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

有村 信夫*・勝原 光治郎*・金田 章治**

Study on the Display Format of Marine Navigation Environmental Information of ARPA

Nobuo ARIMURA, Kojiro KATSUHARA and Shoji KANEDA

Abstract

This paper examined display format of marine navigation environmental information of ARPA.

The study deals with next 3 topics:

- (1) The statical analysis of the relation between dimensions and performance of the ship.
- (2) The estimation method of performance with observation of ship length by ARPA.
- (3) The modeling of risk evaluation indices of the marine navigation environment.

Results are as follows:

- (1) The maneuverability of the partner ship can be estimated by the length of the ship observed by ARPA.
- (2) The region of the evading navigation was quantitatively modeling by turning performance and approach speed.
- (3) The marine navigation environmental assessment indices can be applied as collision risk sea area information.

1. はじめに

輻輳海域の衝突事故を防止して、航行の安全性向上を図るためには、衝突予防援助装置で航行の危険性を判断する航行環境評価指標要素に、船舶の諸元及び操縦性能特性と、実船の避航領域を取り入れて、航行実態に合った航行環境情報を操船者に提供する必要がある。

しかし、現在の衝突予防援助装置 (ARPA: automatic Radar Plotting Aids) では、警報発生時の判断要素に最接近距離と最接近時間を用いている為、船舶の諸元や操縦性能特性の要素は取り入れていない。また、将来的には自動船舶識別システム (AIS; Automatic Identification System) の実用化が予定されているが、全船舶に義務付けられることは想定しにくいから、AISを装備していない船舶

の諸元及び操縦性能データを補完する手法が必要である。

本研究は、衝突予防援助装置で航行の危険性を判断する「航行環境評価指標」要素に船舶の諸元及び操縦性能特性を導入して、操船判断支援機能の向上を図ることを目的に実施⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾した。

考察は、衝突予防援助装置の航行環境評価指標要素に係わる船舶の諸元及び操縦性能特性の解析、ARPAレーダを用いた操縦性能特性の推定、避航領域の操縦性能特性による規格化について検討した。また、航行環境評価指標は、改良型衝突予防援助装置の実証機を開発して、潜在的衝突危険海域表示情報として適用した。

2. 改良型衝突予防援助装置の概要

改良型衝突予防援助装置のシステム構成を図 1 に

* 正会員 船舶技術研究所 (〒181-0004 東京都三鷹市新川6-38-1)

** 正会員 航海訓練所 (〒231-0003 横浜市中区北仲通5-57 横浜第2合同庁舎20F)

改良型ARPAでは、相手船舶船長と速力を測定して操縦能特性を推定し、航行の危険性を評価する機能を従来ARPAに付加した。また、衝突の危険性のある船舶の接近や見張りに必要な警報情報は合成音声で、針路上において他船の侵入を避けて欲しい衝突の危険性のある避航領域（「潜在的衝突危険海域」と言う）の情報はARPA画面上に表示して、操船者の見張り情報処理の負担軽減と情報伝達の効率化を図った。

避航操船時の操船者は、レーダや目視観測等で相手船の大きさや速力等の情報を得て、長年の実務経験から相手船の諸元及び操縦性能特性を推定し、避航開始時の時間的・距離的余裕や最接近点航過時の船舶間離間距離の余裕を判断要素にしている。

即ち、通常の操船では、停止性能よりも旋回操縦性能を避航操船の判断要素にしているものと考えられる。したがって、航行環境評価指標要素の避航領域は、自船と相手船の船舶長及び速力で操縦性能特性を推定して、旋回性能で規格化して数式化した。

避航領域の解析に関わる用語は、次に定義した。

④航過十分距離：航過時の航跡数頻度分布が減少し始める航過距離。

そして、避航領域は被験船近傍の「避航危険領域距離」と、避航領域の外側の「避航十分領域距離」で構成した。

避航領域の相対座標上概念図を図2に示した。

避航操船時の操船判断要素としては、避航開始時の相対ベクトル方向の「避航距離」と、衝突の見合い関係を回避した後では自船と相手船がすれ違う時の「航過距離」の余裕が重要である。

避航領域の解析は、避航対象船が存在する相対ベクトル方向の避航距離と最接近点を航過する船が侵入を避ける航過距離について行った。

したがって、避航領域の算出式は、避航危険領域距離と避航十分領域距離について示した。

a) 避航領域の指標

a) 避航領域の指標

航行環境評価指標に関わる相対座標上の避航領域（避航危険領域距離； D_L (m)）と避航十分領域距離； D_M (m)）は、旋回縦距離； D_A (L_K, V_S)、相手船の相対方位； Φ_B 、相手船の相対方位と相対ベクトル方位の仰角； Φ_{BS} として、実船調査結果を基に、式 (1、2) で定義した。

$$D_L = C_{LA} \cdot D_A(L_K, V_S) \cdot [1 + \alpha \cdot |\sin(\Phi_T)|] \cdot [1 + k_{LA} \cdot (\cos(\Phi_{RS}))^n] \quad (1)$$

$$D_M = C_{MA} \cdot D_A (L_K, V_S) \cdot [1 + k_{MA} \cdot (\cos(\Phi_{BS}))^n] \quad (2)$$

避航領域のパラメータは、

- ・ $D_A(L_K, V_S)$ ；換算船舶長 L_K と接近速度 V による旋回縦距 (m)
- ・ $D_A(L_W, V_S)$ ；換算船舶長 L_W と接近速度 V による旋回縦距 (m)
- ・ L_O ；自船船舶長、 L_T ；相手船船舶長
- ・ 換算船舶長； $L_K = \sqrt{(L_O^2 + L_T^2)/2}$ 、

$$L_{K170} = \sqrt{(L_O^2 + L_{T170}^2)/2}, L_W = L_O + L_T$$

- ・ $V_S = V_{SO} + V_{ST}$ (kts)；接近速度、(V_O ；自船速度、 V_T ；他船速度、 $V_{SO} = V_O \cos(\Phi_B)$ 、 $V_{ST} = V_T \cos(\Phi_{BT})$ 、 $V_{SO} \geq 0$ 、 $V_{ST} \geq 0$)、 V_{S00} ；衝突針路上の接近速度
- ・ $\Phi_{BS} = \Phi_B - \Phi_S - \pi$ 、 $\Phi_{BT} = \Phi_B - \Phi_T - \pi$ (rad)、(Φ_T ；相手船の針路、 Φ_B ；相手船の相対方位、 Φ_S ；相対ベクトル方位)
- ・ α ；避航領域の見合い状態係数、 n ；定数
- ・ C_{LA} ；航過危険距離係数、 C_{MA} ；航過十分距離係数、 C_{NA} ；避航十分距離係数
- ・ $k_{LA} = C_{DA} \cdot D_A(L_W, V_{S00}) / (C_{LA} \cdot D_A(L_K, V_{S00})) - 1$
- ・ $k_{MA} = C_{NA} \cdot D_A(L_{K170}, V_{S00}) / (C_{MA} \cdot D_A(L_K, V_{S00})) - 1$

とした。

なお、接近速度 V_S 、相手船舶長 L_T 、相手船針路 Φ_T 、相手船の相対方位と相対ベクトル方位の仰角 Φ_{BS} 等のデータはARPAで測定して得た。また、避航領域の係数は、 $\alpha = 0.2$ 、 $n = 6$ である。

b) 衝突危険度の指標

避航操船の危険性を表す評価指標の衝突危険度は、避航領域上の避航確率に対応して、また、避航確率は避航領域上の航跡数累積頻度の大きさに対応しているものと仮定した。

即ち、避航航跡数頻度分布(図3.a)の航跡数累積頻度(図3.b)は、避航確率に対応しているものと考えた。

避航確率は、現在位置； R_P に対する避航危険領域； D_{LC} 、避航十分領域； D_{MC} として、避航操船の危険性を表す評価指標の衝突危険度； B_I は式(3)で定義した。

$$B_I = 100 \cdot \left(\frac{D_M - R}{D_M - D_L} \right)^2, (D_M \geq R \geq D_L) \quad (3)$$

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

$$B_I = 100 \cdot \frac{(D_M - R)(D_{MC} - R_C)}{(D_M - D_L)(D_{MC} - D_{LC})} \quad (3')$$

$$(D_M \geq R \geq D_L) \text{ and } (D_{MC} \geq R_C \geq D_{LC})$$

$$B_I = 100, (R \leq D_L \text{ and } R_C \leq D_{LC})$$

$$B_I = 0, (D_M \leq R \text{ and } D_{MC} \leq R_C)$$

3.2 ARPAを用いた船舶操縦性能特性の推定

避航領域を算出する要素の操縦性能特性は、ARPAレーダで相手船の船舶長と速力を測定して推定した。

a) 船舶の操縦性能試験離特性

操縦性能特性は、操縦性能試験データ(320隻)⁽⁵⁾を基に、ARPAレーダで測定できる船舶の長さ； L (m)と速力； V (kts)の関係を調べた。

1) 旋回縦距離特性

旋回縦距離； D_A の重回帰式は、式(4)に示した。

$$\log D_A = 0.892 \cdot \log L + 0.631 \cdot \log V - 0.016 \quad (m) \quad (4)$$

式(4)の重相関係数と偏回帰係数のダービン・ワトソン比は($r_s = 0.88$, $D.W = 1.71$)である。

2) 停止距離特性

停止距離特性； D_S の重回帰式は式(5)に示した。

$$\log D_S = 1.253 \cdot \log L + 0.351 \cdot \log V + 0.0035 \quad (m) \quad (5)$$

a) 旋回縦距離の推定

b) 停止距離の推定

図3 操縦性能試験特性と重回帰式による推定操縦性能特性の比較

式(5)の重相関係数と偏回帰係数のダービン・ワトソン比は ($r_s=0.93$, $D.W=1.36$) である。

3) 重回帰式による操縦試験性能特性の推定

推定式の妥当性は、操縦性能試験値と操縦性能試験データのL、Vを用いて重回帰式で計算した推定値(旋回縦距離、停止距離)の関係を比較し図3に示した。

なお、図3の横軸は操縦性能試験値、縦軸は重回帰式による推定値を示している。

分析の結果は、次の通りである。

- ①旋回縦距離の重回帰式(4)のダービン・ワトソン比(D.W)は、停止距離の式(5)に比較して大きいので、推定精度は式(4)の方が高いことが分かった。したがって、航行環境評価指標の規格化要素としては旋回縦距離を採用した。
- ②実船の操縦性能特性は、船種や積載重量によって変化する。また、推定値は平均を表しているので分散誤差が生じる。したがって、将来的にはAISを利用して正確な操縦性能特性を把握する必要がある。

b) ARPAを用いた船舶長の観測精度

1) 船舶長の観測調査

船舶長の観測精度調査は、改良型ARPAで相手船舶長を測定する機能を付加して、東京港と大阪港における停泊時に、レーダパルス幅が $0.2\mu\text{sec}$ と $0.6\mu\text{sec}$ の場合について実施した。

なお、船名から船舶明細書で調べた船名確認船舶は、($0.2\mu\text{sec}$; 47隻、 $0.6\mu\text{sec}$; 117隻)である。

2) 船舶長の観測精度

観測精度は、船名から船舶明細書で調べた船名確認船舶の実船舶長とARPAレーダで観測した観測

船舶長の観測誤差について検討した。

ここでは、 $0.2\mu\text{sec}$ パルス幅で測定した実船舶長と観測船舶長の関係を図4に示した。

なお、図4の鎖線は距離分解能(30m)、実線は観測船舶長の回帰直線を示している。

観測結果は、次の通りである。

- ①観測船舶長は、自船から約1nm以上ではほぼ一定になるが、1nm以内での観測船舶長はシークラッタの信号処理効果の為に実船舶長に対して小さくなる。

- ②観測船舶長誤差は、パルス幅の影響を受けて変化する。

船名から船舶明細書で調べた実船舶長; L_0 (m)に対する観測船舶長; L_K (m)の回帰式は、 $0.2\mu\text{sec}$ パルス幅の場合(6)式、 $0.6\mu\text{sec}$ パルス幅の場合(7)式に示した。

$$L_K = 0.76L_0 + 42.21, \sigma = \pm 32.55 \quad (\text{m}) \quad (6)$$

$$L_K = 0.49L_0 + 102, \sigma = \pm 24.6 \quad (\text{m}) \quad (7)$$

- ③観測誤差は小型船の方が大きく、100m以上の船では小さくなるが、平均誤差は $0.2\mu\text{sec}$ パルス幅の場合は27.4m、 $0.6\mu\text{sec}$ パルス幅の場合は70.4mである。したがって、レーダパルス幅は、観測船舶長誤差を小さくする為に、 $0.2\mu\text{sec}$ を採用した。

c) ARPAで測定した船舶長と速力による操縦性能特性の推定

推定方法の妥当性は、船舶長と速力の観測値(パルス幅: $0.2\mu\text{sec}$)で推定した操縦性能特性と、船名から船舶明細書で調べた実船舶長と速力で求めた推定値を比較した。図5は横軸に実船舶長による推定値、縦軸に観測船舶長による推定値として旋回縦距離の例を示した。

また、推定値(旋回縦距; D_{AK} 、停止距離; D_{SK})の回帰式は、実船舶長による推定値(旋回縦距; D_{A0} 、停止距離; D_{S0})として、式(8)、(9)に示した。

$$D_{AK} = 0.87D_{A0} + 89.1, \sigma = \pm 109.11 \quad (\text{m}) \quad (8)$$

$$D_{SK} = 0.88D_{S0} + 229.4, \sigma = \pm 229.92 \quad (\text{m}) \quad (9)$$

観測船舶長による推定値の平均誤差は、実船舶長を用いた推定値に比較して、旋回縦距離では約66m、停止距離では約230m大きい。

推定結果は、次の通りである。

- ①ARPAレーダのパルス幅が $0.2\mu\text{sec}$ の場合、観測船舶長誤差は約30mであることを考慮すると、操縦性能特性は安全側に推定できるので、本推定法は有効である。

図4 実船舶長と観測船舶長の比較

a) 旋回縦距離の推定

b) 停止距離の推定

図5 実船舶長と観測船舶長による推定操縦性能特性の比較

②通常の避航判断要素としては、旋回操縦性能特性を重要視しているものと考えられる。また、操縦性能特性の重回帰式による推定精度は旋回縦距離の方が高い。したがって、避航領域の規格化要素としては、旋回縦距離を採用した。

3.3 避航領域の実態調査

避航領域は、実船調査の航跡データを基に解析した。

a) 調査の概要

避航領域の実船調査は、平成元年から6年度と平成11、12年に「銀河丸」(主要な諸元: $LB \cdot D = 110 \text{ m} \cdot 16 \text{ m} \cdot 10 \text{ m}$, $G_T = 4,888 \text{ t}$ 、航海速力: 17kts)で、また、平成7年から9年度に「こがね丸」($L \cdot B \cdot D = 150 \text{ m} \cdot 25 \text{ m} \cdot 13 \text{ m}$, $G_T = 9,684 \text{ t}$ 、航海速力: 23kts、

関西汽船・株)で、被験船に搭載してあるXバンドのレーダARPA (JAS-800C、JMA-8263-7CA)で実施した。

b) 避航領域の規格化要素

避航領域の解析は、衝突の危険性のある避航対象船が存在する相対ベクトル方向の避航距離(危険距離、十分距離)と、自船近傍を航過する時に他船の侵入を避ける航過距離(危険距離、十分距離)について行った。

解析では、換算船舶長; ($L = L_K$ or L_W)、接近速度; V として、避航領域は式(10)の旋回縦距離; $D_A(L, V)$ で規格化した。また、旋回縦距離; $D_A(L, V)$ と停止距離; $D_S(L, V)$ の関係は、 V が10kts~40ktsの範囲を式(12)で近似した。

$$D_A(L, V) = \exp(0.892 \cdot \ln L + 0.631 \cdot \ln V - 0.0367) \quad (\text{m}) \quad (10)$$

$$D_S(L, V) = \exp(1.253 \cdot \ln L + 0.351 \cdot \ln V + 0.0082) \quad (\text{m}) \quad (11)$$

$$H = (D_S(L, V) / D_A(L, V)) = 0.0046 \cdot L + 1.87 \quad (12)$$

更に、旋回縦距離と換算船舶長の対応関係は、自船舶長; L_O 、相手船舶長; L_T として、次の様に表記した。

① $D_{ALK}(=D_A(L_K, V))$ は換算船舶長; $L_K = \sqrt{(L_O^2 + L_T^2) / 2}$ と接近速度; V による旋回縦距離。

② $D_{ALW}(=D_A(L_W, V))$ は換算船舶長; $L_W = L_O + L_T$ と接近速度; V による旋回縦距離。

c) 避航領域の解析

1) 航行船舶の船舶長分布

航行船舶の船舶長分布は、銀河丸の航海経路(東京港から大阪港間)で測定した航跡データを基に、観測船舶長を横軸、船舶長の頻度を縦軸、鎖線: 小型船と大型船側からの累積頻度として、図6に示した。

図6 航行船舶の船舶長分布

図6から、航行船舶の累積頻度が95%以上の船舶長は、約20mから170mに分布していることが分かった。

そして、避航領域の解析では、自船近傍の避航危険領域は、小型船 ($L_T=20\text{m}$) によって、避航十分領域は大型船 ($L_T=170\text{m}$) によって形成されたものと仮定した。

そして、自船と小型の相手船による換算船舶長は、沿岸と輻輳航行海域 ($L_O=115\text{m}$) では $L_K=82\text{m}$ 、狭水道航行域 ($L_O=150\text{m}$) では $L_K=107\text{m}$ となる。また、被験船と大型船の相手船による換算船舶長は、沿岸と輻輳航行海域では $L_K=145\text{m}$ 、狭水道航行域では $L_K=160\text{m}$ となる。

2) 避航領域と換算船舶長の関係

避航危険領域と換算船舶長の関係は、輻輳海域における航行船舶の相手船舶長の分布を、20~80m、80~130m、130~170mに分けて調べた。

輻輳海域の避航危険領域（航危険距離、避航危険距離）を旋回縦距離； $D_A(L, V)$ で規格化した場合における航行船舶長分布の下限值に対する換算船舶長 (L_K, L_W) の関係を図7に示した。また、図7の横軸は船舶長分布の下限值、縦軸は避航危険距離と航過危険距離に対応する旋回縦距離 $D_A(L, V)$ の換算船舶長値 (L_K, L_W) を示している。

分析の結果は、次の通りである。

①航過危険距離は、換算船舶長 L_K と接近速度 V に

図7 避航危険領域の換算船舶長と航行船舶長の関係

よる旋回縦距離 $D_A(L_K, V)$ と相関がある。

②避航危険距離は、換算船舶長； L_W と接近速度； V による旋回縦距離； $D_A(L_W, V)$ と相関がある。

即ち、避航危険距離の換算船舶長； L_W は、旋回縦距離比 ($L_W=135\text{m} : 2.5D_A, =195\text{m} : 2.8$

$D_A, =245\text{m} : 3.0D_A$) と比例関係にあるが、航過危険距離の換算船舶長； L_K は旋回縦距離比 ($L_K=83\text{m} : 3.7D_A, =99\text{m} : 5.1D_A, =123\text{m} : 5.8D_A$) と比例関係にあることが分かった。

③航過十分距離は、換算船舶長； L_K とした接近速度旋回縦距離； $D_A(L_K, V)$ と相関がある。

④避航十分距離は、通常航行船舶中の大型船の船舶長； L_T (約170m) と自船船舶長； L_O による換算船舶長； L_K とした接近速度旋回縦距離； $D_A(L_{K170}, V)$ と相関がある。

例えば、相手船の船舶長； L_T が、20m、80m、130mの場合、接近速度に対する航過危険距離と避航危険距離は図8のようになる。

3) 航行海域と避航領域の関係

航行海域における避航領域（避航距離、航過距離）

図8 接近速度及び換算船舶長と避航危険領域の関係

は、旋回縦距離 ($D_{ALK}, D_{ALK170}, D_{ALW}$) で規格化した。

(1) 航過危険距離

輻輳航行海域における航過危険距離の分布領域（航跡数頻度分布が5%以上）を図9に示した。

なお、図9のX軸は接近速度、Y軸は相対距離、鎖線は換算船舶長； L_K による接近速度に対する旋回縦距離； D_{ALK} を示す。

航過危険距離は、狭水道航行海域では約 $1.4D_{ALK}$ 、

図9 輻輳航行海域における航過危険距離

幅航行海域では約 $2.2D_{ALK}$ 、沿岸航行海域では約 $3.6D_{ALK}$ に相当する。

したがって、幅航行海域を基準にとると、沿岸航行海域では約1.6倍余裕を大きく取っているが、狭水道航行海域においては約40%余裕が無い状態で航行していることが分かった。

(2) 避航危険距離

幅航行海域における避航対象船による避航距離（避航危険距離：近地点の分布、避航十分距離：遠地点の分布）を図10に示した。

避航危険距離（図10の近地点分布）は、小型の相手船との換算船舶長； L_w と接近速度； V による旋

図10 幅航行海域における避航距離

回縦距； D_{ALW} で規格化した。

分析の結果は、次の通りである。

①幅航行海域の避航危険距離は、航過危険距離に対して約1.6倍大きい。また、横切り船の避航距離は反航船や同航船に比較して、約20%大きくなっている。

②避航危険距離は、狭水道航行域では $1.5D_{ALW}$ 、幅航行域では $2.5D_{ALW}$ 、沿岸航行域では約 $4.0D_{ALW}$ である。

(3) 避航十分距離

避航十分距離（図10の遠地点分布）は、大型の相手船との見合いを想定して、自船と大型船との換算船舶長と接近速度による旋回縦距離； D_{ALK170} で規格化した。

航行海域の避航十分距離は、狭水道航行域では約 $13.1D_{ALK170}$ 、幅航行海域では約 $15.2D_{ALK170}$ 、沿岸航行域では約 $17.7D_{ALK170}$ である。

(4) 航過十分距離

幅航行海域における正横方向の航過十分距離（鎖線の遠地点）の航跡数頻度分布を図11に示した。図11から、航跡数頻度分布が高くなる避航領域は、接近速度が10kts以下の船で、他船の侵入を避ける傾向が認められた。

図11 幅航行海域における正横方向の航過距離分布

表1 航行海域における避航領域と操縦性能特性の関係

避航領域	沿岸航行海域	幅航行海域	狭水道航行海域
航過危険距離： $C_{LA}D_{ALK}$	$3.6D_{ALK}$	$2.2D_{ALK}$	$1.4D_{ALK}$
$:C_{LS}D_{SLK}$	$1.6D_{SLK}$	$1.0D_{SLK}$	$0.6D_{SLK}$
航過十分距離： $C_{MA}D_{ALK}$	$5.8D_{ALK}$	$4.0D_{ALK}$	$3.1D_{ALK}$
$:C_{MS}D_{SLK}$	$2.3D_{SLK}$	$1.6D_{SLK}$	$1.2D_{SLK}$
避航危険距離： $C_{DA}D_{ALW}$	$4.0D_{ALW}$	$2.5D_{ALW}$	$1.5D_{ALW}$
$:C_{DS}D_{SLW}$	$1.6D_{SLW}$	$1.0D_{SLW}$	$0.6D_{SLW}$
避航十分距離： $C_{NA}D_{ALK170}$	$17.7D_{ALK170}$	$15.2D_{ALK170}$	$13.1D_{ALK170}$
$:C_{NS}D_{SLK170}$	$7.0D_{SLK170}$	$6.0D_{SLK170}$	$5.0D_{SLK170}$
K_{WA}	$C_{NA}D_{ALK170}/C_{MA}D_{ALK}-1$		
K_{WS}	$C_{NS}D_{SLK170}/C_{MS}D_{SLK}-1$		
K_{LA}	$C_{DA}D_{ALW}/C_{LA}D_{ALK}-1$		
K_{LS}	$C_{DS}D_{SLW}/C_{LS}D_{SLK}-1$		

（上段：旋回縦距離で規格化、下段：停止距離で規格化）

航行海域の航過十分距離は、狭水道航行域では約 $3.1D_{ALK}$ 、幅航行海域では約 $4.0D_{ALK}$ 、沿岸航行域では約 $5.8D_{ALK}$ である。

4) 解析の結果

避航領域と操縦性能特性の関係は、旋回縦距離（ D_{ALK} 、 D_{ALK170} 、 D_{ALW} ）で規格化して、また、停止距離との関係も併記して表1に示した。

避航領域の大きさは、次の通りである。

①避航領域要素の換算船舶長は、避航危険距離では L_w 、航過危険距離と航過十分距離では L_K 、避航十分距離では L_{K170} と相関がある。

②例えば、幅航行海域における避航領域は、旋回縦距で規格化すると（避航危険距離；約 $2.5D_{ALW}$ 、避航十分距離；約 $15.2D_{ALK170}$ 、航過危険距離；約 $2.2D_{ALK}$ 、航過十分距離；約 $4.0D_{ALK}$ ）、停止距離で規格化すると（避航危険距離；約 $1.6D_{SLW}$ 、避航十分距離；約 $6.0D_{SLK170}$ 、航過危険距離；約 $1.0D_{SLK}$ 、航過十分距離；約 $1.6D_{SLK}$ ）である。

3.4 航行環境評価指標のシミュレーション

a) 避航領域の形状

相対座標上の避航領域（避航危険領域と避航十分領域）は、他船が直進して、自船が衝突針路を中心左右に避航変針した場合をシミュレーションし

図12 相対座標上の避航領域

図13 絶対座標上の横切り船による避航危険領域

て、図12に示した。

b) 絶対座標上の避航危険領域

絶対座標上の避航危険領域は、自船が衝突針路に対して、左右に30度の範囲で避航変針した場合をシミュレーションして、右側に自船衝突針路近傍の避航危険領域 D_L 、左側に自船の針路上の衝突危険度として、図13に示した。

図13からは、自船の現在針路は避航危険領域上にある、左図の衝突危険度指数からは約4.5km航行すると針路上の潜在的衝突危険度が高くなることが分かる。

なお、図13の被験船は ($L_o=115\text{m}$, $V_o=13\text{kts}$)、相手船は ($L_r=100\text{m}$, $V_r=13\text{kts}$) である。

3.5 航行環境評価指標の適用

航行環境評価指標は、衝突予防援助装置の潜在的危険海域情報と警報発生対象船の検出指標として使

写真1 狭水道航行海域における潜在衝突危険領域の表示例

用した。

a) 潜在的衝突危険領域情報の表示方式

操船者に提供する避航操船の判断支援情報は、避航領域の潜在的衝突危険度の等高線を画像表示して活用した。

例えば、輻輳海域において横切り船と同航船の見合い状態についての避航領域を写真1に示した。

潜在的衝突危険海域の情報からは、見合い状態によって、避航領域の形状が異なり、横切り船では反航船に比較して避航領域を大きく取る必要があることが分かった。

したがって、操船者が余裕を大きく取って安全に航行するためには、ARPA画面上の衝突危険領域の外側に針路を採って航行する必要がある。

なお、写真1の右側上段の図は針路上の危険度の変化、中段は避航領域の避航方位角度、下段は避航変針に伴う最接近距離の変化を示している。

b) 警報対象領域の比較

警報対象船の発生頻度と、最接近距離 (DCPA) と最接近時間 (TCPA) の評価範囲は、東京港から大阪港の航海時に収集したARPAデータを基に、改良型 (避航領域の評価指標) と従来方式 (DCPAとTCPAの評価指標) で比較検討した。

航行海域と見合い状態に対する警報対象船舶の最接近距離 (DCPA)、最接近時間 (TCPA) の評価範囲を図14に示した。また、警報対象船は、改良型では表1のパラメータで、従来型では狭水道域と輻輳域ではDCPA; 0.5nm、TCPA; 10min、沿岸域ではDCPA; 1nm、TCPA; 15minで設定した。

なお、図14の横軸は見合い関係、●; 従来ARPA、○; 換算船舶長100m以下、◇; 換算船舶長100m以上の船として航行海域別に示す。

最接近距離と最接近時間の評価範囲は、次の通りである。

①改良型では、航行環境評価要素に船舶長、速力、

1) 最接近距離

2) 最接近時間

図14 警報対象領域の比較

接近速度、停止距離等を取り入れている為、警報対象船のDCPA、TCPAの範囲は航行状態(船の大きさ・速度・見合い状態)によって変化するが、従来型では一定である。即ち、改良型の場合、警報対象船の最接近距離は狭水道域に対して、沿岸域の方が大きく、また、船舶長が大きいほど大きい。

- ②改良型ARPAの警報対象船隻数は、狭水道域では81%、幅狭域では91%、沿岸域では71%に減少する。即ち、DCPA・TCPAは見合い状態や船舶長及び速度によって変化して、警報頻度の低減効果が認められるので有効である。

4. まとめ

衝突予防援助装置の航行環境評価指標に船舶の操縦性能特性を取り入れる為、航行環境評価指標の算出に必要な船舶の旋回性能特性は、ARPAレーダで測定した相手船の船舶長と速力で推定して、避航領域は接近速度と旋回性能で算出した。そして、ARPAの操船支援機能の向上を図る為、改良型ARPAの実証機を開発して、航行環境評価指標は音声警報と潜在的危険海域表示情報を提供するために適用した。

考察の結果は、次の通りである。

- ①0.2μsecパルスのARPAレーダで測定した誤差は、約30mである。

- ②船舶の旋回性能は、ARPAレーダで測定した船舶長と速力で推定できる。
- ③避航危険距離の換算船舶長は L_w と、航過距離の換算船舶長は L_k と相関関係がある。
- ④航行環境評価指標は、衝突予防援助装置の衝突危険海域表示情報、及び、警報発生指標として適用できる。

謝 辞

本研究の実船調査にご協力頂いた航海訓練所研究第二課長他、「銀河丸」乗組員ならびに関西汽船株式会社「こがね丸」乗組員、日本無線株式会社・技術第二部船舶レーダ課の関係者各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 有村他：船舶交通流におけるマン・マシン・システムの一考察，船舶技術研究所報告，Vol. 25-3，昭和63年。
- (2) 有村他：航行環境情報の表示方式に関する研究，船舶技術研究所報告，Vol. 29-3，平成4年。
- (3) 有村他：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，第97号，平成9年。
- (4) 有村他：航行環境評価指標の一考察，船研講演会，第72号，平成10年。
- (5) 有村他：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，第88号，平成5年。

質 疑 応 答

今津隼馬(東京商船大学)：相手船のサイズと性能を考慮することで幅狭海域での改善を図っていると推察しますが、これは一方で性能の良い船と悪い船の場合に危険が増す可能性は無いでしょうか？。

有村信夫：旋回性能特性を推定する重回帰式は、一般船舶の性能特性の平均値を近似している為、ジェットフォイル等の旋回性能の良い船舶に対しては避航領域の余裕を大きく取り、性能特性の悪い船舶に対しては避航領域の余裕を小さく取ることになり問題があります。したがって、将来的には自動船舶識別システム(AIS)を利用して、相手船の正確な性能特性の情報を入手する必要があります。