、自船と他船の分速度の和から求める。

即ち、図 3-8 の見合い関係において、接近速度の形成に有効な自船の分速度を、式(3.12)に示す。

$$\begin{aligned} V_{OF} &= V_o \cdot \cos(\theta_r + 180) & (kt) \\ V_{OR} &= 0 & (kt) \\ V_{OB} &= 0 & (kt) \\ V_{OL} &= V_o \cdot \cos(\theta_r + 270) & (kt) \end{aligned} \dots (3.12)$$

また、接近状態の形成に有効な他船の分速度を、式(3.13)に示す。

$$V_{TF} = Vt \cdot \cos(\theta t - \theta r) \quad (kt)$$

$$V_{TR} = Vt \cdot \cos(\theta t - (\theta r + 270)) \quad (kt)$$

$$V_{TB} = 0 \quad (kt)$$

$$V_{TL} = 0 \quad (kt)$$

・・・ (3.13)

さらに、閉塞避航領域の各半径上の接近状態の形成に有効な、自船と他船の分速度の接近速度和は、式(3.14)に式(3.12)と式(3.13)を代入して算出する。

なお、 V_B は0であるので、接近速度和の下限値の式(3.11)を適用して、 V_B は相対速度； V_T の0.079倍と置いた。

$$V_F = V_{OF} + V_{TF} \quad (kt)$$

$$V_R = V_{TR} \quad (kt)$$

$$V_B = 0.079 \cdot V_T \quad (kt)$$

$$V_L = V_{OL} \quad (kt)$$

・・・ (3.14)

(3) 閉塞避航領域半径の決定

閉塞避航領域の避航危険領域半径 (D_{SF} 、 D_{SR} 、 D_{SB} 、 D_{SL})と、避航余裕領域半径 (D_{MF} 、 D_{MR} 、 D_{MB} 、 D_{ML})は、式(3.15)と式(3.16)に、各々の接近速度和； V_* と換算船舶船長； L_K を代入して求めた。また、閉塞避航領域の形状は各半径で楕円近似した。

$$D_{SF} = 1 \cdot D_S (L_K, V_F) \quad (m)$$

$$D_{SR} = 0.6 \cdot D_S (L_K, V_R) \quad (m)$$

$$D_{SB} = 1 \cdot D_S (L_K, V_B) \quad (m)$$

$$D_{SL} = 0.6 \cdot D_S (L_K, V_L) \quad (m)$$

・・・ (3.15)

$$D_{MF} = \max(2 \cdot D_S (L_K, V_F) \text{ or } V_F \cdot T) \quad (m)$$

$$D_{MR} = 1.3 \cdot D_S (L_K, V_R) \quad (m)$$

$$D_{MB} = 2 \cdot D_S (L_K, V_B) \quad (m)$$

$$D_{ML} = 1.3 \cdot D_S (L_K, V_L) \quad (m)$$

・・・ (3.16)

b) 閉塞避航領域のシミュレーション

閉塞避航領域の検証は、シミュレーションで行った。

(1) 見合い状態に対する閉塞避航領域の関係

図3-9に、閉塞避航領域の見合い状態に対する形状の変化例を示す。

なお、シミュレーションでの航行条件は、自船速度； $V_o=10kt$ 、他船速度； $Vt=10kt$ 、船舶船長； $L_o=L_t=L_k=100m$ である。また、図3-9の D_{SL} は航過危険距離、 D_{SF} は避航危険距離、 D_{ML} は航過余裕距離、 D_{MF} は避航余裕距離である。

航過危険距離； D_{SL} は、反航船では $2.5L_K$ 、同航船では $1.9L_K$ 、横切り船では $4L_K$ である。また、避航危険距離； D_{SF} は、反航船では $9.2L_K$ 、同航船では $7.3L_K$ 、横切り船では $8.3L_K$ である。即ち、閉塞避航領域は、見合い関係によって変ること

が分かる。

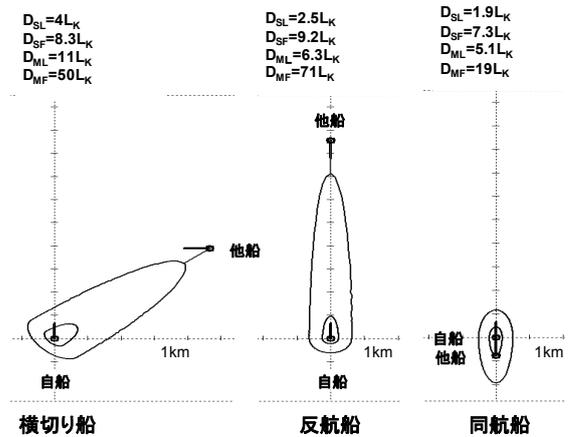


図3-9 見合い状態と閉塞避航領域との関係

(2) 見合い状態と接近速度和の関係

図3-10に、相対速度ベクトルに平行な自船の分速度； V_{OF} 及び他船の分速度； V_{TF} と、接近速度和； V_F との関係を示す。

また、図3-10の横軸は他船針路、縦軸は接近速度、上段図は他船の分速度； V_{TF} 、中段は自船の分速度； V_{OF} 、下段図は接近速度和； V_F を示す。

図3-10において、接近速度和； V_F は、自船の分速度と他船の分速度の和で、見合い状態によって変化して、同航船では0度近傍の変化が大きいことが分かる。

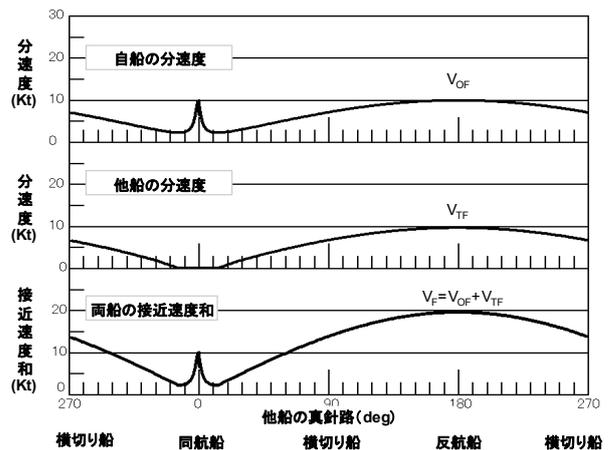


図3-10 自船・他船の分速度と接近速度和との関係

(3) 他船針路に対する避航危険領域の特性

他船針路に対する避航危険領域長半径の避航危険距離； D_{SF} と、短半径の航過危険距離； D_{SL} の特性を、図3-11に示す。

また、図3-11の横軸は他船針路、縦軸は半径の換算船舶長比、上段は長半径の避航危険距離、中段は短半径の航過危険距離、下段は接近速度和を示す。さらに、図3-11において、避航危険距離； D_{SF} は長半径の接近速度和； V_F に、航過危険距離； D_{SL} は短半径の接近速度和； V_L に対応している。

即ち、閉塞避航領域は、見会い状態と接近速度和によって変化する。例えば、同航船の場合は、避航危険領域の短半径は約 $1.9L_K$ 、長半径は約 $7.5L_K$ である。また、反航船の場合は、短半径は約 $2.5L_K$ 、長半径は約 $9.2L_K$ である。さらに、同航船の避航危険領域値は、実態観測結果における同航船の閉塞領域値¹⁵⁾とも合致することが分かる。

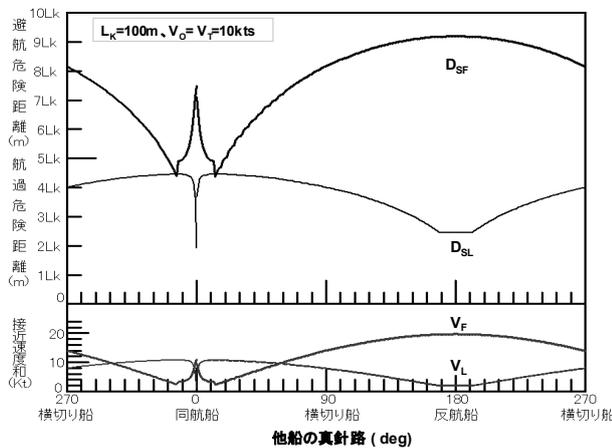


図3-11 他船針路と避航危険領域との関係

(4) 相対針路に対する閉塞避航領域短半径の特性

図3-12に、相対針路に対する閉塞避航領域短半径の特性を示す。また、下段は相対針路に対する短半径の接近速度和、上段は相対針路に対する避航危険領域短半径の航過危険距離； D_{SL} と避航余裕領域短半径の航過余裕距離； D_{ML} を示す。

さらに、航行条件は $V_0=V_T=10kt$ 、 $L_K=100m$ である。

閉塞避航領域の短半径は、半径上の接近速度と換算船舶長によって変化して、同航船では短く、反航船、横切り船の順で長くなる事が分かる。

例えば、避航余裕領域の短半径は、同航船では約 $4L_K$ 、反航船では約 $5L_K$ 、横切り船では約 $9L_K$ になる。

したがって、以下の考察では、避航危険領域と避航余裕領域の短半径の航過余裕距離を警報検出の為の最

接近距離閾値として適用した。

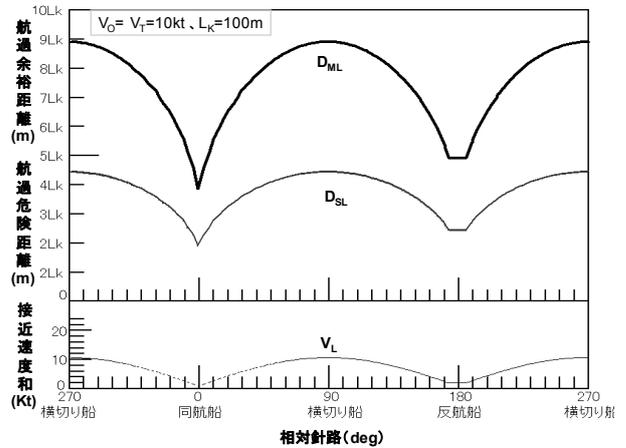


図3-12 相対針路と閉塞避航領域短半径との関係

c) 警報検出低減効果のシミュレーション

ここでは、ARPA警報の検出に、閉塞避航領域を適用して、不要な警報の抑制方策について検討した。

以下に、他船針路に対する警報検出の最接近距離閾値と、警報検出隻数の低減効果を示す。

(1) 見会い状態と警報検出最接近距離閾値との関係

図3-13に、他船針路と警報検出最接近距離閾値の関係を示す。また、図3-13の横軸は自船針路と他船針路の交角、縦軸は警報検出のための最接近距離閾値、■は在来型ARPAの最接近距離(DCPA)固定方式、◆は閉塞避航領域を用いた評価方式を示す。

なお、航行条件は、 $V_0=V_T=10kt$ 、 $L_K=100m$ である。

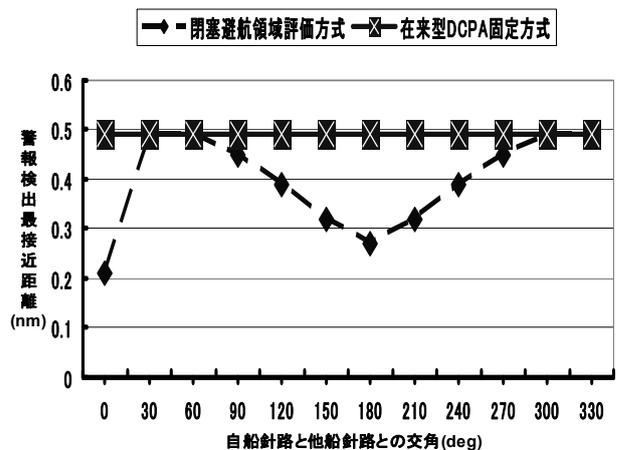


図3-13 他船針路と警報検出最接近距離閾値の関係

警報検出の最接近距離閾値は、在来型DCPA固定方式では見会い状態に係わらず一定(約0.49nm)であるが、閉塞避航領域評価方式では、他船針路が0度の同航船では0.21nm、他船針路が180度の反航船では0.27nm、他船針路が90度と270度の横切り船では0.45nmである。

即ち、閉塞避航領域評価方式の警報検出最接近距離閾値は、見会い状態に対応して変化して、同航船と反航船では短く、横切り船では長くなるのが分かる。

(2) 見会い状態と警報検出隻数との関係

図3-14に、他船針路と警報検出隻数の関係を示す。

また、図3-14の横軸は自船針路に対する他船針路の交角、縦軸は警報発生隻数、■は在来型DCPA固定方式、◆は閉塞避航領域評価方式を示す。

なお、警報対象船の航行条件は、航行船舶の最接近距離が1nm以下の範囲内にあつて、0.1nm間隔で平行に、左右合わせて21隻が航行する交通流である。

警報発生船隻数は、在来型DCPA固定方式では見会い状態が変化した場合であっても、9隻で一定である。

一方、閉塞避航領域評価方式では、他船針路が0度と180度の同航船と反航船では5隻、他船針路が225度の横切り船では7隻、他船針路が270度の横切り船では9隻発生しているので、警報検出隻数は見会い状態で変化することが分かる。

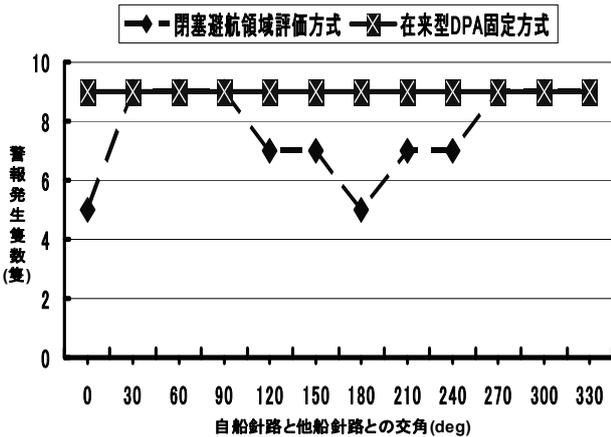
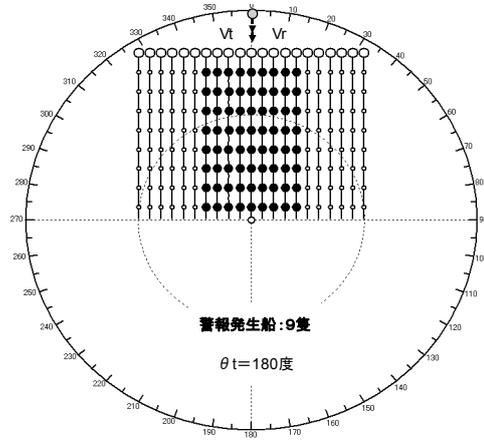


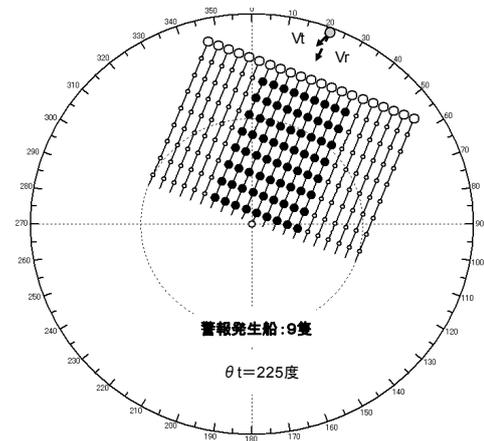
図3-14 見会い状態と警報発生隻数の関係

(3) 相対航跡で観た見会い状態と警報発生船の関係

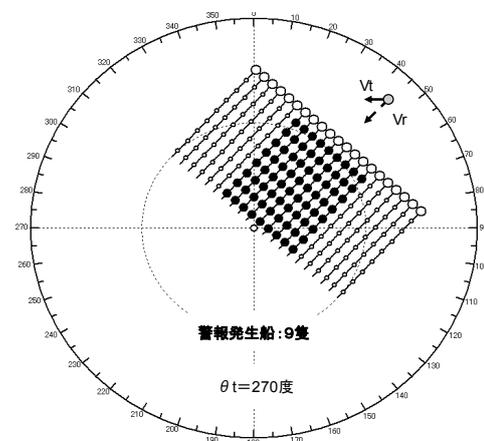
図3-15と図3-16に、在来型DCPA固定方式と閉塞避航領域評価方式を用いた場合の警報発生状況を相対航跡上に示す。



a) 他船針路: 180度

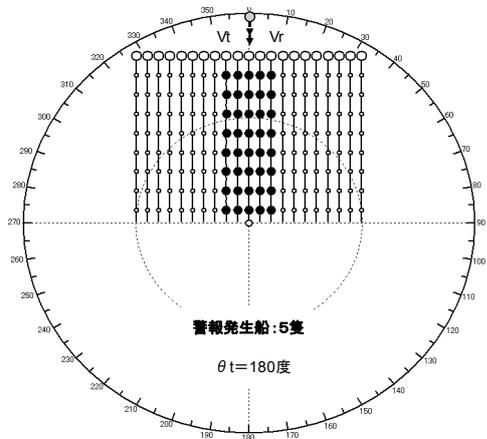


b) 他船針路: 225度

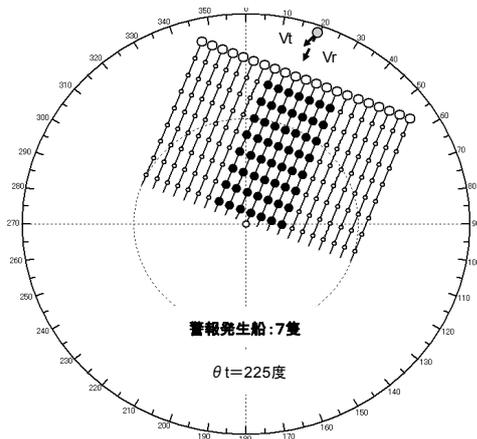


c) 他船針路: 270度

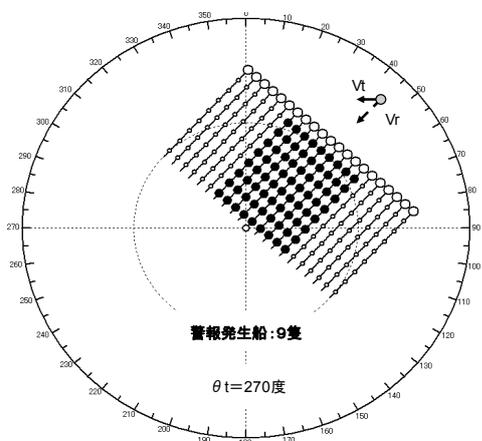
図 3-15 在来型 DCPA 固定方式の警報発生状況



a) 他船針路 : 180 度



b) 他船針路 : 225 度



c) 他船針路 : 270 度

図 3-16 閉塞避航領域評価方式の警報発生状況

また、●は警報発生船、○は警報が発生していない船、 V_t は他船速度、 V_r は相対速度、 θ_t は他船真針路を示す。

なお、他船交通流の航行条件は、前項と同じである。

在来型DCPA固定方式では、見会い状態に係わらず9隻で警報が発生していることが、図3-15から分かる。

一方、閉塞避航領域評価方式では、見会い状態によって警報発生隻数が変化して、本交通流における警報発生隻数は、他船針路が180度の反航船では5隻、225度の横切り船では7隻、270度の横切り船では9隻であって、反航船・同航船では低減することが、図3-16から分かる。

(4) 実船航跡データにおける警報発生の低減効果

在来型 ARPA では、反航船や同航船等で不要な警報の発生頻度が高いため、警報の発生を停止して航行する問題があり、警報抑制対策が課題となっている。

ここでは、実船調査の AIS 航跡データを基に、閉塞避航領域評価方式を適用した場合の警報発生の低減効果を示す。

図 3-17 に、在来型 DCPA 固定方式 (■) と、閉塞避航領域評価方式 (◆) で、警報船を検出した場合の他船針路 (横軸) 別の警報発生頻度の低減効果を示す。

なお、評価に用いたデータは、実船の AIS で収集した航跡データである。また、以下の警報発生頻度は、在来型 DCPA 固定方式で、最近距離閾値を 1nm とした場合の警報発生頻度を基準値 (100%) に採って比較する。

閉塞避航領域評価方式の在来型 DCPA 固定方式に対する警報発生の低減効果は、横切り船では約 2%低減していて、差は小さいが、反航船では約 11%減少して、不要な警報の低減効果が大きいことが分かる。また、全体の警報発生頻度は、在来型 DCPA 固定方式では約 55%、閉塞避航領域評価方式では約 35%である。

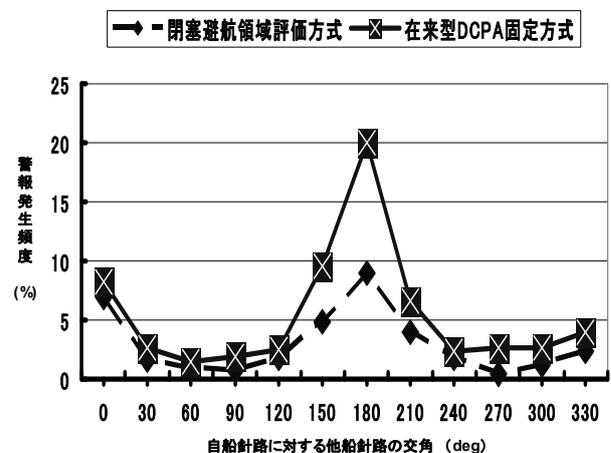


図 3-17 評価方式による警報発生頻度の低減効果

即ち、閉塞避航領域評価方式の全警報発生頻度は、在来型 DCPA 固定方式に比較して、約 20%低減して、反航船では特に低減効果が大いことが分かる。また、見会い状態に対する警報検出最接近距離閾値を評価して、警報を検出する閉塞避航領域評価方式は有効に機能していることが分かる。

したがって、不要な警報の抑制方策としては、見会い状態に対する警報検出の最接近距離閾値を評価して、警報を発生する閉塞避航領域評価方式が有効であるものとする。

(5) まとめ

閉塞避航領域のシミュレーション結果は、次の通りである。

- 閉塞避航領域の算出方法と警報検出方法について示すと共に、不要な警報の低減効果について AIS 航跡データを基に検証を行った。
- 閉塞避航領域は、警報検出の最接近距離閾値として適用できて、不要警報の抑制効果が大い事が分かった。

したがって、閉塞避航領域を適用した警報検出方式は、現実の航行状態に対する適合性が高いので、衝突予防援助装置の航行環境評価指標として活用できる。

3. 3 回避幅情報表示呈示支援方式

避航操船判断支援情報として重要なことは、衝突危険領域への侵入を避けるために必要な最接近距離閾値（以下、「回避離隔距離」と言う。）と、衝突予測地点近傍の最接近距離、及び、衝突危険領域への侵入を回避するために必要な“回避幅”を容易に把握できることである。

ここでは、衝突予防援助装置の支援機能を向上する為に、これまでの解析で得られた航行環境評価指標を避航操船判断支援情報処理に適用して、衝突危険領域を表示する回避幅情報表示呈示支援方式（AWDASS； Avoidance Width Display Advanced Support System.）を提案した。

3.3.1 回避幅表示情報

図 3-18 の回避幅情報は、自船 (◎) が他船 A の避航危険領域へ侵入することを回避するために必要な回避幅 (H_L-H_R) 情報を、操船者の衝突危険判断感覚と適合し易い様に ARPA ベクトル上の衝突予測地点 (B) (D_x, D_y) 上に、重量表示している。なお、他船 A のベクトル情報は、他船の位置と針路を示す。

図 3-19 に、図 3-18 の見会い状態における回避幅情報の算出要素となる閉塞避航領域を示す。また、図 3-19 には、閉塞避航領域の避航危険領域； D_S と避航余裕領域； D_M 、及び、相対速度ベクトル上の最接近点と、避航危険領域の短半径の回避離隔距離；DCPA_D を表示している。さらに、回避幅 (H_L

$-H_R$) は、最接近距離の回避離隔距離 (DCPA_D) を避航するために必要な領域に対応していて、見会い状態と、接近速度和及び換算船舶長によって変化するものである。

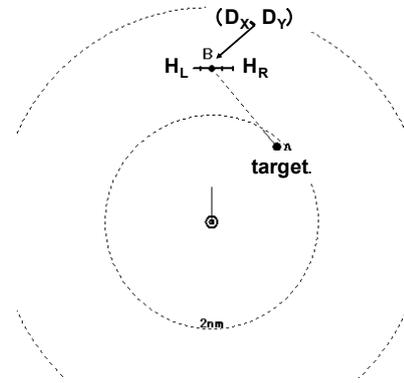


図 3-18 回避幅表示情報

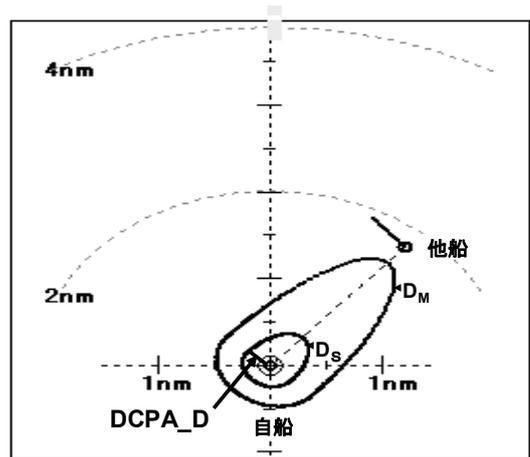


図 3-19 閉塞避航領域と回避離隔距離の関係

(1) 回避幅の算出方式

図 3-20 に、回避幅の算出に関わる避航針路上的最接近距離と、回避離隔距離の関係を示す。また、図 3-20 の横軸は避航針路 (deg)、縦軸は最接近距離 (nm) であって、避航針路に対応した最接近距離 (実線は避航危険領域内、鎖線は避航余裕領域内) と、避航危険領域と避航余裕領域の回避離隔距離；DCPA_D を横鎖線で示す。

図 3-20 の最小最接近距離の針路； θ_0 は、図 3-18 の回避幅中央値に対応していて、自船の現在針路近傍では衝突の危険性が有ることを示している。また、回避幅情報表示領域への侵入を避けるためには、左端の θ_L から右端の θ_R の範囲以外に針路を採って避航する必要性があることを示している。

即ち、回避幅の両端点 (H_L, D_y) と (H_R, D_y) の X 座標点は、最接近距離と避航危険領域の回避離隔距離が等しくな

る方位 (左端 θ_L 、右端 θ_R 、最接近方位 θ_0) と、衝突予測地点 (D_X 、 D_Y) までのY座標値 D_Y を要素に採って、式 (3.17) で算出する。

$$H_L = D_Y \cdot |\tan(\theta_0 - \theta_L)| \quad (\text{m})$$

$$H_R = D_Y \cdot |\tan(\theta_0 - \theta_R)| \quad (\text{m}) \quad \dots (3.17)$$

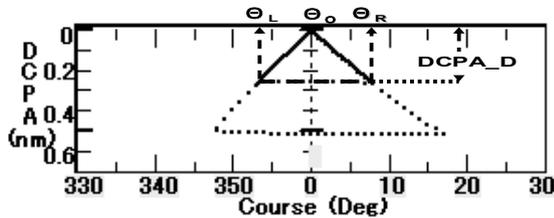


図 3-20 最接近距離と回避幅の関係

(2) 見合い状態と回避幅

回避幅情報の見合い状態による変化を、図 3-21 に示す。

なお、図 3-21 の自船速度は $V_o=12\text{kt}$ 、他船速度は $V_t=10\text{kt}$ 、船舶長は $L_o=100\text{m}$ 、 $L_t=100\text{m}$ 、 $L_k=100\text{m}$ である。

避航危険領域を避けるために必要な回避幅 D_w は、図 3-21 の見合い状態 (θ_t : 相手船の真針路) の場合、横切り船では $\theta_t=270$ 度、 $D_w=-6.9L_k \sim 3.4L_k$ 、反航船では $\theta_t=180$ 度、 $D_w=\pm 2.4L_k$ 、同航船では $\theta_t=0$ 度、 $D_w=\pm 1.9L_k$ である。

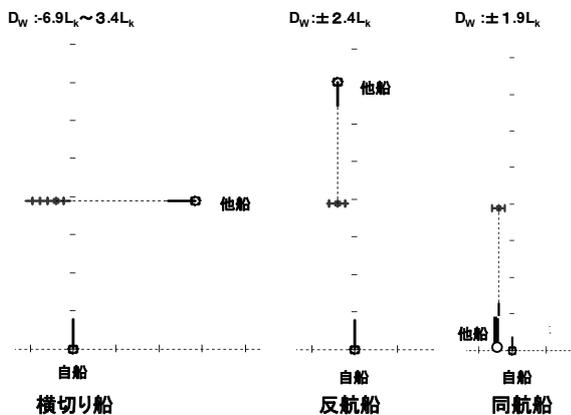


図 3-21 見合い状態と回避幅の関係

(3) 回避幅及び警報検出における最接近距離閾値特性

衝突警報としては、危険船警報、注意船警報、文字警報を発生した。また、警報対象船の危険船と注意船に対しては、回避幅情報を表示して、操船者の操船判断を支援した。

危険船警報は、避航危険領域短半径の最接近距離閾値で検出して、回避幅情報を赤色で表示した。また、注意船警報は、避航余裕領域短半径の最接近距離閾値で検出して、黄色で表示した。さらに、回避幅算出要素の回避離隔距離は、避航危険領域短半径の最接近距離閾値で、算出した。

即ち、回避幅及び危険船警報の検出では、最接近距離閾値に、避航危険領域の狭水道域定数 (0.6 倍) を適用して、式 (3.18) で算出した。また、注意船警報の検出では、避航余裕領域の最接近距離閾値を狭水道域と幅員域に分けて、適用した。例えば、避航余裕領域の短半径の最接近距離閾値は、狭水道域航行では幅員航行域の定数を適用して、式 (3.19) で算出する。また、幅員航行域の場合は幅員航行域と沿岸航行域の中間の定数を適用して、式 (3.19') で算出する。

次に、図 3-22 に、回避離隔距離及び警報検出に用いる避航危険領域と避航余裕領域の短半径、及び、他船針路との関係を示す。また、図 3-22 の横軸は自船に対する他船針路の交角、縦軸は最接近距離閾値であって、●は避航危険領域の短半径 (定数; 0.6 倍)、◆は幅員航行域の避航余裕領域の短半径 (定数; 1 倍)、■は幅員航行域と沿岸航行域の中間の避航余裕領域の短半径 (定数; 1.3 倍) である。

なお、航行条件は、 $L_k=100\text{m}$ 、 $V_o=10\text{kt}$ 、 $V_t=10\text{kt}$ である。

$$D_{SF} = 1 \cdot D_S (L_K, V_F) \quad (\text{m})$$

$$D_{SR} = 0.6 \cdot D_S (L_K, V_R) \quad (\text{m})$$

$$D_{SB} = 1 \cdot D_S (L_K, V_B) \quad (\text{m})$$

$$D_{SL} = 0.6 \cdot D_S (L_K, V_L) \quad (\text{m})$$

... (3.18)

$$D_{MF} = \max (1.6 \cdot D_S (L_K, V_F) \text{ or } V_F \cdot T) \quad (\text{m})$$

$$D_{MR} = 1 \cdot D_S (L_K, V_R) \quad (\text{m})$$

$$D_{MB} = 1.6 \cdot D_S (L_K, V_B) \quad (\text{m})$$

$$D_{ML} = 1 \cdot D_S (L_K, V_L) \quad (\text{m})$$

... (3.19)

$$D_{MF} = \max (2 \cdot D_S (L_K, V_F) \text{ or } V_F \cdot T) \quad (\text{m})$$

$$D_{MR} = 1.3 \cdot D_S (L_K, V_R) \quad (\text{m})$$

$$D_{MB} = 2 \cdot D_S (L_K, V_B) \quad (\text{m})$$

$$D_{ML} = 1.3 \cdot D_S (L_K, V_L) \quad (\text{m})$$

... (3.19')

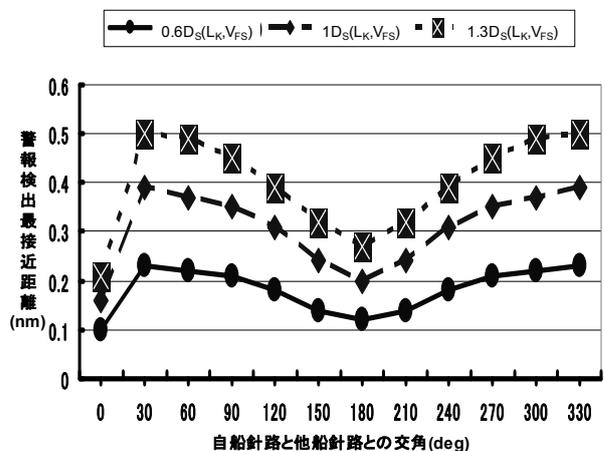


図 3-22 回避幅及び警報検出用の最接近距離閾値

3.3.2 回避幅情報のシミュレーション

回避幅情報表示呈示支援方式の機能動作は、船舶発生部、ARPA 情報表示部、操船操作部を備えた ARPA シミュレータを用いて、検討した。

ここでは、始めに、回避幅情報表示呈示方式を避航操船判断に適用した場合の避航操船判断前後の表示例を示す。

(1) 避航操船前の状態

避航操船前の衝突危険船の回避幅情報を、図 3-23 に示す。

図 3-23 の回避幅情報からは、回避幅情報が針路上にあって、最接近点が避航危険領域の内側にあるので、衝突の危険性が高いことが分かる。また、最接近距離情報からは、避航針路を右舷 10 度に採った場合には、約 0.27nm の最接近距離の余裕を採って、避航危険領域への侵入を回避できることが推測できる。

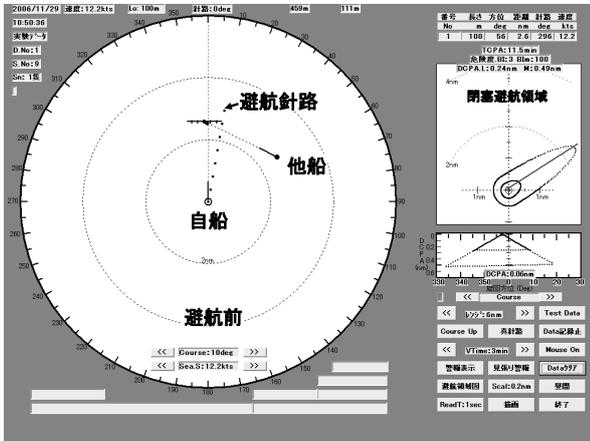


図 3-23 避航前の回避幅支援情報

(2) 避航操船後の変化

図 3-24 に、右舷 10 度に避航針路を採った後の回避幅情報の航行状態を示す。

避航後の自船針路は、回避幅の外側にあって、最接近距離が回避離隔距離 (0.27nm) より大きいので、避航危険領域への侵入を回避していることが分かる。

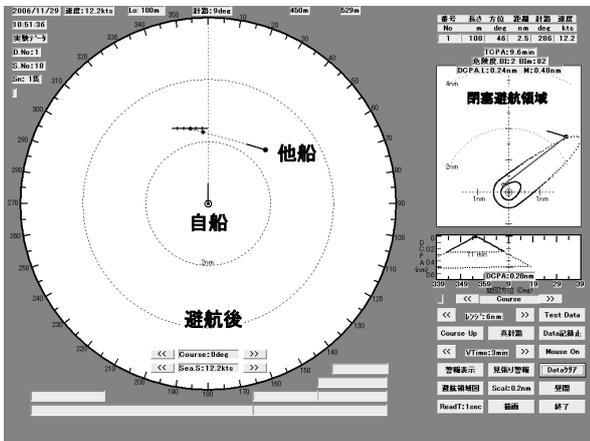


図 3-24 避航後の回避幅支援情報

即ち、在来型 ARPA では、他船のベクトル情報から衝突危険領域を推測して、避航操船判断を行っているので、避航操船判断時に判読誤差が発生する課題があったが、回避幅情報表示呈示支援方式では、避航操船判断情報を正確、且つ、迅速に把握することができる。

(3) 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、変針と速度変更による避航があるので、ここでは、変針 (図 3-25) と減速 (図 3-26) により避航を行った場合の回避幅情報の相対航跡を示す。また、図中の A は相手船の相対位置と相対航跡、B は相相手船 A の相対航跡に対応した、衝突予測位置 (○) と、回避幅 (横線) の変移状態を示す。

なお、航行条件は、 $V_0=12.6\text{kt}$ 、 $V_t=8.4\text{kt}$ 、 $L_0=150\text{m}$ 、 $L_t=50\text{m}$ 、 $L_K=110\text{m}$ である。

① 変針避航

自船が、針路上にある回避幅情報を右舷に 10 度避航変針した場合の回避幅情報の相対航跡を、図 3-25 に示す。

操船者は、この見会い状態に対して、右舷に 10 度避航変針した為、回避幅情報は相対的に左舷に 10 度変移する。また、避航後の回避幅情報の状態量からは、自船針路と回避幅情報と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いることを示している。

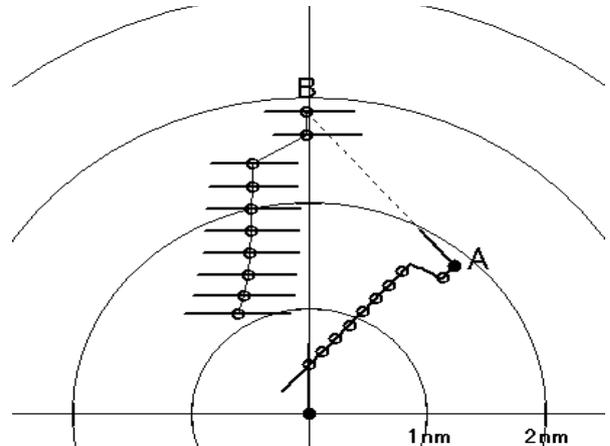


図 3-25 変針避航に伴う回避幅情報の変化

② 減速避航

速度 8.4kt で航行する衝突危険船に対して、自船が速度を 12.6kt から 10.5kt に減速した時の回避幅情報の相対航跡を図 3-26 に示す。また、図 3-26 の回避幅情報は、自船速度の減速に伴って、左側に変移して、最接近時間が一度大きくなって、針路上の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。

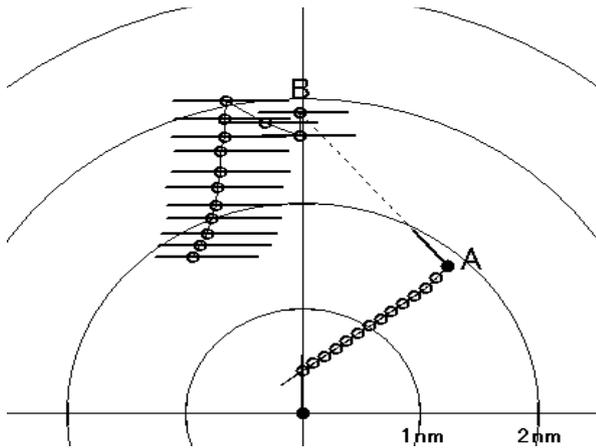


図 3-26 減速避航に伴う回避幅情報の変化

(4) まとめ

避航操船判断支援情報の機能向上を図るため、航行環境評価指標を活用した回避幅情報表示呈示支援方式を提案して、機能動作を、シミュレーションで検証した。

シミュレーションの結果、回避幅情報表示呈示支援方式は、避航操船に伴う回避幅、回避離隔距離、及び、衝突の危険性等の航行状態量の変化を容易に把握でき、避航操船判断支援情報として有用であるものとする。

4. 支援効果の評価

改良型 ARPA の支援効果は、避航操船判断支援情報の情報伝達効率と航行の安全性向上を目的として、次の項目について検討を行った。

- ① 回避幅情報の安全性に関する評価
- ② 支援情報の情報判読認識エラーの評価
- ③ 避航操船判断支援効果の評価

ここでは、始めに、衝突予防援助装置と操船者間の情報伝達経路における情報伝達時エラーの概念図を、図 4-1 に示す。

操船者に伝達する情報量は、ベクトル情報から衝突地点や衝突危険領域を推測する在来型 ARPA の“ベクトル表示支援方式”と、表示した真値の呈示情報を基に操船判断を行う“回避幅情報表示呈示支援方式”では、異なるものとする。

ARPA ベクトル表示支援方式では、ベクトル情報から航行情報を推測する為に、情報判読認識エラーが大きい。

一方、回避幅情報表示呈示支援方式では、航行の危険性を航行環境評価指標によって評価して、支援情報を呈示しているため、表示情報判読時の情報判読認識エラーは小さいが、航行環境評価指標によって評価した時の適正值に対する誤差(以下、「航行環境評価指標エラー」と言う。)が含まれる。

また、支援情報を基に避航操船を行った結果の航跡には、航行環境評価指標エラーと情報判読認識エラーが避航操船判断認識エラーに集約されているものとする。

さらに、避航操船判断支援効果は、避航操船判断認識エラーが減少した分だけ、避航操船時の危険性が低減して、航行の安全性が向上するものと考えられる。

したがって、支援効果の評価は、次の内容について行った。

- ① 回避幅情報の安全性は、回避幅情報を用いた避航操船の確実性を、シミュレーションで評価した。
- ② 支援情報の判読認識エラーは、表示情報の判読誤差を測定して、ARPA ベクトル表示方式に対する判読誤差の低減量を調べた。
- ③ 避航操船判断支援効果は、支援情報を基に、ARPA ベクトル表示支援方式と、回避幅情報表示呈示支援方式で避航操船を行った場合の、避航操船航行危険度を調べて、避航操船航行危険度の低減量を評価した。

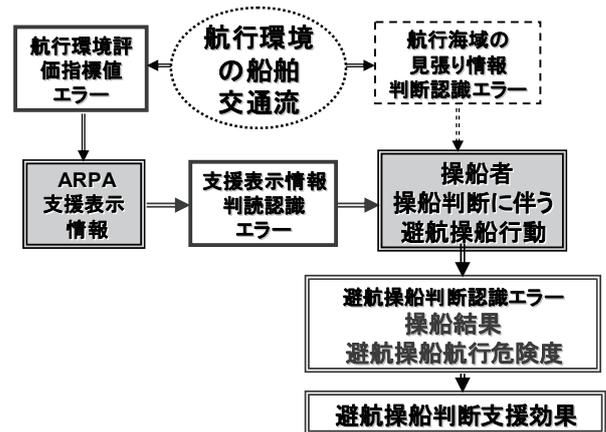


図4-1 情報伝達系路における情報伝達時エラーの概念図

4. 1 実験方法

評価実験の内容は、次に示す。

4.1.1 回避幅表示情報の安全性に関する実験

回避幅情報の安全性の評価では、ARPA 画面に表示した回避幅情報の表示領域を、操船者が避航する場合、避航目標の避航危険領域を一回の避航操船判断で確実に回避できることが重要である。

回避幅情報の安全性評価実験では、操船者が ARPA シミュレータ画面に表示された回避幅情報に基づいて、一回の操船判断で避航操船を行った場合の、避航後最接近距離の安全性を検証した。¹⁷⁾

4.1.2 支援情報の判読認識エラーに関する実験

支援情報の判読認識エラーは、ARPAベクトル情報から衝突危険船に関する情報を推測して判読する場合と、呈示した表示情報を判読する場合の情報判読誤差、危険船認識率、情報判読時心理的負担について、検討した。

(1) 用語の定義

ここで使用する用語は、以下に示す。

- ARPAベクトル表示方式は、ベクトル表示情報から推測して避航判断を行う在来型ARPAの表示方式を言う。
- 情報表示呈示方式は、衝突予測地点と避航領域の情報を表示して、その提示情報を基に判読を行う表示方式を言う。
- 情報判読誤差率は、ARPAベクトル表示方式の判読誤差で、表示呈示方式の判読誤差を規格化した値を言う。
- 危険船認識率は、衝突危険船をARPAベクトル表示情報から推測した場合の衝突危険船隻数と、呈示情報から判読した場合の衝突危険船隻数を、衝突危険船隻数の真値で規格化した値を言う。
- 心理的負担は、情報判読時の心拍数の総和を言う。また、心理的負担率は、情報表示呈示方式の心理的負担をARPAベクトル表示方式の心理的負担で規格化した値を言う。
- 情報判読認識エラーは、表示情報の判読に伴う情報判読誤差率、衝突危険船認識率、心理的負担率の全体平均値を言う。

(2) 情報判読認識誤差測定の実験方法

在来型 ARPA では、ベクトル表示情報を基に、衝突地点と避航領域を推測して避航操船を行っているが、情報判読時において、支援装置と操船者間の情報伝達時における“情報判読認識エラー”が発生している。

表示情報の判読認識エラーの評価実験は、ARPAベクトル表示方式と、情報表示呈示方式の2方式（図4-2）について行った。

次に、表示情報判読誤差測定の実験フローを、図4-3に示す。

情報判読認識誤差の測定実験では、ARPA シミュレータ画面上に表示したベクトル情報と、表示呈示情報から衝突危険船に関わる情報（衝突危険船認識隻数、現在位置までの距離、方位、衝突地点距離、衝突方位、最接近時間）を判読して、表示情報の判読値をコンピュータのキーボードで入力する判

読作業を繰り返し行い、判読誤差、判読時間、被験者の判読時心拍数を測定した。¹⁹⁾

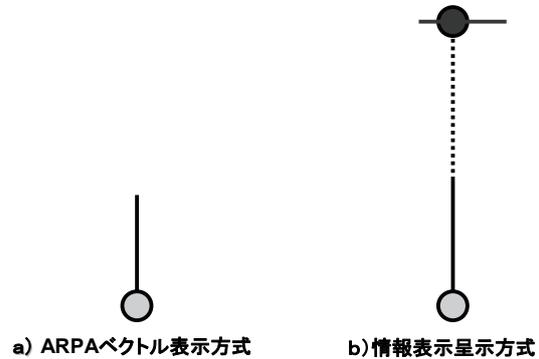


図4-2 支援情報の表示方式

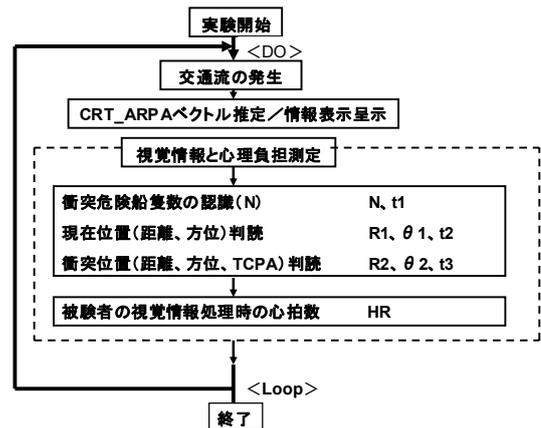


図4-3 情報判読認識誤差測定の実験フロー

4.1.3 避航操船判断支援効果に関する実験

衝突予防防助装置の避航操船判断支援効果は、ARPA ベクトル表示支援方式と回避幅情報表示呈示支援方式による支援情報を見張り情報にして、操船シミュレータ上で避航操船実験を実施した場合の航跡から避航操船航行危険度と、その低減効果を調べた。¹⁹⁾

(1) 用語の定義

評価実験で使用する用語は、以下に示す。

- ARPA ベクトル表示支援方式は、在来型のベクトル情報だけを表示して支援する方式を言う。
- 回避幅情報表示呈示支援方式は、航行情報を評価して、回避幅表示情報を呈示して支援する方式を言う。
- 避航操船判断認識エラーは、避航操船結果に含まれるARPA と操船者間の全情報伝達時エラーを言う。
- 航行環境評価指標エラーは、航行環境評価指標の不適

合によって発生するエラーを言う。

- 避航操船航行危険度は、避航操船結果から算出した航行危険度を言う。
- 避航操船判断支援効果は、基準支援方式に対する被支援方式の避航操船航行危険度の低減量を指標化した値を言う。
- 衝突危険度は、現在時点の衝突危険度を言う。
- 潜在的衝突危険度は、直進した場合に予測される最接近点における衝突危険度を言う。
- 警報対象船は、現在危険度が0以上の船を言う。
- 衝突船は、最接近距離が自船と相手船の換算船舶長の約1.5倍以下になった船を言う。
- 注意警報船は、潜在的衝突危険度が1～99の船を言う。
- 危険警報船は、潜在的衝突危険度が100の船を言う。

(2) 避航操船判断支援効果の実験方法

衝突予防援助装置の支援効果の評価実験は、操船シミュレータ上において、ARPAの表示画面上の“ベクトル表示情報(図4-4.a)”と“回避幅表示情報(図4-4.b)”を見張り情報にして、避航操船を行った結果の航跡から避航操船航行危険度を解析して、避航操船判断支援効果について検討を行った。

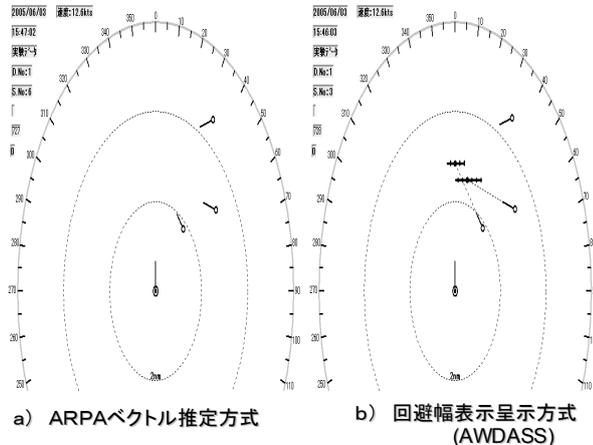


図4-4 評価実験の表示方式

4.2 実験結果

評価実験の結果は、次の通りである。

4.2.1 回避幅表示情報の安全性

回避幅表示情報の安全性は、操船者がARPAシミュレータ画面に表示された回避幅情報を基に、避航操船を行った時の避航後の最接近距離と回避離隔距離との比を調べた。

(1) 避航操船前の回避離隔距離

避航目標の回避離隔距離分布を、図4-5に示す。

また、図4-5の横軸は避航目標回避離隔距離の換算船舶長比、縦軸は頻度分布、 L_K は換算船舶長を示す。さらに、反航船は他船の真針路が160度から200度の船、同航船は340度から20度の船、横切り船は反航・同航船以外の船である。

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 $5L_K$ に分布する。また、横切り船の回避離隔距離は、反航船に比較して大きい。さらに、同航船で回避離隔距離が大きくなるのは、相対速度ベクトルと自船針路との交角が大きい時である。

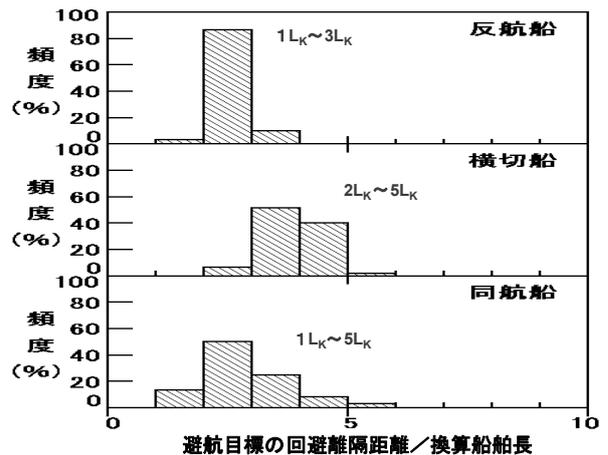


図4-5 避航目標の回避離隔距離分布

(2) 避航操船後の最接近距離

回避幅情報を基に、一回の操船判断で避航を行った結果の最接近距離を、図4-6に示す。また、図4-6の横軸は最接近距離の換算船舶長比、縦軸は頻度分布を示す。

避航後の最接近距離分布は、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 $9L_K$ に分布して、避航後の最接近距離分布は避航目標の回避離隔距離分布より大きいことが分かる。

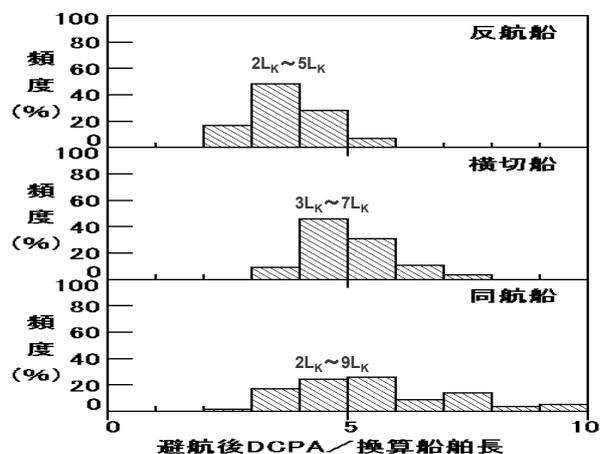


図4-6 避航後の最接近距離分布

(3) 避航後最接近距離/回避離隔距離の比

ここでは、回避幅情報の安全性を検討する目的で、図 4-7 に、避航実験毎の（避航後最接近距離/避航目標回避離隔距離）比を示す。また、図 4-7 の横軸は避航後の最接近距離に対する避航目標の回避離隔距離との比、縦軸は頻度分布を示す。

図 4-7 の（避航後最接近距離/避航目標回避離隔距離）比は、見会い状態に関わらず 1 より大きいので、回避幅情報は安全側に機能していることが分かる。

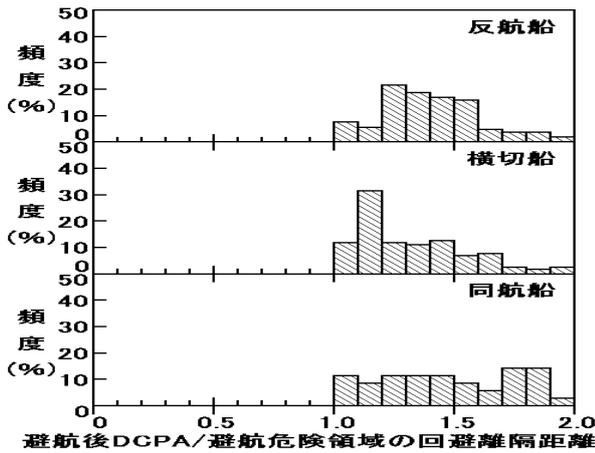


図 4-7 最接近距離/回避離隔距離比の分布

(4) まとめ

実験の結果、避航後の最接近距離は、避航目標の回避離隔距離より全ての実験において大きいので、一回の避航操船判断で、避航危険領域への侵入を回避していることが分かる。

したがって、回避幅情報の表示領域は、避航操船判断支援情報として、安全に機能していることが分かる。

4.2.2 支援情報の判読認識エラー

ここでは、表示方式による情報判読誤差率、衝突危険船の誤認識率、心理的負担の低減率を調べた。

a) 表示情報の判読誤差率

図 4-8 に、情報表示呈示方式の情報判読誤差を、ARPA ベクトル表示方式の情報判読誤差で、規格化した時の情報判読誤差率を示す。また、図 4-8 の縦軸は情報判読誤差率、横軸の項目は左側から他船までの距離・方位、TCPA（最接近時間；Time to Closest Point of Approach）、衝突距離、衝突方位を示す。

情報表示呈示方式の衝突位置に関する情報判読誤差率(◆)の平均値は、ARPA ベクトル表示方式(■)の約 40%に低減する。

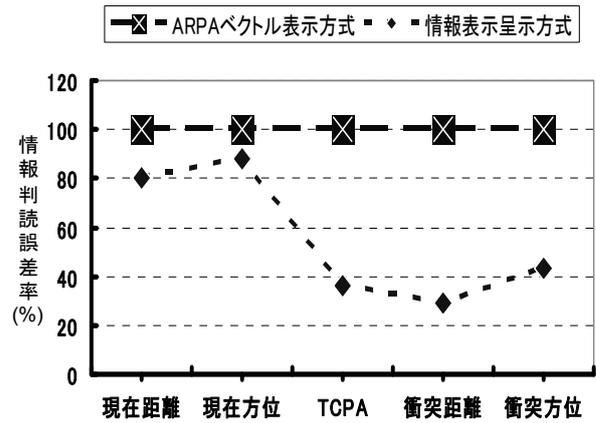


図 4-8 表示情報の判読誤差率

b) 表示情報判読時の衝突危険船認識率

図 4-9 に、表示情報判読時における衝突危険船認識率を示す。また、図 4-9 の縦軸は衝突危険船認識率、横軸は船舶交通流中の衝突危険船隻数を示す。さらに、■は ARPA ベクトル表示方式、◆は情報表示呈示方式を示す。

衝突危険船認識率は、情報表示呈示方式(◆)では 1 倍であるが、ARPA ベクトル表示方式(■)では危険船が 1 隻の場合には約 1.3 倍過剰に誤認している。また、危険船が 3 隻より多い場合には平均 0.83 倍に低下して、見落とし船が発生している。

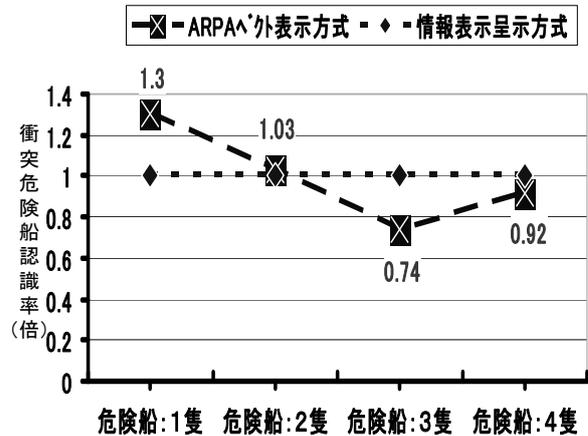


図 4-9 衝突危険船の認識率

c) 表示情報判読時の心理的負担

支援情報判読時の心理的負担は、情報判読作業時間における情報判読作業時心拍数の積分値と相関があるものとする。

即ち、心理的負担 H_{RW} は、判読作業時の心臓に掛かる心理的負担と考えて、判読作業時心拍数 $H_{FW}(t)$ 、判読作業時間 T と置いて、式 (4.1) で定義した。また、1 情報判読作業時の心理的負担 H_{RW} は、1 情報判読時間における情報判読時心拍

数の総和であるものと考えた。

$$H_{RW} = \int_0^T H_{FW}(t) \cdot dt \quad (HR) \quad \dots (4.1)$$

以下、支援情報判読時の心理負担は、ARPA ベクトル表示方式と情報表示呈示方式を用いた場合の情報判読時間と判読時心拍数を実験で測定して、比較検討を行った。

(1) 表示情報の判読時間

表示情報判読時における心理的負担要素の判読時間と判読時心拍数の特性については、以下に述べる。

始めに、船舶交通流中の危険船隻数増加に伴う1情報当たりの判読時間の平均値を、図4-10に示す。

危険船が1隻から4隻に増加した場合の1情報当たりの平均判読時間は、情報表示呈示方式(◆)では短く、6.3秒から7.1秒の範囲で安定しているが、ARPA ベクトル表示方式(■)では危険船隻数の増加に伴って、8秒から15秒に増加する傾向が認められた。

即ち、情報表示呈示方式の判読時間は、ARPA ベクトル表示方式に対して平均値では約45%短縮する。

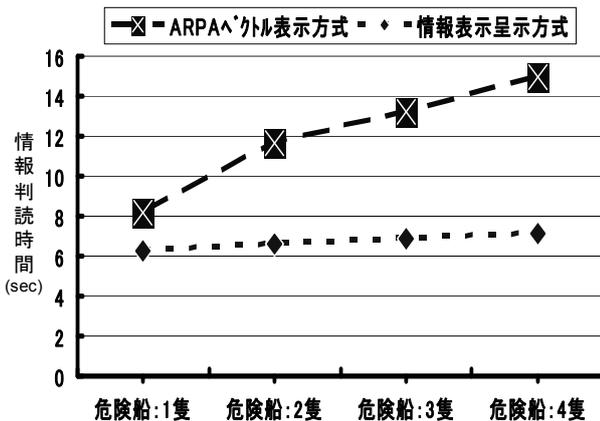


図4-10 表示情報判読時の判読時間

(2) 危険船隻数と平均心拍数の変化

図4-11に、表示情報判読時の危険船隻数に対する平均心拍数の変化を示す。また、図4-11の◆は情報表示呈示方式、■はARPAベクトル表示方式、●は平常時心拍数を示す。

情報表示呈示方式の平均心拍数は、77.1から78.96bpmで変動幅が小さいのに対して、ARPAベクトル表示方式では危険船隻数が増加するのに伴って、74.7bpmから78.5bpmに増加している。

即ち、情報表示呈示方式の支援情報判読時心拍数変動幅は、ARPAベクトル表示方式の場合に比較して、小さいことが分かる。

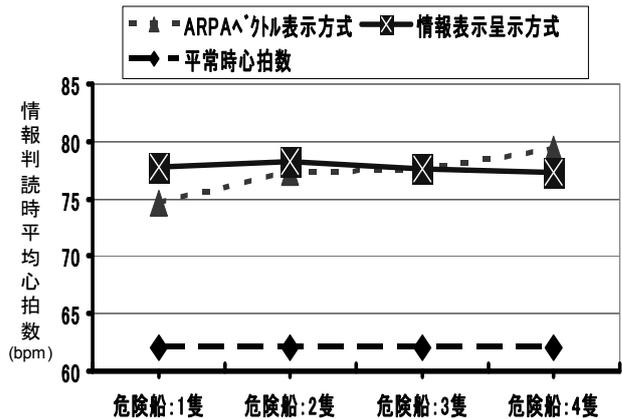


図4-11 表示情報判読時の平均心拍数の評価

(3) 表示情報判読時の心理的負担

図4-12に、情報表示呈示方式(◆)とARPAベクトル表示方式(■)の場合の情報判読時心理的負担を、示す。

なお、図4-12の横軸は船舶交通流中の危険船隻数、縦軸は心理的負担を示す。また、ここでは、1情報当たり判読時間T(sec)、1秒当たりの平均心拍数H_{FW}(HR)と置いて、1情報判読作業時の心理的負担H_{RW}は、1情報の判読作業時間に対する心拍数総数と置いて、式(4.2)で与えた。

$$H_{RW} = T \cdot H_{FW} \quad (HR) \quad \dots (4.2)$$

情報表示呈示方式の1情報当たり判読時心理的負担は、危険船が1隻から4隻まで増加した場合は8.2~9.1HRの範囲で変化して、危険船1隻増加に対する変動増加幅は0.3HRである。

しかし、ARPAベクトル表示方式の場合は、全体では10.4~19.9HRの範囲で増加していて、危険船1隻増加に対する変動幅は約3.2HRである。

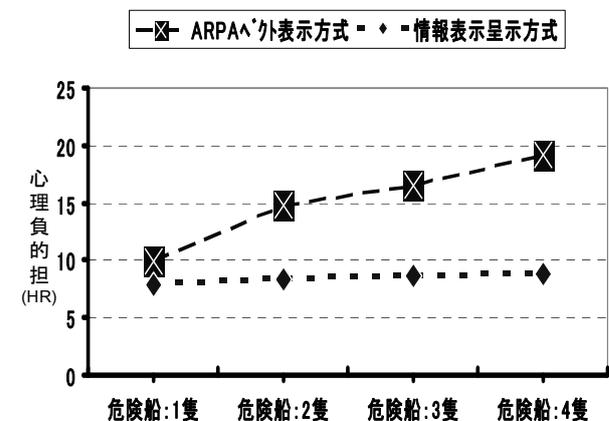


図4-12 表示情報判読時の心理的負担

即ち、危険船が1隻から5隻の場合の情報表示呈示方式の表示情報判読時心理的負担は、ARPA ベクトル表示方式に比較して、平均では約55%程度に低減する。

(4) まとめ

情報判読認識エラーの評価結果を、図4-13に示す。

なお、図4-13において、情報表示呈示方式の情報判読認識エラーは、ARPA ベクトル表示方式の評価値を基準(100%)で規格化して示している。

情報表示呈示方式の情報判読誤差率は40%、衝突危険船認識率は0%、情報判読時心理的負担は55%に低減することが分かる。

したがって、情報表示呈示方式は、表示情報判読誤差の低減、危険船の認識率向上、心理的負担の低減に、寄与するものと考えられる。

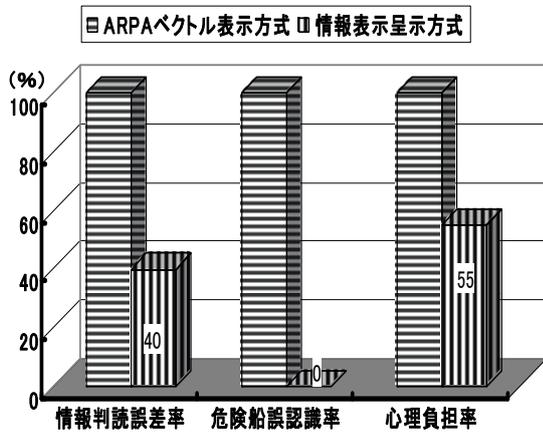


図4-13 表示方式の情報判読認識エラー

4.2.3 避航操船判断支援効果

回避幅情報表示呈示支援方式の支援効果は、操船シミュレータを用いた避航操船実験を実施して、避航操船航行危険度を基に評価して、ARPAベクトル表示方式との比較を行った。

a) 避航操船時の航跡と航行状態量の関係

始めに、避航操船航行時の航跡と航行状態量の変化例を、図4-14に示す。また、図4-14の左図の○は自船、●と横鎖線は避航変針点を示す。

さらに、左図の航跡は、航行船舶の中で警報対象船となった6隻の船との見合い関係を示すと共に、航跡の右側の図には、左側から衝突危険度、潜在的衝突危険度、DCPA、舵角、自船針路等の航行状態量を示す。

図4-14では、自船は潜在的衝突危険度が100の時に、●印点で4回の避航操船を行っている。また、避航変

針後には、最接近距離が増加するのに伴って、潜在的衝突危険度が低下しているのので、避航操船が安全に行われていることが分かる。

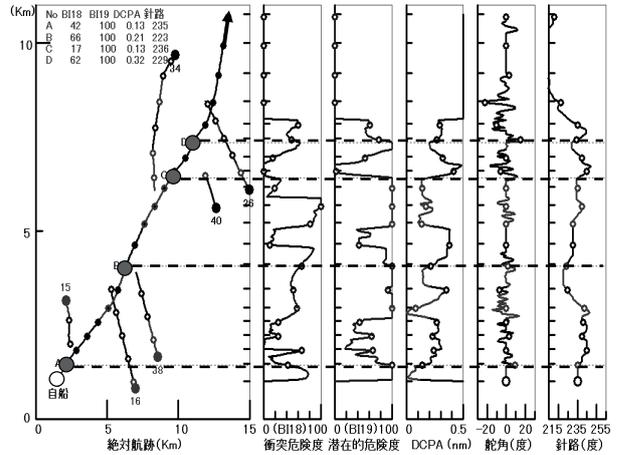


図4-14 避航操船時の航跡と航行状態量

b) 相対航跡で観た安全性

避航操船結果の相対航跡は、ARPA ベクトル表示支援方式(以下、「ARPA_V」と言う。)を用いた場合(図4-15)と、回避幅情報表示呈示支援方式で、適正な閉塞避航領域値の1倍を用いた場合(以下、「AWDASS_1A」と言う。)(図4-16.a)と、0.5倍を用いた場合(以下、「AWDASS_0.5A」と言う。)(図4-16.b)に分けて、比較して示した。

なお、航跡図の表示レンジは1nm、航過時航跡の●は最接近点における潜在的衝突危険度が100の船、○は潜在的衝突危険度が100より小さい船を示す。

相対航跡の避航操船結果から観た各々の支援方式を用いた場合の避航操船結果は、次の通りである。

- ARPA ベクトル表示支援方式を用いた場合は、船首横切り船に対して避航操船時期が遅れていて、また、警報危険船と船首近傍通過船隻数は、AWDASS_1A、AWDASS_0.5Aを用いた場合に比較して、多く存在するので、安全に航行できていないことが分かる。
- 回避幅情報表示呈示支援方式(AWDASS_1A)を用いた場合は、ARPA_Vを用いた場合に比較して、最接近点航過時の警報危険船が少なく、船首横切り船に対しての避航操船は早い時期に安全に行われていることが分かる。
- 回避幅情報表示呈示支援方式(AWDASS_0.5A)を用いた場合は、AWDASS_1Aに比較して、船首を横切る危険船に対する避航量が小さくなって、避航操船時期が遅れているので、0.5倍の閉塞避航領域は、最接近距離の余裕が小さく十分安全でないことが分かる。

c) 閉塞避航領域値の安全性

航行環境評価指標の安全性は、閉塞避航領域値の1倍 (AWDASS_1A) (図 4-16.a)) を用いた場合と、0.5倍 (AWDASS_0.5A) (図 4-16.b)) を用いた場合について、比較して検討した。

閉塞避航領域の大きさを変化させた場合の避航操船結果は、次の通りである。

- AWDASS_1A (図 4-16.a)) では、自船近傍に、避航危険領域侵入船が存在しないので、1倍の閉塞避航領域値は安全に機能していて適正であることが分かる。
- AWDASS_0.5A (図 4-16.b)) では、船首近傍通過船と、船首横切り船の中に、最接近点通過時に接近する近傍通過危険船 (●) が存在するので、0.5倍の閉塞避航領域値は、適正でないことが分かる。

d) 衝突予防支援方式の支援効果

衝突予防支援方式の支援効果は、避航操船実験結果の第1危険評価要素値 (表4-1) を基に、支援方式毎の避航操船航行危険度を解析して、検討した。

ここでは、始めに、支援方式毎の避航操船結果から得た避航操船航行危険度の第1危険評価要素値を、表4-1に示す。

表4-1 実験結果の第1危険評価要素値

支援方式	警報対象船	注意警報船	危険警報船	衝突船	船首通過船 0.2 nm	船首通過船 0.4 nm	航行時平均衝突危険度
ARPA_v	50	33	15	1	3	9	67
AWDASS_0.5A	31	25	7	0	0	3	57
AWDASS_1A	19	10	2	0	0	0	48

次に、避航操船航行危険度の算出方法を、示す。

(1) 避航操船航行危険度の危険評価要素値

避航操船航行危険度の評価要素としては、潜在的衝突危険度が0以上の警報対象船隻数、最接近点通過時の注意警報船隻数と危険警報船隻数、衝突危険船隻数、船首通過距離 (DF=0.2nm、0.4nm) 以内の通過船隻数、警報対象船の避航操船時1ステップ当たりの平均衝突危険度の7項目の要素

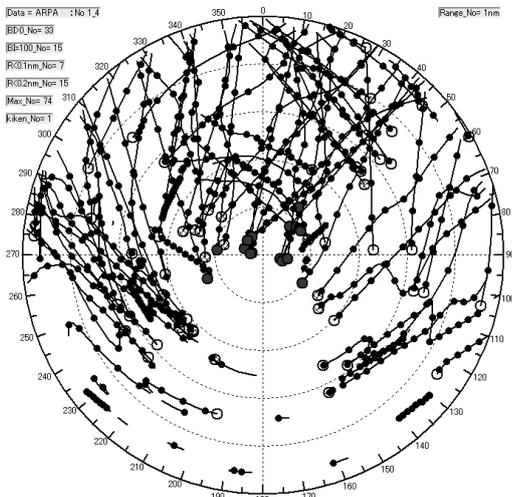


図 4-15 ARPA_Vにおける航跡

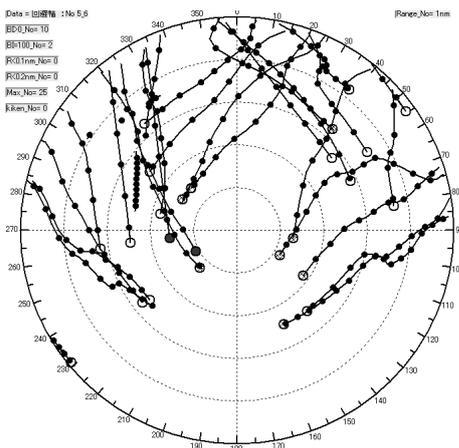


図 4-16. a) AWDASS_1Aにおける航跡

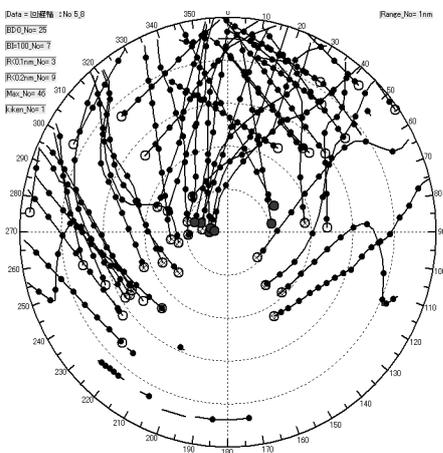


図 4-16. b) AWDASS_0.5Aにおける航跡

を取り扱った。

(2) 危険評価要素値の算出

図4-17の第2危険評価要素値は、第1危険評価要素値の各要素値を基準警報対象船隻数(100隻)で規格化して求めた。

また、図4-17の横軸の各評価要素は、左側から警報対象船隻数、最接近点通過時の注意警報船隻数、危険警報船隻数、衝突危険船隻数、船首通過距離(DF=0.2nm、0.4nm)以内の通過船隻数、及び、警報対象船に対する1ステップ当たりの平均衝突危険度を示す。

さらに、図4-17の棒グラフは、左側からARPAベクトル表示支援方式(ARPA_V)、回避幅情報表示呈示支援方式のAWDASS_0.5Aと、AWDASS_1Aを示す。

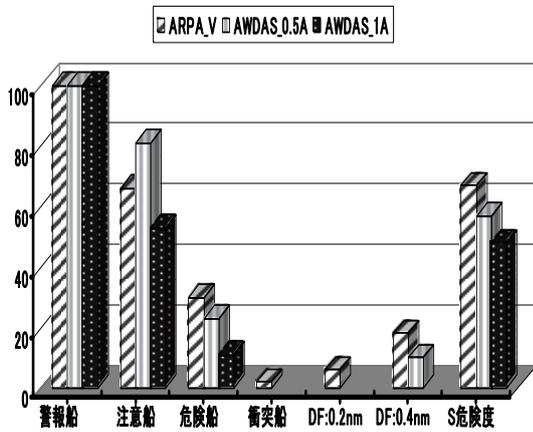


図4-17 支援方式毎の第2危険評価要素値

第2危険評価要素値は、次の通りである。

- ARPA_Vの危険船隻数頻度は、最接近点通過時の注意警報船；66隻、危険警報船；30隻、衝突危険船；2隻、船首通過距離0.2nm以内の通過船；6隻、0.4nm以内の通過船；18隻、警報対象船の1ステップ当たり平均衝突危険度；67である。
- AWDASS_0.5Aの危険船隻数頻度は、注意警報船；81隻、危険警報船；23隻、衝突危険船；0隻、船首0.2nm以内の通過船；0隻、0.4nm以内の通過船；10隻、警報対象船の1ステップ当たりの平均衝突危険度；57である。
- AWDASS_1Aの危険船隻数頻度は、最接近点通過時の注意警報船；53隻、危険警報船；11隻、衝突危険船；0隻、船首通過距離0.2nmと0.4nm以内の通過船；0隻、警報対象船の1ステップ当たりの平均衝突

危険度；48である。

第3危険評価要素値は、第2危険評価要素値の基準支援方式(ARPAベクトル表示支援方式)の危険評価要素値で、被支援方式(回避幅情報表示呈示支援方式)の各危険評価要素値を規格化して求めた。また、避航操船航行危険度は、第3危険評価要素値の支援方式毎の平均値を算出した。

(3) 避航操船航行危険度

図4-18に、支援方式毎の避航操船航行危険度を示す。また、図4-18の横軸は左側からARPA_V、AWDASS_0.5AとAWDASS_1Aを示す。

避航操船航行危険度は、基準支援方式(ARPA_V)の基準評価値(100%)に対して、AWDASS_0.5Aでは約57%、AWDASS_1Aでは約32%に低減する。

即ち、AWDASS_1Aの避航操船航行危険度は、適正な閉塞避航領域値を用いた場合が一番小さい。

避航操船航行危険度が低減する理由としては、回避幅情報表示呈示支援方式の情報判読認識エラーと航行環境評価指標エラーが低減して、操船者が受け取る避航操船判断情報の伝達量が向上した為に、避航操船航行危険度が低減したものと考えられる。

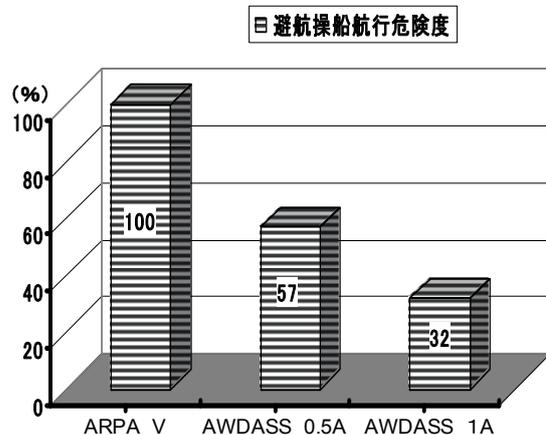


図4-18 支援方式の避航操船航行危険度

e) 支援方式の避航操船判断支援効果

図4-19に、支援方式毎の避航操船判断支援効果を示す。また、図4-19の横軸は左側からARPA_V、回避幅情報表示呈示支援方式のAWDASS_0.5AとAWDASS_1Aを示す。さらに、縦軸は避航操船判断支援効果を示す。

避航操船判断支援効果(SE)は、避航操船航行危険

度の低減量を指標化したものであって、基準支援方式（ARPAベクトル表示支援方式）の避航操船航行危険度（基準評価値；SEV）で、被支援方式（回避幅情報表示呈示支援方式）の避航操船航行危険度（被評価値；EV）の低減量を、規格化したものであって、式（4.3）で定義した。

$$SE = 1 + (SEV - EV) / SEV \quad (\text{倍}) \quad (4.3)$$

回避幅情報表示呈示支援方式の避航操船判断支援効果は、ARPA_Vの支援効果を基準に採ると、AWDASS_0.5Aでは1.43倍、適正な航行環境評価指標を用いたAWDASS_1Aでは1.68倍に向上する。

即ち、衝突予防援助装置の避航操船判断情報の支援効果は、支援情報の表示方式と、航行環境評価指標値によって、変化することが分かる。また、避航操船判断支援効果は、在来型ARPAと比較して、回避幅情報表示呈示支援方式の方が向上することが分かる。

したがって、避航操船判断時の支援効果を向上するためには、避航操船判断支援情報を呈示して、操船者の避航操船判断時の情報判読認識エラーを低減すると共に、適正な航行環境評価指標値を選択して、航行環境評価指標エラーを低減する方式が有効であるものとする。

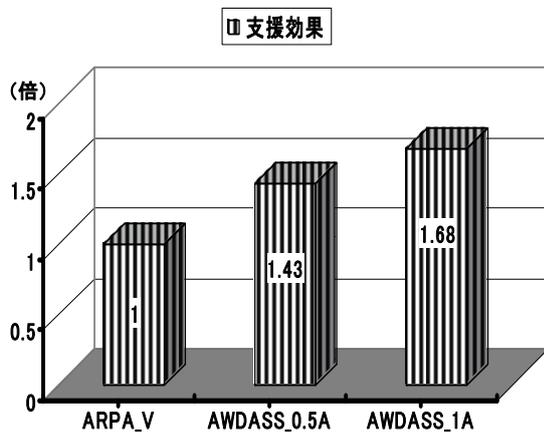


図4-19 支援方式の避航操船判断支援効果

6) まとめ

避航操船判断支援効果は、次の通りである。

- 回避幅情報表示呈示支援方式の避航操船航行危険度は、ARPAベクトル表示支援方式の基準評価値（100%）に対して、約32%に低減する。
- 航行環境評価指標に閉塞避航領域を用いた回避幅

情報表示呈示支援方式（AWDASS_1A）の避航操船判断支援効果は、在来型ARPAの支援効果を基準（1倍）に採ると、約1.68倍に改善する。

即ち、適正な閉塞避航領域を適用した回避幅情報表示呈示支援方式（AWDASS_1A）は、衝突予防援助装置の操船判断時の情報判読認識エラーと、航行環境評価指標エラーの低減、及び、航行の安全性向上に寄与することを確認した。

4.3 まとめ

回避幅情報表示呈示支援方式は、衝突予防援助装置として活用でき、且つ、次の点で有効であることが分かった。

- 回避幅情報表示呈示支援方式は、衝突事故を予防して、情報判読認識エラー、避航操船航行危険度、及び、見張り情報処理負担等の低減に有効である。
- 回避幅情報からは、避航領域と自船と他船の避航操船効果を容易に把握できる。また、一回の避航操船判断で、確実に避航できる。
- 回避幅情報表示呈示支援方式は、ARPAベクトル表示支援方式と比較して、航行の安全性が向上して、判断錯誤の防止と見張り作業時心理負担の低減に寄与する。

5. あとがき

衝突予防援助装置の避航操船時の支援機能の向上を図るため、航行環境評価指標要素に船舶の操縦停止性能特性を採り入れて閉塞避航領域を確定して、回避幅表示情報を呈示して支援する改良型ARPAを提案した。また、改良型ARPAの支援効果の評価は、(1)回避幅表示情報の安全性、(2)支援情報の判読認識エラー、(3)避航操船判断支援効果等について行った。

考察の結果、次のことが分かった。

- 航行環境評価指標の要素には、相手船舶船長、速度、制動停止距離を採り入れて、閉塞避航領域を確定した。その結果、航行環境評価指標で衝突危険領域を評価して、警報船を検出する方式は、不要な警報の低減対策として、有効である。
- 情報表示呈示支援方式の情報判読認識エラーは、在来型ARPAベクトル表示方式に比較し低減して、判読誤差の低減、判読時間の短縮、危険船認識率の向上、情報判読時心理的負担の低減等に、有効である。

- 回避幅情報表示呈示支援方式の避航操船判断支援効果は、在来型ARPAベクトル表示支援方式に比較して、大きく改善する。

したがって、操船判断支援機能の要素に航行環境評価指標と、船舶の諸元・性能特性を採り入れて、回避幅情報を表示する改良型ARPAは、航行の安全性向上と見張り作業負担の低減に寄与して、有効に活用できるものと考えた。

謝 辞

本研究を実施するに当たり、貴重な操縦性能試験データのご提供を賜りました日本船長協会、元日本船舶整備公団、及び全国内航タンカー海運組合、日本内航海運組合総連合会、また、ARPA データの実船調査でご協力と便宜を図って頂いた航海訓練所教育部研究課・銀河丸乗組員及び訓練実習生、日本無線株式会社関係者、関西汽船株式会社の各位、さらに、操船シミュレータ実験関係者に対して、深く感謝すると共に、厚くお礼を述べる。

参考文献

- 1) 今津隼馬：避航と衝突予防装置、成山堂書店（1984）、昭和59年、12月
- 2) 三宅幸彦：自動船舶識別システム（AIS）について、日本航海学会誌、第137号（1998）、平成10年9月、pp.12-17
- 3) 海難審判庁：審判採決の現状、平成12年度版
- 4) 海難審判庁：狭水道における海難事故の実態及び船舶間衝突の実態、平成12年度版
- 5) 海難審判庁：海難レポート2007、(2007)、pp.1-62
- 6) 有村信夫、福戸淳司、丹羽康之：目視観測距離誤差の調査、日本航海学会論文集 117号（2007）、pp.167-173
- 7) 有村信夫、山田一成、菅沢忍：航行環境情報の表示方式に関する研究、一音声を用いた衝突予防支援装置の警報指示方式について一、船舶技術研究所報告、VOL29.3（1992）、pp.13-32
- 8) 有村信夫、勝原光治郎、三友信夫、室原陽二：衝突予防支援装置の開発に関する研究：船舶技術研究所報告、VOL37.4（2000）、pp.179-218
- 9) 有村信夫、福戸淳司、丹羽康之：船舶の航行環境安全性評価指標に関する研究、一閉塞避航領域指標について一、日本航海学会論文集 116号（2007）、pp.99-106
- 10) 吉村康男：操縦性基準における停止性能の検討、日本造船学会論文（1994）、第176号
- 11) 日本海事協会：船舶の停止性能について（1979）、pp.1-6
- 12) 有村信夫、山田一成、菅沢忍、池上二郎：船舶の諸元特性の統計解析に関する一考察、日本航海学会論文集89号（1993）、pp.237-243
- 13) 有村信夫、勝原光治郎、室原陽二：実船調査による航行環境評価指標の解析、日本航海学会論文集 98号（1997）、pp.213-223
- 14) 有村信夫、勝原光治郎、金田章治：衝突予防援助装置の航行環境情報表示方式に関する研究、日本航海学会論文集 104号（2001）、pp.37-45
- 15) 藤井弥平：海上交通工学、海文堂（1971）、昭和46年11月
- 16) 有村信夫、沼野正義、福戸淳司：避航領域と衝突危険判定に関する考察、日本航海学会論文集106号（2002）、pp.47-54
- 17) 有村信夫、福戸淳司、田中邦彦、岡崎忠胤：避航操船判断情報の支援効果に関する考察、日本航海学会論文集 112号（2005）、pp.117-123
- 18) 有村信夫、沼野正義、福戸淳司、田中邦彦：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 111号（2004）、pp.103-107
- 19) 有村信夫、田中邦彦：衝突予防支援方式の安全性評価に関する研究、日本航海学会論文集 114号（2006）、pp.47-58