

# 衝突予防支援装置の開発に関する研究

有村信夫\*、勝原光治郎\*、三友信夫\*、室原陽二\*

## Study on the Development of ARPA

by

Nobuo ARIMURA, Mitujiro KATUHARA, Nobuo MITOMO, Youji MUROHARA

### Abstract

This paper examined display format of marine navigation environmental information of ARPA. The study deals with next 4 topics:

- (1) The statistical 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.
- (4) The effect of display information and voice alarm of the latent and dangerous sea area for supporting of navigation.

Results are as follows:

- (1) The stopping performance 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 modeled by stopping performance and approach speed.
- (3) The collision prevention support effect is improved by displaying latent collision risk sea area on the ARPA screen and voice alarm.

---

\*システム技術部

原稿受付 平成12年1月31日

審査済 平成12年7月12日

## 目 次

1. はじめに
  2. 航行安全確保に関する課題
    - 2.1 衝突事故の発生原因
    - 2.2 操船者の心理的負担
    - 2.3 在来ARPAの問題点
      - 2.3.1 操船者から観た課題と対応
      - 2.3.2 ARPA警報の課題
    - 2.4 在来ARPAの改善対策
  3. 新型ARPA
    - 3.1 新型ARPAシステムの構成
      - 3.1.1 衝突危険海域情報
      - 3.1.2 音声警報情報
      - 3.1.3 音声によるARPA情報の入出力
    - 3.2 航行環境評価指標
      - 3.2.1 航行環境評価指標モデル
      - 3.2.2 航行環境評価要素の解析方法
      - 3.2.3 船舶の操縦性能試験特性
      - 3.2.4 ARPAを用いた船舶長の観測精度
      - 3.2.5 ARPAによる操縦性能特性の推定
      - 3.2.6 避航領域の実態調査
      - 3.2.7 避航領域のシミュレーション
      - 3.2.8 航行環境評価指標の適用
    - 3.3 実証機ARPAの開発
  4. 新型ARPA機能の評価
    - 4.1 実験方法
      - 4.1.1 表示情報の支援効果に関する実験
      - 4.1.2 警報情報の支援効果に関する実験
      - 4.1.3 音声情報入力方式による音声認識率の実験
    - 4.2 実験結果
      - 4.2.1 表示情報の判読に伴う作業負担の軽減効果
      - 4.2.2 衝突事故の予防と避航操船への支援効果
      - 4.2.3 警報情報の支援効果
      - 4.2.4 ARPA情報入手時の音声認識率
    - 4.3 まとめ
  5. あとがき
- 謝辞  
参考文献  
付録 船舶の諸元及び操縦性能特性

## 1. はじめに

現在の船舶用自動衝突予防援助装置（ARPA：Automatic Radar Plotting Aids）では、警報発生の評価要素に最接近時間と最接近距離を取り扱っている為、警報の発生領域は船の大きさや見会い状態に関係なく一定になる。そして、輻輳海域を航行する内航船舶では警報の発生頻度が高くなる為、危険目標船舶に

対するブザー警報の発生を止めて航行することが多く在り、衝突事故の発生が懸念されている。

将来的には、トランスポンダを利用した自動船舶識別システム（AIS；Automatic Identification System）<sup>1)</sup>の搭載が実施される予定であるために、AIS搭載船については相手船の操船意志や航路計画、諸元及び操縦性能特性等の航行情報を得ることは可能になるが、AIS装備がSOLAS条約等で義務付けられるとしても、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に対しての情報を補完する手法が必要である。

したがって、衝突予防支援技術の高度化を図るには、それぞれの船舶がARPAで相手船の諸元及び操縦性能特性を推定して、航行の危険性を判断する「航行環境評価指標」を確立すると共に、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と避航動作の最適化が図られる様に支援情報を提供することが重要な課題となる。

本報告は、「航行支援技術の高度化」（図-1の実線）に関わる新しい衝突予防援助方式（「新型ARPA」と言う）の実用機開発について研究を実施したものである。

即ち、衝突予防援助装置の危険判断要素に相手船の諸元と操縦性能特性を採り入れて、航行の危険性を判断する航行環境評価機能を向上すると共に、操船者とARPA間の情報伝達手段に音声と画像情報を用いて、マン・マシン・インタフェースの機能向上を図った。

なお、図-1の点線の部分は将来構想である。

この新型ARPAでは、従来のARPA機能に加えて、自船のARPAで相手船の船舶長を測定して、航行の危険性は船舶の諸元と操縦性能特性で評価して、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を、分かり易い合成音声によって操船者に知らせたり、また、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がある避航領域（「潜在的衝突危険海域」と言

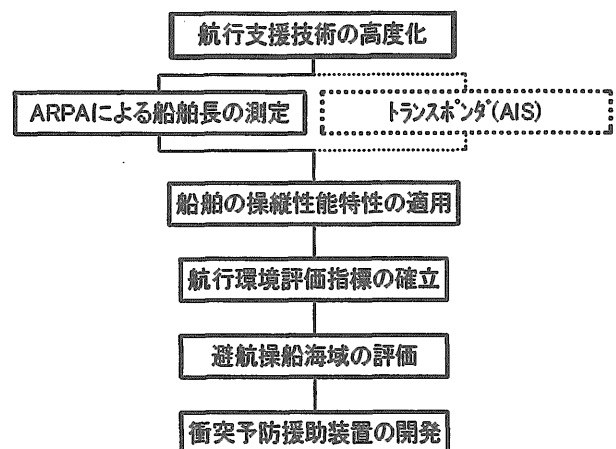


図-1 運航の安全確保に関する課題

う)の情報を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る機能を持たせた。

本研究では、始めに、衝突事故の発生原因と操船環境に関わる問題点の調査を実施した。

次に、ARPAの航行環境評価指標を提案する際に重要なパラメータ要素となる、(1)船舶の操縦性能試験特性の解析、(2)ARPAを用いて測定した相手船舶船長の観測精度調査、(3)ARPAで測定した相手船舶船長による操縦性能特性の推定、(4)実船観測データを基にした避航領域の調査と航行環境評価指標のモデル化及び潜在的衝突危険領域の表示方式の4項目について検討して、新型ARPAの実証機を開発した。

最後に、航行環境の潜在的衝突危険海域情報表示方式と音声警報指示方式の衝突予防支援効果について評価して有効性を検証することができたことを報告する。

なお、本研究は、航海訓練所、日本無線株式会社との共同研究で実施した。

## 2. 航行安全確保に関する課題

在来ARPAの改善対策を示す為、衝突事故の発生原因と操船現場における航行安全に関わる問題点を調査した。

### 2.1 衝突事故の発生原因

衝突事故発生時における相手船の視認状況を把握する為、衝突事故発生時における相手船情報の視認状況データ(海難審判の現状<sup>2)</sup>、昭和60年から平成元年までの海難審判採決録を基に鍋島氏が解析した資料<sup>3)</sup>)を用いて検討した。

衝突事故発生時における相手船の視認状況は、次の通りである。

- ①全衝突事故船(2,314隻)の中で、相手船を視認していた船(55%)
- ②相手船を視認した後、避航したが衝突した船(13%)
- ③相手船を視認した後、安全な船と判断して、一度注意を逸らし、相手船に接近してから衝突の危険を認識して避航したが衝突した船(42%)
- ④相手船を視認していないで衝突した船(45%)

即ち、衝突事故船の多くは、レーダを搭載しているが、操船者は他船の見張りやその他の作業に気を取られて、相手船を視認していないで衝突したことが多い。また、視認していても避航操船の判断に錯誤が生じたり、相手船に接近し過ぎてから衝突の危険性を認識して避航を開始した為、衝突に至っていることが多い。

したがって、これらの衝突事故を防止するためには、避航操船に関わる警報と見張り情報、及び、潜在的衝

突危険海域(避航領域)情報を操船者に早期に確実に伝達する必要があることが分かった。

### 2.2 操船者の心理的負担

内航船では、運航要員の少人数化が進み、操船者の作業負担の増加が懸念されている。

ここでは、操船者の心理的負担が大きな作業項目に対して支援情報を提供して、作業負担の軽減を図る為、避航操船時の操船者の心拍数を青雲丸(航海訓練所・練習船)の航海経路を利用して、実船で調査<sup>4)</sup>して、操船者にとって必要な支援情報項目について検討した。

なお、被験者の経歴概要は、年齢46才、海上実歴16年5ヶ月、船長実歴1年3ヶ月である。

調査結果は、次の通りである。

#### a) 操船作業と心拍数の関係

操船作業と心拍数の関係は、各作業項目に対応した心拍数のピーク値の変動範囲を棒グラフで図-2.1に示した。

操船者の心拍数は、避航判断時に上昇することが分かった。

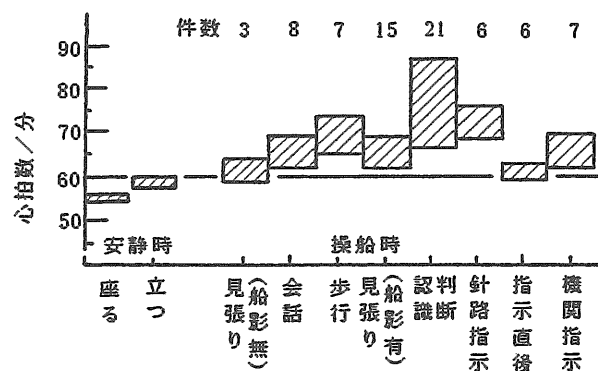


図-2.1 操船作業と心拍数の変化

#### b) 避航操船時の操船者の心拍数

友が島水道において、横切り状態の他船(500t)に対する避航操船時の航跡図を図-2.2.a)に、操船者の心拍数の時刻歴を図-2.2.b)に示した。なお、図-2.2.a)の自船は黒丸で、相手船は白丸で示している。

図-2.2から、視界が良い通常航行の操船作業において心拍数の上昇が特に大きいのは、避航操船の判断時であり、平常値に対して平均26%、最大で45%上昇した。また、避航針路変更の指示後は、心拍数が一時的に平常値に低下することが分かった。

例えば、図-2.2.b)からは、相手船の接近に伴い、衝突の危険状態を回避する避航の判断時(14:06分)に操船者の心拍数が約30%上昇しており、避航処置の指示を操舵士に対して行えば、心拍数は平常値に低下する。更に、避航後の安全確認時には再度13%程度の上昇が認められる。

一方、この時の操船者（船長）の内省報告では、「他船が右前方に認められた時から左へ航過するまで平常状態を上回る緊張が持続していた。」と述べており、この時の精神的負担は心拍数の上昇と一致している。

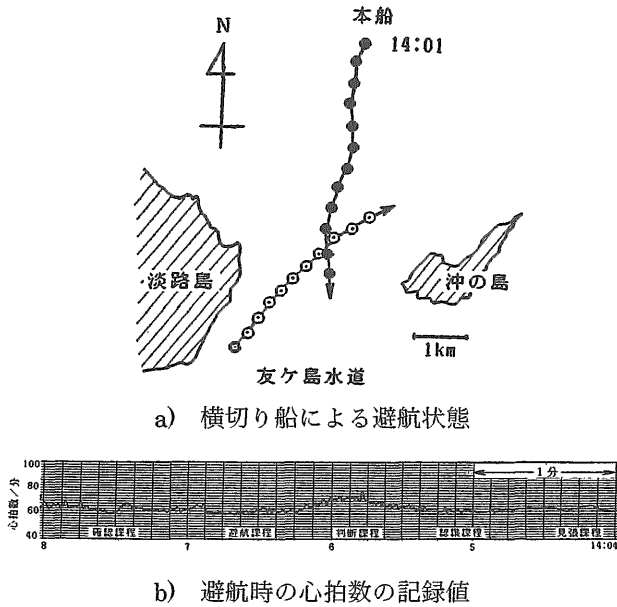


図-2.2 避航操船時の航跡と心拍数の変化

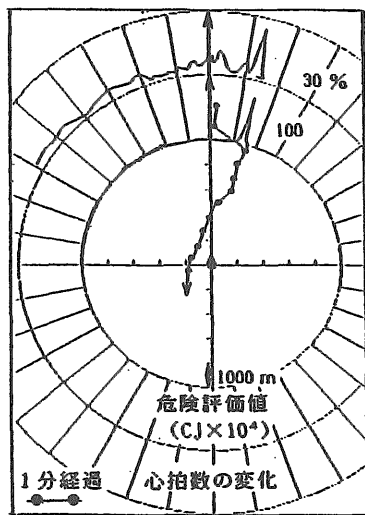


図-2.3 避航操船時の危険評価値と心拍数の関係

c) 心拍数の変化と危険評価値の関係

図-2.2の航行時における心拍数(外側)の変化と危険評価値(CJ値<sup>9)</sup>:内側)の関係を図-2.3に示した。避航操船判断時における操船者の心拍数変化と危険評価値(CJ値)との関係は、図-2.3の相対航跡から得た危険評価値と心拍数の対応例の如く強い相関が認められ、危険評価値の大きい避航操船の判断時に、操船者は緊張して心理的負担が大きくなることが分かった。

d) 濃霧航行時の操船者の心拍数

漁船が多数操漁する友ヶ島水道で、濃霧航行時の操船者の心拍数(単位:心拍数/分=bpm)を図-2.4に示した。

操船者の心拍数は、視界が良い平常時には約62から65、通常の見張り航行時には約70から80であるが、視界が悪い霧中航行時には平均値で約100、霧中の避航操船判断時には最大140まで上昇して、狭視界航行時における操船者の心理的負担は、避航操船の判断時に特に大きくなっている。

したがって、操船者への支援情報は、心理的負担が大きい避航操船判断時に、提供することが有効であるものと考えた。

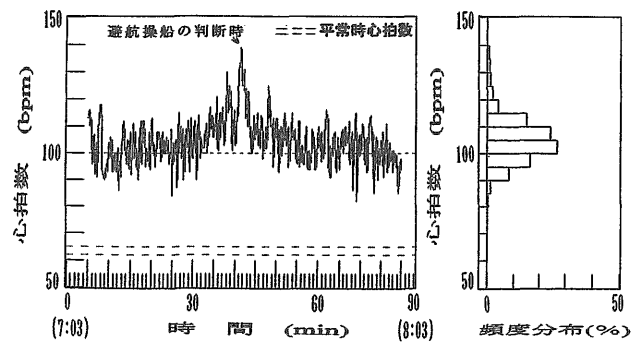


図-2.4 濃霧航行中における操船者の心拍数

2.3 在来ARPAの問題点

在来ARPAの問題点を改善して機能向上を図る為、操船者に対するアンケート調査と、実船調査を実施して検討した。

2.3.1 操船者から観た課題と対応

a) 操船者から観た課題

操船現場におけるARPAに関する問題を調べる為、運航に携わる操船者(日本船長協会、日本内航海運組合総連合会及び全国内航タンカー海運組合)に対して、アンケート調査(発送部数:110部、回収部数:78部、回収率:70%)を実施<sup>9)</sup>した。

調査の結果は、図-2.5に示した。

主要要望課題は、次の通りである。

- ①危険船の認識と衝突危険海域情報の分かり易い情報表示機能の改善(16%)
- ②警報の発生頻度が高く、無駄な警報が多いので、衝突の恐れがある船舶に関する警報を確実に伝達する警報機能の改善(14%)
- ③狭水域、狭視界域航行時における避航操船判断支援機能の向上とシミュレーション機能の改善(6%)
- ④小型船・漁船等の識別の改善、他物標への乗り移

- り現象の改善、海面反射波除去性能の向上等レーダの探知能力の改善 (27%)
- ⑤FRP船・小型船等に対するレーダレフレクタの設置義務化 (17%)
- ⑥ARPAのキーボード配置と操作の簡素化及びボタン配置の統一 (20%)

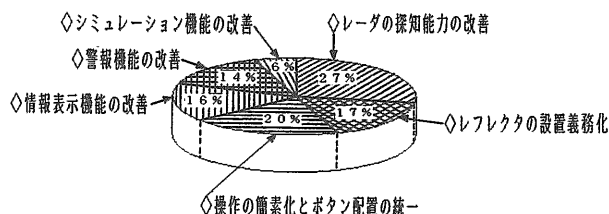


図-2.5 操船者から見たARPAの課題

b) 要望課題に対する対応

これらの調査課題に対しては、次の様に対応した。

(1) ソフト的要望課題 (①、②、③)

本稿で示す様に新型ARPAを提案して対応した。

(2) ハード的要望課題 (④、⑤)

FRP船や小型船等に対するレーダレフレクタの設置義務化を内航船の近代化委員会研究報告書<sup>7)</sup>で、また、レーダの探知能力の性能向上に関してはARPAレーダメーカーに対して性能向上を提案した。

その後、運輸省の小型船検査機構は、平成6年にFRP船や小型船に対して、レーダレフレクタの設置義務化を図った。また、レーダメーカーではレーダの捕捉性能向上を図っているが、まだ、問題が残っていることが分かった。

(3) ハード的要望課題 (⑥)

ARPAレーダメーカー5社に対して、ARPA操作卓上のキー数と配置について調査を行った。

調査の結果、操作卓のキー数は、例えば、20インチARPAでは24から43個、28インチARPAでは最大68個あって、ARPAの操作性やキーボードの配置がメーカーや機種によって異なる問題があり、操作が煩雑であることが分かった。

したがって、キーボードの配置は、ARPAレーダの「基本操作機能」と、「ARPA機能」、「航行援助機能」に大別すると共に、「航海時に常時使用する操作キー」、「時々使用する操作キー」、「設定時等に使用するが航海中にはあまり使用しない操作キー」に分類して配置する方式をレーダメーカーに提案した。

その後、平成9年度に開催されたSEA-JAPANに展示されたARPAを調査した結果、ARPAレーダの操作キーはグループ化されて、操作卓上に配置されている操作キーの数が少なくなっていることが分かった。

例えば、28インチARPAの場合、操作卓には航海時に「常時使用する19個の操作キー」を6グループに分

けて、「時々しか使用しない操作キー」は蓋を被せて配置して、更に、「使用頻度の低い操作キー」はメニュー画面にすることによって操作機能の簡素化が図られていた。

2.3.2 ARPA警報の課題

在来型ARPAでは、5種類の警報検出機能を具備して、警報の発生はCRT上のシンボル、パネル上のランプ、ブザーを併用して行っている。

本研究では、ARPA警報の発生状況と活用状況を銀河丸の航海時に調査<sup>8)</sup>した。

調査の結果、次の問題があることが分かった。

① 輻輳海域や狭視界域で生じた複数の見合い状態をベクトル情報から瞬時に判断することが困難な場合もある。

② 輻輳海域や狭視界域を航行中の操船者は、操船支援情報の表示機から離れた場所で目視による見張り情報の収集や、他の作業を行うことが多い為、近傍に居ない操船者には重要な警報情報が確実に伝達しない問題がある。

③ 操船者は、輻輳海域や狭視界域において目視観測を継続しながら同時に、相手船の航行状況等の情報を連続して入手できるシステムを必要としている。

④ ARPA警報の中では、ロスト目標警報（捕捉追尾目標の捕捉状態が追尾不能になることを以下、「ロスト警報」と言う。）の発生頻度が高いが。しかし、潜在的衝突危険船に関するロスト警報は少ないと言う特殊性もある為、あまり有効に活用されていない状況にある。例えば、狭水域航行時において調査を行った結果、ロスト警報の対象となった船舶の内、潜在的衝突危険目標に関するロスト警報は約6%で、残りの94%は不要な警報である為、警報全体に対する信頼性を落とす原因になっている。

2.4 在来ARPAの改善対策

操船者の情報処理能力には限界があるから、衝突事故を予防するためには、危険な相手船の視認や衝突の危険性の認識に関する情報をARPAで評価して、文字や画像情報と音声を用いて航行環境情報の提供を行い、見張り情報の入手と情報処理を支援して、時間的・距離的に十分余裕がある時点で避航回避を促すべきである。

したがって、在来ARPAの改善点を次の様に考えた。

(1) 航行環境評価指標

航行環境評価指標要素には、実船調査で得られた避航領域と船舶の操縦性能特性を取り入れて、航行の危険性を評価する。

(2) 警報システム

見張りを継続する必要がある危険目標船舶に関する警報情報は、危険目標の所在位置と見会い状態を合成音声で確実に伝達して、注意を喚起する。

(3) 危険海域情報表示方式

避航領域に関わる衝突危険海域の情報は、操船者が見会い状態と避航領域を主観的に把握できる様にCRT上に映像化する。

(4) ARPA情報の入手方式

見張りを継続している操船者が入手したい各種の情報は、音声認識用コマンドやコマンドキーで入力して、危険船舶の有無や特に危険な船舶の情報を音声警報で提供できるものにする。

3. 新型ARPA

3.1 新型ARPAシステムの構成

操船者にARPA情報を迅速、かつ確実に伝達して、避航操船の判断を支援する新型ARPAシステムの構成を図-3.1に示した<sup>9)</sup>。

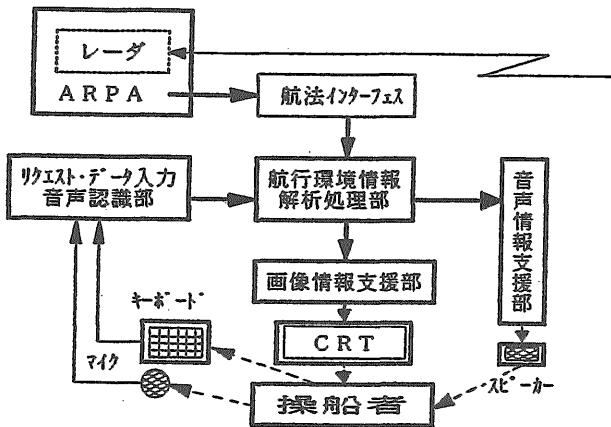


図-3.1 新型ARPAのシステム構成

新型ARPAシステムは、従来のARPA機能に航行環境評価機能を加えて、衝突の危険性のある船舶の接近や見張りに必要な情報を合成音声警報によって操船者に知らせたり、衝突を避けるために必要な潜在的衝突危険領域の情報をレーダ画面上に表示して、操船者の情報処理負担の軽減と情報伝達の効率化を図った。

システム各部の概要は、次の通りである。

(1) ARPAデータ入力部

航法インタフェースを介して、ARPAデータを入力して、捕捉目標の船舶長を測定する。

(2) 航行環境情報解析処理部

自船と他船の位置関係や見会い状態から航行環境評価指標で航行の危険性を評価して、危険目標船、又は、ロスト目標を検定した上で、警報対象船を判定する。

更に、警報指示対象船に対しては、旋回動作に伴う航過距離、衝突位置、潜在危険海域危険度、見会い状態等の解析を行う。警報指示部のアルゴリズムを図-3.2に示した。

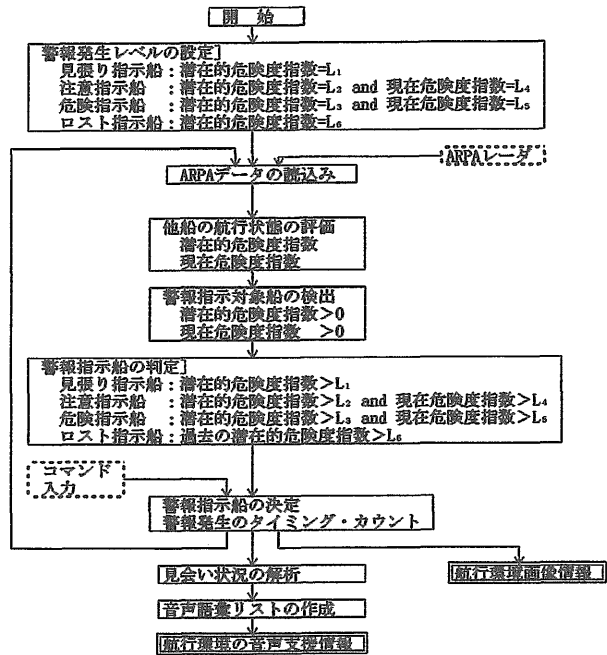


図-3.2 警報指示部のアルゴリズム

(3) 画像情報支援部

音声情報と平行して、潜在的危険海域（閉塞度指数又は危険度指数の等高線図）、船首危険度、旋回危険度と警報対象船のシンボル、数値、文字、図表情報をCRT上に表示する。

(4) 音声・キー入力情報認識部

操船者が特定船舶についての情報を連続的に入手したい場合や、危険な船舶の有無を知りたい場合に限定して、リクエスト船に関する入手したい情報の種類を音声認識用マンド、又はコマンドキーで選択して、応答情報は合成音声で提供する。

なお、音声認識用コマンド入力の場合は、使用する人があらかじめ自分の声でコマンドを登録して、初期設定を行い使用する。

(5) 音声情報支援部

音声情報の内容の語彙リストを警報の種類、他船の位置関係、見会い関係等のデータを基に、計算機上に構成した語彙分類アルゴリズムで編集する。また、合成音声による情報は、語彙リストと音声単語辞書の索引から音声単語データを取り出して音声で出力する。

3.1.1 衝突危険海域情報

新型ARPAでは、ARPAで観測した相手船の船舶長

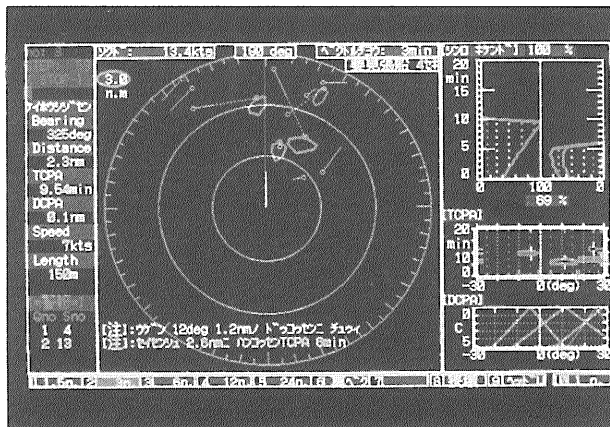
と速度データを基に、自船と相手船の接近速度に対する操縦性能特性を推定して、航行海域近傍の潜在的衝突危険度を評価した。

そして、危険船舶に対する警報は、合成音声で航行状態を指示すると共に、潜在的衝突危険度の等高線領域（潜在的衝突危険海域）情報と衝突地点までの危険度の時間的変化、及び、変針動作に伴う危険の予測値をARPA画面に、写真-3.1の様に表示した。

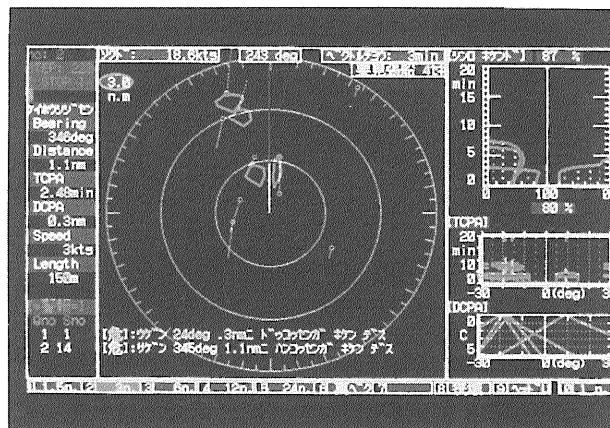
表示画面の内容は、次の通りである。

#### (1) 衝突危険海域情報

写真-3.1.a)の画面中央は横切り船、停止船、反航船、また、写真-3.1.b)は反航船と同航船による潜在的衝突危険度の等高線海域を赤色で示している。



a) 横切り船・反航船・停止船



b) 反航船・同航船

写真-3.1 新型ARPAの表示例

#### (2) 針路情報

画面右側は、

上段：縦軸に最接近時間、横軸に潜在的衝突危険度として、針路上の危険度の時間的変化を示す。

中段：縦軸に最接近時間、横軸に変針角度として、衝突危険海域の避航方位を示す。

下段：縦軸に最接近距離、横軸に変針角度として、変針動作に伴う最接近距離の予測値を示す。

#### (3) 警報文字情報

画面中央下段の文字情報は、合成音声警報の文字情報を示す。

したがって、操船者は針路上の潜在的衝突危険度が大きくならない時期に、この画像情報の潜在的危険領域を避ける様に針路を採れば安全に航行できる。

#### 3.1.2 音声警報情報

合成音声を用いた見張りと警報情報の提供において、曖昧な情報の伝達と判断錯誤は、重大な衝突事故につながる可能性があるため避けなければならない。

したがって、音声用語は、「聞き取り易い・情報が確実に伝達する・情報が一部欠落しても情報の内容が容易に判断できる」ことが重要である。

見張り警報において、他船の見合い関係は、海上衝突予防法に基づいてモデル化した。

例えば、音声警報では、注意喚起音に続けて、目標船舶の航行状態を次の様に指示する。

「右舷 30度 4マイル ニ 横切り ノ 接近船 有り」

「右舷 30度 3マイル ノ 横切り ニ 注意 TCPA 4分」

「ロストターゲット発生 右舷 25度 2マイル ノ 横切り船」

#### 3.1.3 音声によるARPA情報の入出力

見張りを継続している操船者が入手したい各種の情報は、音声認識用コマンドやコマンドキーで入力して、危険船舶の有無や特に危険な船舶の情報を音声警報で提供する。

例えば、操船者の音声認識用コマンド、又はコマンドキーによる問いかけに対してARPAは、次に示す様に合成音声で応答して情報提供する。

危険船舶は？ -> 危険船舶は 2隻 有ります。

1番船は？ -> 右舷 20度 3マイル ノ 横切り船、TCPA 3分、DCPA 0.1マイル

方位は？ -> 方位 22度

#### 3.2 航行環境評価指標

操船者は、航行の安全性を判断するために、レーダや目視観測等で相手船の大きさや速力等を推測して、長年の実務経験から相手船の諸元及び性能特性を推定し、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。

新型ARPAでは、この様な操船者の判断プロセスに基づいた航行環境評価モデルの下に、警報レベルや避航操船領域の決定に必要な判断要素データを得る為、ARPAで相手船の船舶長と速力を測定して旋回性能特性を算出し、それに基づいて、航行の衝突危険度を評

値する避航領域を決定した。

### 3.2.1 航行環境評価指標モデル

#### a) 避航領域の概念図

避航領域の相対座標上概念図を図-3.3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において自船と相手船がすれ違う時の離間距離（「航過距離」と言う）の余裕が重要である。

したがって、避航領域は、避航対象船が存在する相対ベクトル方向の避航距離分布と最接近点を航過する船が侵入を避ける航過距離分布について解析して、避航危険領域距離と避航十分領域距離をモデル化した。

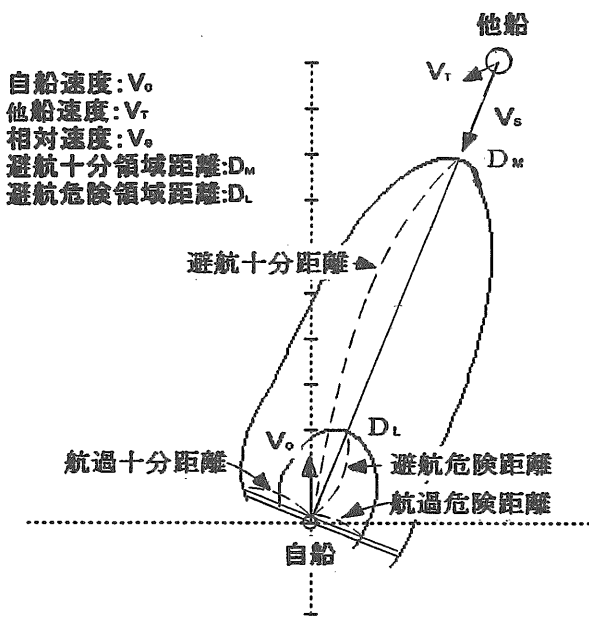


図-3.3 相対避航領域の概念図

#### b) 用語の定義

避航領域の解析に関わる用語は、次に定義した。

- ①避航危険距離：避航対象船が侵入しない避航距離。
- ②避航十分距離：ARPAで避航対象船を捕捉追尾し始める十分余裕のある避航距離。
- ③航過危険距離：航過時において自船近傍で他船が侵入しない航過距離。
- 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。
- ⑤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。また、相対ベクトル方向の潜在的衝突危険船による避航距離は「避航危険距離と避航十分距離」、相対ベクトルに対して横方向の最接近点航過時の離間距離に関わる航過距離は「航過危険距離、航過十分距離」とした。

- ⑥避航対象船は、相手船の相対ベクトルが被験船に向かっていて、相対ベクトルと相手船の相対方位との仰角が±10度以内であって、最接近距離(DCPA: Distance of CPA, CPA; Closest point of Approach)が0.2nm以下の航行状態にある船とした。

#### c) 避航領域指標

航跡データの解析の結果、避航領域は、接近速度及び操縦性能特性と相関があることが分かったので、接近速度と旋回性能特性で数式化した。

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;  $D_L$ と避航十分領域距離;  $D_M$ )は、旋回縦距離;  $D_A(L_K, V_S)$ 、相手船の相対方位;  $\Phi_B$ 、相手船の相対方位と相対ベクトル方位の仰角;  $\Phi_{BS}$ として、式(3.1, 3.2)で定義した。

$$D_L = C_{LA} \cdot D_A(L_K, V_S) \cdot [1 + \alpha \cdot |\sin(\Phi_T)|] \cdot [1 + k_{LA} \cdot (\cos(\Phi_{BS}))^n] \quad (3.1)$$

$$D_M = C_{MA} \cdot D_A(L_K, V_S) \cdot [1 + k_{MA} \cdot (\cos(\Phi_{BS}))^n] \quad (3.2)$$

避航領域のパラメータは、

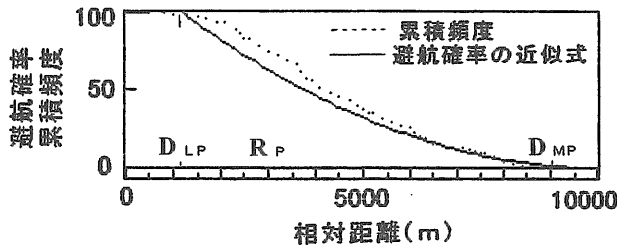
- $D_A(L_K, V_S)$ ; 換算船舶長 $L_K$ と接近速度 $V$ による旋回縦距離
- $D_A(L_W, V_S)$ ; 換算船舶長 $L_W$ と接近速度 $V$ による旋回縦距離
- $L_0$ ; 自船船舶長、 $L_T$ ; 相手船船舶長
- 換算船舶長;  $L_K = \sqrt{(L_0^2 + L_T^2)/2}$ ,  
 $L_{K170} = \sqrt{(L_0^2 + L_{T170}^2)/2}$ ,  $L_W = L_0 + L_T$
- $V_S = V_{SO} + V_{ST}$ (kts); 接近速度、( $V_0$ ; 自船速度、 $V_T$ ; 他船速度、 $V_{SO} = V_0 \cos(\Phi_B)$ 、 $V_{ST} = V_T \cos(\Phi_{BT})$ 、 $V_{SO} \geq 0$ 、 $V_{ST} \geq 0$ )、 $V_{S00}$ ; 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)、( $\Phi_T$ ; 相手船の針路、 $\Phi_B$ ; 相手船の相対方位、 $\Phi_S$ ; 相対ベクトル方位)
- $\alpha$ ; 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;  $\Phi_T$ 、相手船の相対方位と相対ベクトル方位の仰角;  $\Phi_{BS}$ 等のデータはARPAで測定して得た。また、避航領域の見合い状態係数 $\alpha = 0.2$ 、定数 $n = 6$ である。

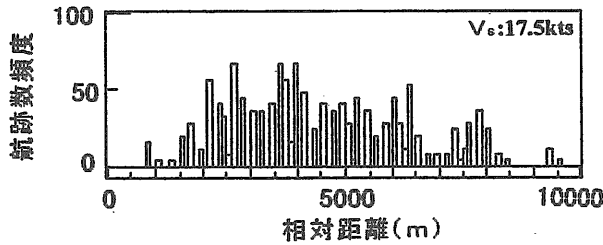
#### d) 衝突危険度指標

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いて、避航確率は避





b) 避航航跡数累積頻度と避航確率



a) 航跡数頻度分布

図-3.4 航跡数頻度分布と避航確率

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-3.4.a) の航跡数累積頻度 (図-3.4.b) は避航確率に対応しているものと考えた。なお、図-3.4は、接近速度が17.5ktsにおける分布を示す。

避航確率は、現在の相対距離； $R_P$ に対する避航危険領域距離； $D_{LP}$ 、避航十分領域距離； $D_{MP}$ 、最接近点航過時の最接近距離； $R_C$ に対する避航危険領域距離； $D_{LC}$ 、避航十分領域距離； $D_{MC}$ 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 (3.3) と式 (3.3') で定義した。そして、式 (3.3) は危険海域表示情報の指標として、式 (3.3') は警報判定の指標として用いた。

$$B_I = \left( \frac{D_{MP} - R_P}{D_{MP} - D_{LP}} \right)^2 \cdot 100 : (D_{MP} \geq R_P \geq D_{LP}) \quad (3.3)$$

$$B_I = 100 : (R_P \leq D_{LP}), \quad B_I = 0 : (D_{MP} \leq R_P)$$

$$B_I = \frac{(D_{MP} - R_P) \cdot (D_{MC} - R_C)}{(D_{MP} - D_{LP}) \cdot (D_{MC} - D_{LC})} \cdot 100 \quad (3.3')$$

$$: (D_{MP} \geq R_P \geq D_{LP} \text{ AND } D_{MC} \geq R_C \geq D_{LC})$$

$$B_I = 100 : (R_P \leq D_{LP} \text{ AND } R_C \leq D_{LC}),$$

$$B_I = 0 : (D_{MP} \leq R_P \text{ AND } D_{MC} \leq R_C)$$

### 3.2.2 航行環境評価要素の解析方法

航行環境評価指標要素の検討は、以下の4項目について行った。

#### (1) 船舶の操縦性能試験特性の調査

航行環境評価要素の旋回性能及び停止性能と船舶長及び速度の相関は、操縦性能試験データを基に解析した。

#### (2) ARPAを用いた船舶長の観測精度の調査

船舶操縦性能特性を推定するためには、相手船舶長と速力のデータが必要であるので、ARPAで相手船舶長を測定する手法と観測精度について検討した。なお、速力データは在来ARPAで出力されている。

#### (3) ARPAで測定した船舶長による操縦性能特性の推定調査

ARPAで測定した相手船舶の船舶長と速力で、旋回縦距離と停止距離を推定した誤差について検討した。

#### (4) 避航領域の実態調査

実船調査で収集した船舶の航跡データを基に、避航領域と接近速度及び旋回縦距離の関係を解析して、避航領域と航行の衝突危険度指標をモデル化した。

以下、航行環境評価要素の解析結果について、記述した。

### 3.2.3 船舶の操縦性能試験特性

接近する船舶に対して、逆転制動をかけたたり変針しても、衝突を避けることのできない衝突回避限界<sup>10), 11)</sup>があり、操船者は見張りで船の形状や速力の情報を入手して、船舶の操縦性能特性を避航操船の判断要素にしている。したがって、安全な避航操船を行うためには操縦性能特性を把握する必要がある。

ここでは、船の長さ及び速力と操縦性能試験特性 (旋回縦距離、停止距離) の関係を操縦性能試験データを基に調べた。また、船舶の諸元と他の操縦性能特の関係については付録に添付した。

#### a) 操縦性能試験データ

操縦性能試験データ<sup>12)</sup>は「船舶整備公団船；183隻」、「全国内航タンカー海運組合所属船；85隻」、「日本内航海運組合総連合会所属船；52隻」の協力により、速力試験、操舵試験、前後進試、惰力試験、旋回試験等に関する操縦性能試験データ (320隻) の提供を得た。

これらの船は日本船舶の船種の内、油槽船、鉞撤船、貨物船、旅客船の部分を含んでいる。

なお、ここでは、相関係数； $r$ は2変数間の直線的な関連性の強さの指標として、 $t$ 値<sup>13), \*)</sup>、は偏回帰係数 (説明変数) の有意性の検定指標として、また、重回帰式についてはダービン・ワトソン比； $D.W$ <sup>13), \*\*)</sup>を示した。

\*)  $t$  値は、回帰式に対して標本分布が正規分布に従う度合いを調べる統計的検定指標として使用される。

\*\*) ダービン・ワトソン比は、重回帰式における

観測値 $Y_i$ と重回帰式で求めた推測値 $Z_i$ との差； $E_i=Y_i-Z_i$ と置いて、 $D.W=[(E_2-E_1)^2+(E_3-E_2)^2+\dots+(E_N-E_{N-1})^2]/(E_2^2+E_3^2+\dots+E_N^2)$ で与えて、有意性の指標として使用される。

b) 船舶の操縦性能特性の概要

1) 旋回性能特性

定常旋回径； $D_{T0}$ について文献<sup>14)</sup>では、 $\Delta$ ；排水容積 $\approx L \cdot d \cdot B(m^3)$ 、 $A_R$ ；可動部舵面積 ( $m^2$ )、 $\delta$ ；舵角 (deg)、 $C_N$ 、 $K_3$ ；パラメータ $\approx (L/B)/C_B$ 、 $\beta$ ；速度修正項( $V/\sqrt{L}$ )、 $L$ ；船の長さ (m)、 $B$ ；型幅 (m)、 $d$ ；船の吃水 (m)、 $C_B$ ；舵面積比、 $V$ ；速力 (kts) と置いて、実験式 (3.4) で与えているが、航行時にはこれらの要素データが変化する為、厳密な推定が出来ない。

$$D_{T0} = 2K_3 \cdot \Delta \cdot \beta / (A_R \cdot C_N \cdot \cos \delta) \quad (m) \quad (3.4)$$

2) 停止性能特性

停止性能特性について文献<sup>14), 15)</sup>では、停止距離； $D_s$ 、排水量； $\Delta$ (Mton)、満載時の方形係数； $C_b$ 、機関出力馬力； $HP$ (Ps)、後進発令時の速力； $V_a$ (kts)として、式 (3.5) の推定式で表しているが、データの分布形状が正規分布とは異なるために厳密な推定が出来ないことを示している。

$$D_s \approx 3V_a^{2/3} \cdot \Delta^{1/2} \cdot C_b^{1/2} / HP^{1/4} \quad (m) \quad (3.5)$$

衝突予防援助装置の航行環境評価指標の要素データとして使用する操縦性能特性を把握するためには、船上で要素データを入手できることが重要であるが、航海時に他船に関する要素データ（船の形状、機関出力、排水量、吃水、舵角）を得ることは困難であるので、式 (3.4, 3.5) は使用しなかった。したがって、諸元と操縦性能試験特性の関係を調べた。

c) 諸元と操縦性能特性の相関

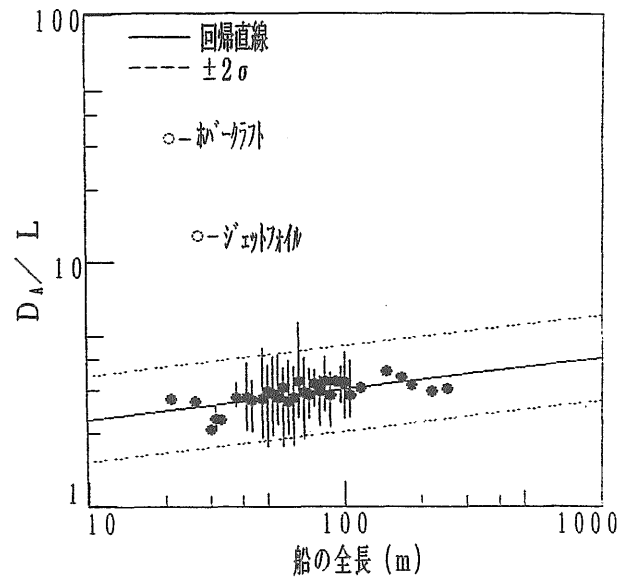
操縦性能特性（旋回縦距離、停止距離）と船舶の長さ及び速力の関係は、操縦性能試験データを基に求めた。

1) 旋回縦距離

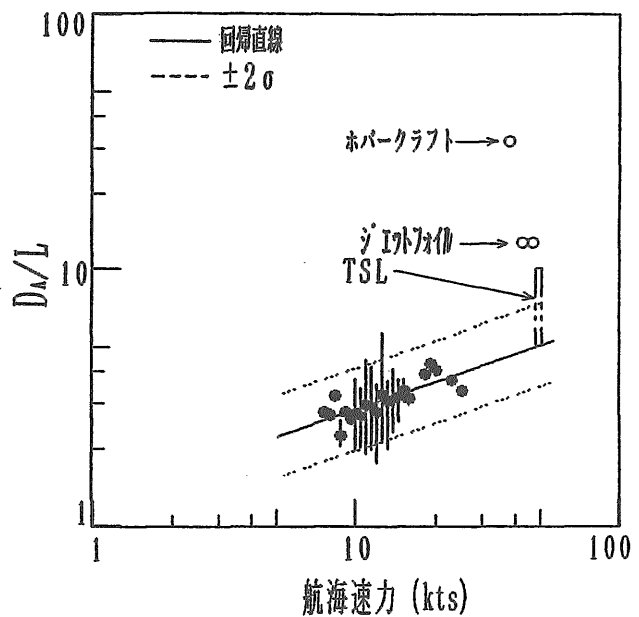
旋回縦距離と全長及び速力の関係を図-3.5.a)、b)に、また、旋回縦距離； $D_A$ は船舶長； $L$ (m)、速力； $V$ (kts)として、式 (3.6) に示した。

$$\log D_A = 0.892 \cdot \log L + 0.631 \cdot \log V - 0.016 \quad (m) \quad (3.6)$$

式 (3.6) の重相関係数と偏回帰係数の  $t$  値及びダービン・ワトソン比は ( $r_s=0.88$ ,  $t_L=10$ ,  $t_V=15$ ,  $D.W=$  (188)



a) 全長と旋回縦距離の関係



b) 速力と旋回縦距離の関係

図-3.5 旋回縦距離特性

1.71)である。

2) 停止距離

停止距離と全長及び速力の関係を図-3.6.a)、b)に、また、停止距離； $D_s$ は式 (3.7) に示した。

$$\log D_s = 1.253 \cdot \log L + 0.351 \cdot \log V + 0.0035 \quad (m) \quad (3.7)$$

式 (3.7) の重相関係数と偏回帰係数の  $t$  値及びダー