

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）¹⁾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

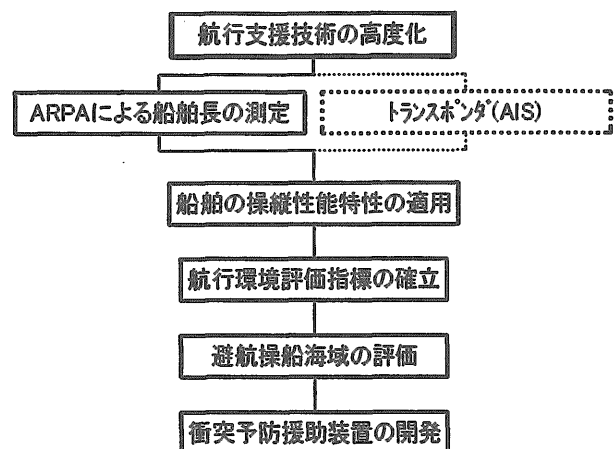


図-1 運航の安全確保に関する課題

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²⁾、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³⁾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⁴⁾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。

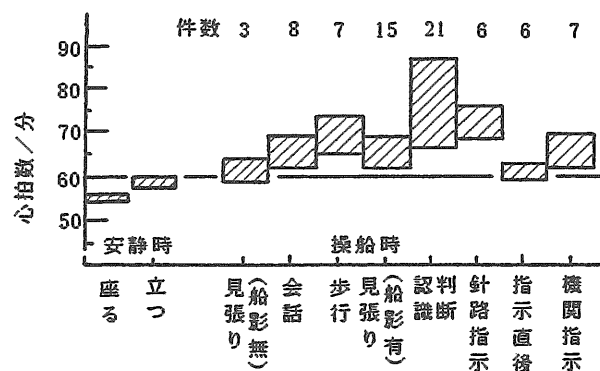


図-2.1 操船作業と心拍数の変化

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。

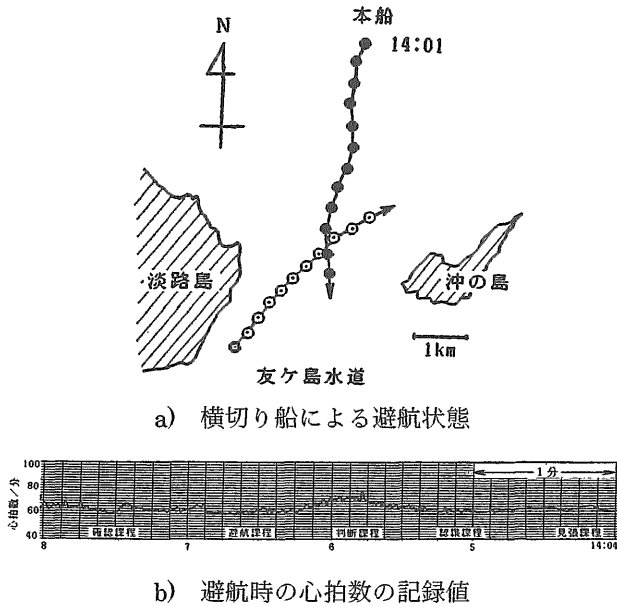


図-2.2 避航操船時の航跡と心拍数の変化

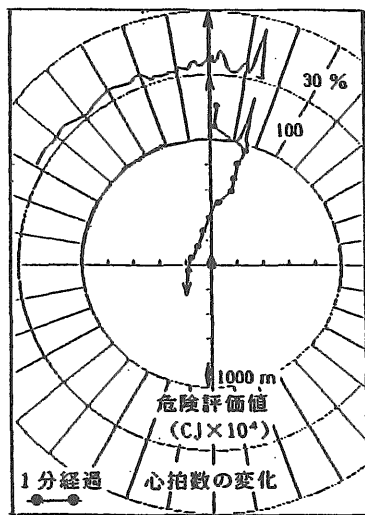


図-2.3 避航操船時の危険評価値と心拍数の関係

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⁹⁾: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。

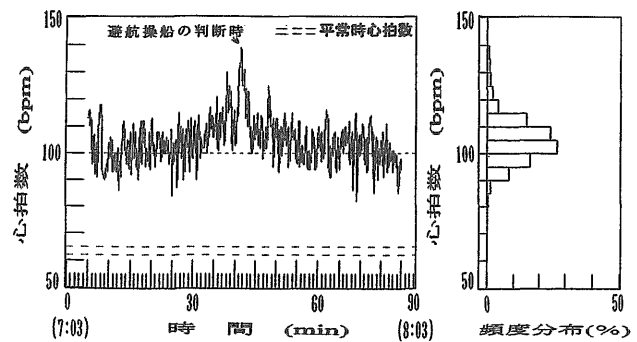


図-2.4 濃霧航行中における操船者の心拍数

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⁹⁾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%)

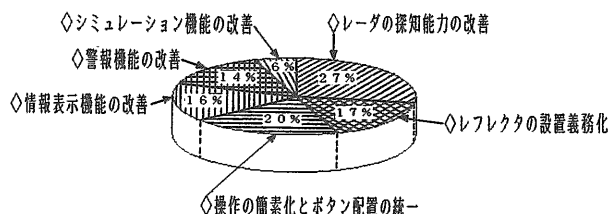


図-2.5 操船者から観たARPAの課題

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⁷⁾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⁸⁾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⁹⁾。

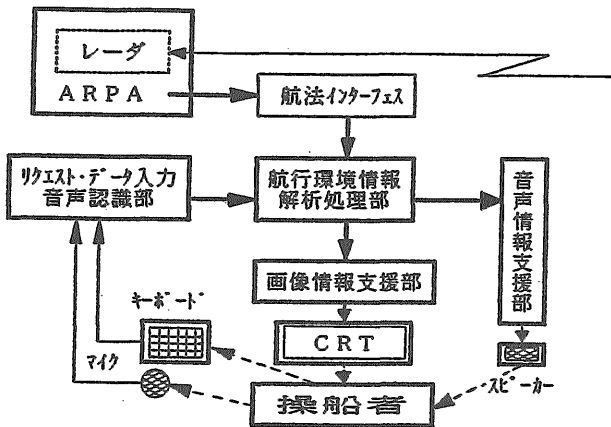


図-3.1 新型ARPAのシステム構成

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。

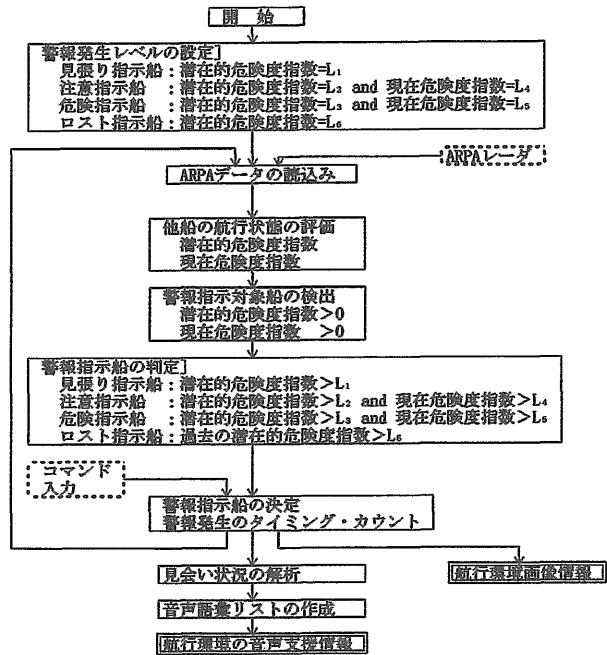


図-3.2 警報指示部のアルゴリズム

(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

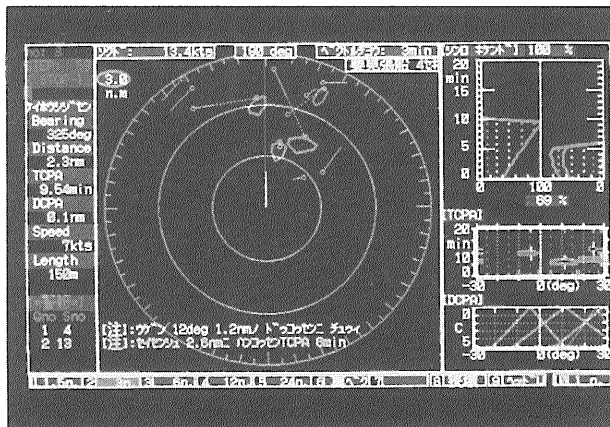
と速度データを基に、自船と相手船の接近速度に対する操縦性能特性を推定して、航行海域近傍の潜在的衝突危険度を評価した。

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。

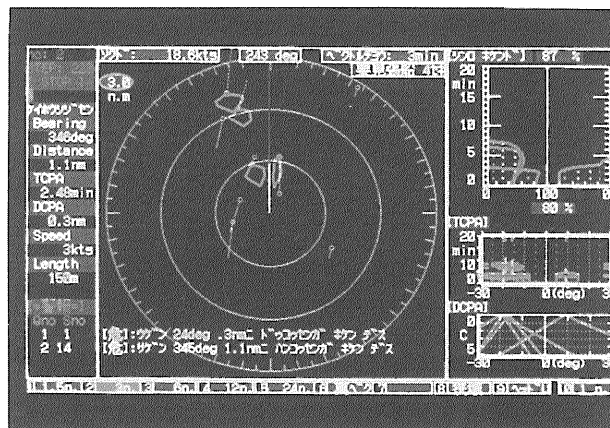
表示画面の内容は、次の通りである。

(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。

危険船は？ -> 危険船は 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。

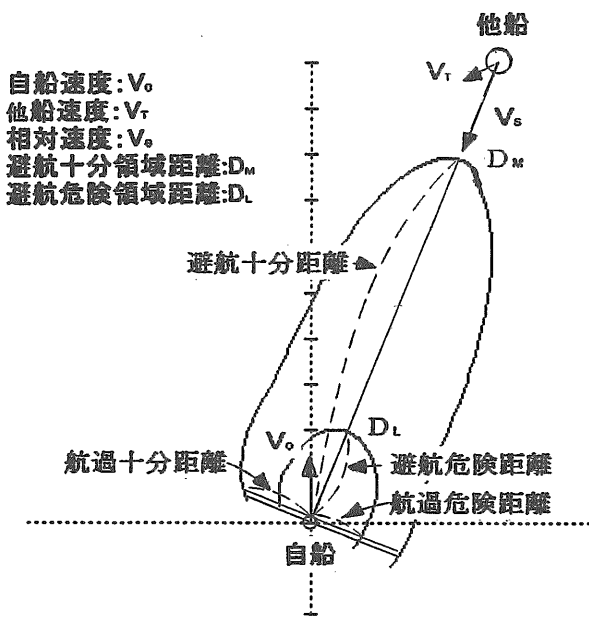


図-3.3 相対避航領域の概念図

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; 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、式(3.1, 3.2)で定義した。

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

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

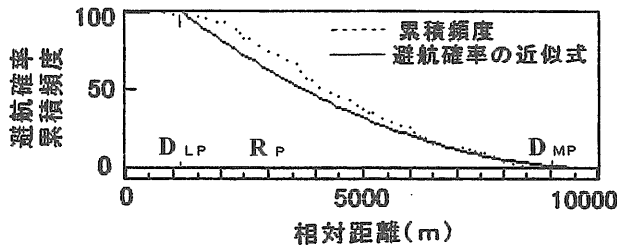
避航領域のパラメータは、

- $D_A(L_K, V_S)$; 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)、(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。

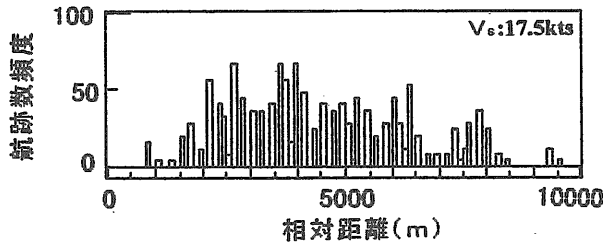
なお、接近速度; V_S 、相手船舶長; L_T 、相手船針路; Φ_T 、相手船の相対方位と相対ベクトル方位の仰角; Φ_{BS} 等のデータはARPAで測定して得た。また、避航領域の見合い状態係数 $\alpha = 0.2$ 、定数 $n = 6$ である。

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^{10), 11)}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¹²⁾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^{13), *)}、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； $D.W$ ^{13), **)}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¹⁴⁾では、 Δ ；排水容積 $\approx L \cdot d \cdot B(m^3)$ 、 A_R ；可動部舵面積 (m^2)、 δ ；舵角 (deg)、 C_N 、 K_3 ；パラメータ $\approx (L/B)/C_B$ 、 β ；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^{14), 15)}では、停止距離； D_s 、排水量； Δ (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

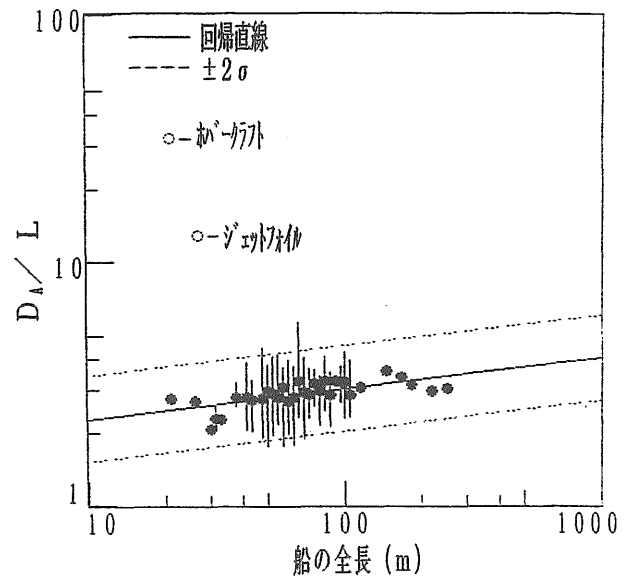
操縦性能特性（旋回縦距離、停止距離）と船舶の長さ及び速力の関係は、操縦性能試験データを基に求めた。

1) 旋回縦距離

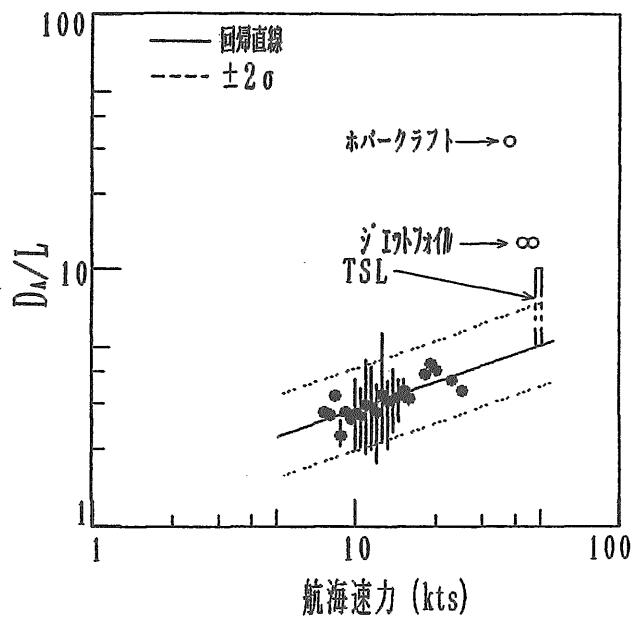
旋回縦距離と全長及び速力の関係を図-3.5.a)、b)に、また、旋回縦距離； D_A は船舶長； L (m)、速力； V (kts)として、式 (3.6) に示した。

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

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

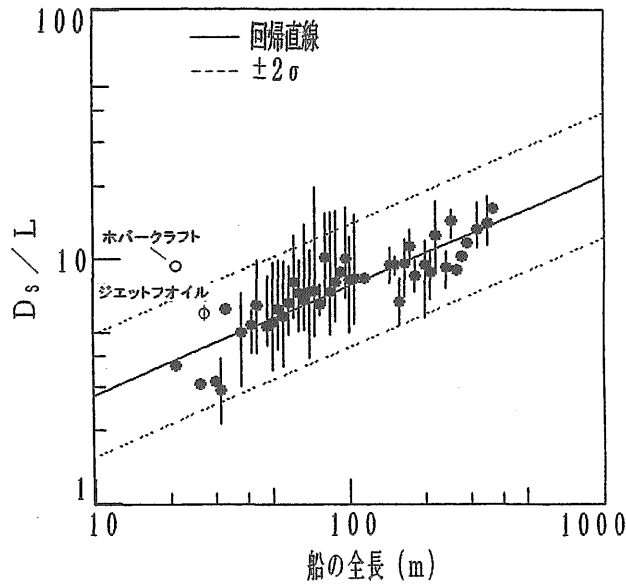
1.71)である。

2) 停止距離

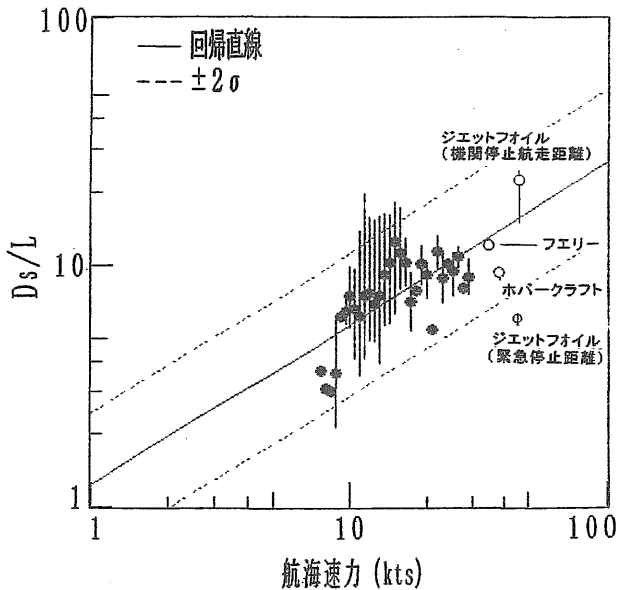
停止距離と全長及び速力の関係を図-3.6.a)、b)に、また、停止距離； D_s は式 (3.7) に示した。

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

式 (3.7) の重相関係数と偏回帰係数の t 値及びダー



a) 全長と停止距離の関係



b) 速力と停止距離の関係

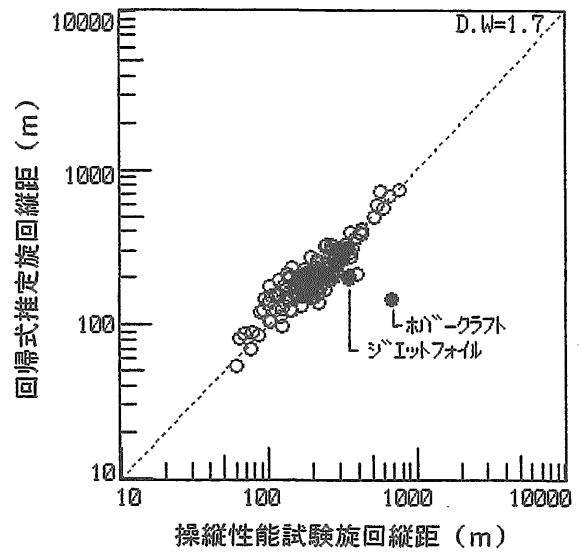
図-3.6 停止距離特性

ビン・ワトソン比は ($r_s=0.93$, $t_L=17$, $t_V=10$, $D.W=1.36$) である。

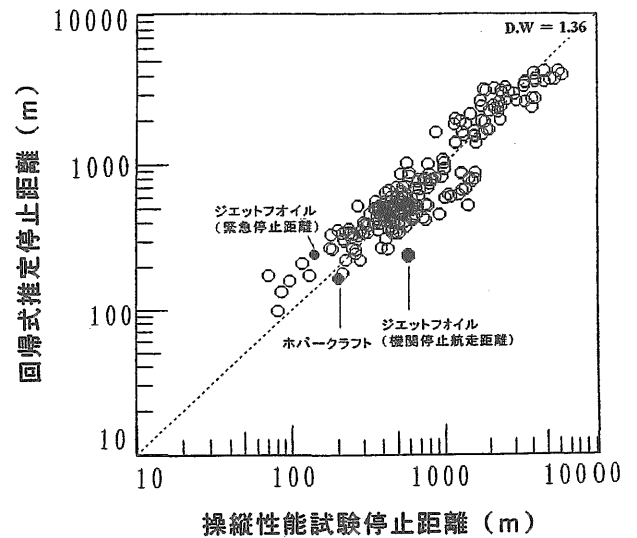
3) 操縦性能試験特性と重回帰式で推定した操縦性能特性の関係

推定式の妥当性は、操縦性能試験値と操縦性能試験のL、Vを用いて重回帰式で計算した推定値(旋回縦距離：図-3.7.a)、停止距離：図-3.7.b)の関係を示した。

例えば、図-3.7.a)の横軸は操縦性能試験の旋回縦距離、縦軸は重回帰式による旋回縦距離の推定値を示す。分析結果は、次の通りである。



a) 旋回縦距離の推定



b) 停止距離の推定

図-3.7 操縦性能試験特性と重回帰式推定操縦性能特性

- ① 旋回縦距離の重回帰式 (3.6) のダービン・ワトソン比; $D.W$ は、停止距離 (式 (3.7)) の値に比較して大きい。即ち、推定精度は式 (3.6) の方が高いので、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。

3.2.4 ARPAを用いた船舶長の観測精度

衝突予防援助装置の航行環境評価指標要素としては、船舶の操縦性能特性を考えているので、ARPAで

相手船の船舶長を測定して旋回縦距離と停止距離を推定する必要がある。

したがって、新型ARPAでは船舶長を測定する機能を新しく改造して付加した。

ここでは、ARPAレーダを用いて測定した相手船舶船長の観測精度について検討した。

なお、相手船の船舶長を測定する方法として画像情報を用いた試み¹⁷⁾はあるが実現していない。

a) レーダ性能特性の概要

船舶レーダは、電波を用いて目標物の距離と方位を知る装置であり、文献¹⁸⁾を引用するとレーダ電波の受信反射電力と距離分解能は、次の様に与えている。

レーダ電波の受信電力； P_R は、レーダの送信出力； P_T 、送受信アンテナの利得； G 、レーダ目標の有効反射面積； S 、電波の波長； λ 、目標物までの距離； R として、式 (3.8) で決まる。

$$P_R = P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot S / [(4 \pi)^3 \cdot R^4] \quad (W) \quad (3.8)$$

レーダの最小距離分解能； r (m) は、パルス幅； τ (μ sec) で決まる。

$$r = 150 \tau \quad (m) \quad (3.9)$$

通常、ARPAレーダでは使用レンジによってパルス幅を変えている。今回の場合、パルス幅は、3nmレンジ(1 Nautical Mile : 1nm=1852m)では $\tau = 0.2 \mu$ sec、6nmレンジでは $\tau = 0.6 \mu$ secを使用している。

したがって、最小距離分解能は、 0.2μ sec幅パルスでは約30m、 0.6μ sec幅パルスでは約90mになる。

b) 実船調査の概要

船舶長の観測調査は、「銀河丸」(航海訓練所・練習船)と、サンフラワー・フェリ「こがね丸」(関西汽船、株)を利用して、大阪港と東京港で沖待ちをしている停泊時に実施した。

ARPAデータは、新型ARPAの実証機の信号処理部に相手船舶船長の測定出力部を付加する改造を行うことにより、図-3.8に示す出力フォーマットで、3秒毎に収集した。

実験は、次の2項目に分けて行った。

(1) ARPA機能の感度特性

ARPA機能の感度特性に関する実験では、同じ航行状態を再現する必要があるため、レーダ信号記録装置で航行中に記録したレーダ信号データを再生して、感度レベルを調整した場合の観測船舶長の変化傾向を調べた。

(2) 船舶長の観測精度

船舶長の観測精度は、ARPAレーダで測定した相手

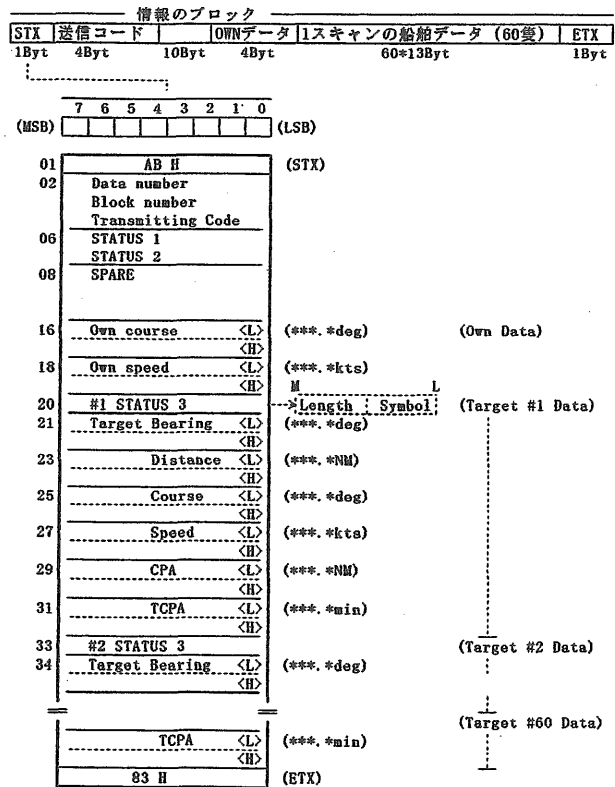


図-3.8 ARPAのフォーマット

船の船舶長(「観測船舶長」と言う)と、目視観測で確認した船舶名から船舶明細書^{19), 20)}で調べた全長(「実船舶長」と言う)を比較して調べた。

c) ARPAレーダの感度特性

ARPAで観測した船舶長は、海面反射波信号(シークラッタ)レベルの調整、受波信号の増幅利得(ゲイン)レベルの調整、パルス幅の切り替え等の要因で変化するので、これらの感度特性の調査は、パルス幅が($\tau = 0.2 \mu$ sec)の状態で行った。

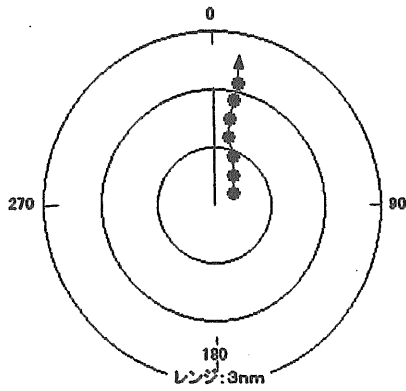
1) シークラッタ特性

シークラッタ特性の実験は、ゲインレベルを(GL=10)に設定して行った。

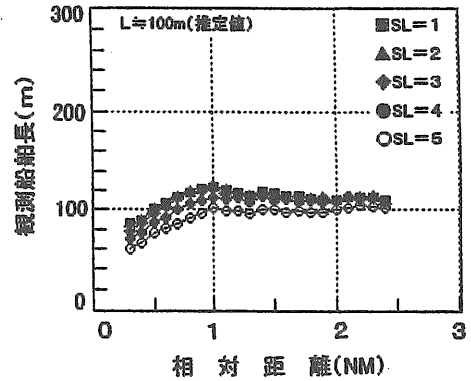
シークラッタレベルを(SL=1~5)の範囲で調整した場合の観測船舶長の変化を図-3.9に示した。

図-3.9において、シークラッタレベルが $SL \leq 5$ の条件下では1nm以上における観測値が実船舶長に対して大きくなるが、1nm以下における観測値は実船舶長に対して小さくなるのが分かった。

即ち、海象が荒れて海面反射が大きい時にはシークラッタを抑制する様にSLレベルを上げて使用するが、SLが大きい(SL=5)の場合でも、自船から1nm以上の距離では測定誤差が小さくなり有効である。また、1nm以下の距離では全体的に測定値が小さくなる傾

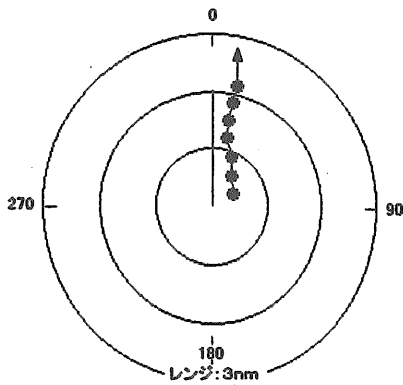


a) 相対航跡

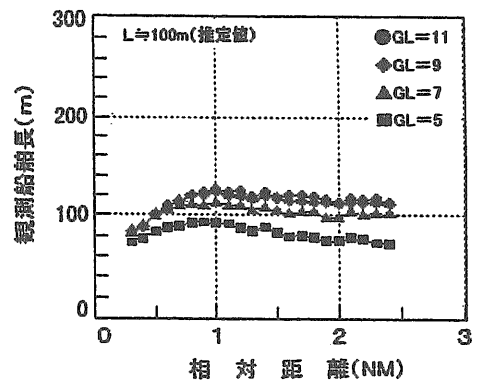


b) シークラッタレベル(SL)による観測値の変化

図-3.9 シークラッタレベルと観測船舶長の関係



a) 相対航跡



b) ゲインレベル(GL)による観測値の変化

図-3.10 ゲインレベルと観測船舶長の関係

向があるので、安全性向上の観点からは自船から1nm以上の距離で測定した船舶長データを使用する必要がある。

2) ゲイン特性

ゲイン特性の実験は、シークラッタレベルを(SL=3)に設定して行った。

ゲインレベルをGL (=5~11) に調整した場合の観測船舶長の変化を図-3.10に示した。

図-3.10は、ゲインレベルGL≤7の条件下では1GL当たり約6%減少して、観測誤差は小さくなるが、(GL>9)では利得が飽和状態になって観測船舶長値が緩やかに増加することが分かった。

したがって、通常はゲインレベル (GL>7) で使用していて、船舶長は大き目に観測されているので、安全性の観点からは船舶長データとして有効に使用できることが分かった。

d) 船舶長の観測精度

船舶長観測時のARPA機能は、観測時の海面反射状態を考慮して、「こがね丸」では(τ=0.2μsec、レンジ=3nm、SL=3、GL=9)、「銀河丸」では(τ=0.6μsec、レンジ=6nm、SL=6、GL=10)に設定した。

観測調査で船名を確認した船舶数は、0.2μsec幅パルスを用いた調査では47隻、0.6μsec幅パルスを用いた調査では117隻であった。

調査対象船名の実船舶長と観測船舶長及び観測誤差の関係は、0.2μsecパルスで測定した例を表-3.1に示した。

1) 0.2μsec幅パルスによる観測精度

実船舶長と観測船舶長の間を関数を図-3.11に、また、実船舶長; L₀(m)に対する観測船舶長; L_K(m)の回帰式は式(3.10)に示した。

$$L_K = 0.76L_0 + 42.41, \quad \sigma = \pm 32.55 \quad (\text{m}) \quad (3.10)$$

表-3.1 実船舶長と観測船舶長の比較 (パルス幅: 0.2 μsec)

船名	観測船舶長		観測誤差		推定停止距離(m)		推定誤差		船舶長比	
	Lo(m)	Lk(m)	Ld(m)	Lk(m)	Ds(Lo)	Ds(Lk)	Ds(m)	Ds(m)	Ds/L	Ds/L
1 新賀丸	71	92	21	21	420	544	124	124	1.7	1.7
2 第5富士宮丸	36	65	29	29	228	412	184	184	5.1	5.1
3 王子丸	37	73	36	36	202	399	197	197	5.3	5.3
4 第18金比羅丸	54	95	41	41	342	602	260	260	4.8	4.8
5 幸伸丸	75	101	26	26	507	682	176	176	2.3	2.3
6 第2蒼海丸	39	86	47	47	195	430	235	235	6.0	6.0
7 第一平和丸	37	70	33	33	185	350	165	165	4.5	4.5
8 大照丸	45	86	41	41	266	508	242	242	5.4	5.4
9 北斗丸	124	129	5	5	838	871	34	34	0.3	0.3
10 第5紫雲丸	90	117	27	27	608	790	182	182	2.0	2.0
11 第3久義丸	56	100	44	44	378	676	297	297	5.3	5.3
12 フェニックスエクスプレス	164	179	15	15	1,239	1,352	113	113	0.7	0.7
13 第2光丸	37	75	38	38	202	410	208	208	5.6	5.6
14 第86福丸	58	70	12	12	317	382	66	66	1.1	1.1
15 第21三栄丸	46	94	48	48	251	514	262	262	5.7	5.7
16 日暮丸	54	84	30	30	319	496	177	177	3.3	3.3
17 第28菅造丸	43	69	26	26	290	466	176	176	4.1	4.1
18 第一東洋丸	105	126	21	21	752	902	150	150	1.4	1.4
19 興和丸	52	66	14	14	284	361	76	76	1.5	1.5
20 第5豊和丸	40	83	43	43	254	526	273	273	6.6	6.6
21 しんく丸	65	73	8	8	610	685	75	75	1.2	1.2
22 第38玄洋丸	65	103	38	38	465	737	272	272	4.2	4.2
23 明和丸	34	67	33	33	170	335	165	165	4.9	4.9
24 第2飛翔丸	64	97	33	33	378	573	195	195	3.0	3.0
25 第8日昌丸	75	113	38	38	475	716	241	241	3.2	3.2
26 第15日昌丸	24	71	47	47	131	388	257	257	10.7	10.7
27 すず丸	42	82	40	40	266	520	254	254	6.0	6.0
28 第2ふじしろ丸	47	87	40	40	257	475	219	219	4.6	4.6
29 第10富士宮丸	33	72	39	39	209	456	247	247	7.5	7.5
30 第11菅造丸	36	67	31	31	197	366	189	189	4.7	4.7
31 かんさい丸	72	102	30	30	486	699	203	203	2.8	2.8
32 さやま2	115	116	1	1	955	964	8	8	0.1	0.1
33 第12大洋丸	38	69	31	31	171	311	140	140	3.7	3.7
34 旭丸	54	61	7	7	342	387	44	44	0.8	0.8
35 第2舞臺丸	47	88	41	41	257	481	224	224	4.8	4.8
36 東丹丸	41	80	39	39	260	507	247	247	6.0	6.0
37 第3松島丸	35	57	22	22	236	385	149	149	4.2	4.2
38 第8神力丸	65	87	22	22	384	514	130	130	2.0	2.0
39 さやま2	115	113	-2	-2	997	980	-17	-17	-0.2	-0.2
40 第28栄造丸	43	79	36	36	290	534	243	243	5.7	5.7
41 アクアジェット	34	57	23	23	497	833	336	336	9.9	9.9
42 アクアジェット	34	57	23	23	497	833	336	336	9.9	9.9
43 第2照葉丸	61	54	-7	-7	412	365	-47	-47	-0.8	-0.8
44 新里丸	83	112	29	29	594	802	208	208	2.5	2.5
45 あかつき丸	100	117	17	17	903	1,057	154	154	1.5	1.5
46 第8光洋丸	117	154	37	37	972	1,279	307	307	2.6	2.6
47 大阪丸	150	156	6	6	1,459	1,517	58	58	0.4	0.4
平均値	全: 27.6						179		3.8	

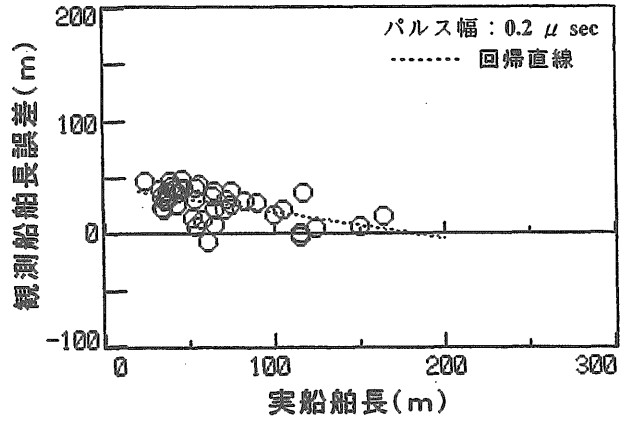


図-3.12 0.2 μsecパルスによる観測船舶長誤差と実船舶長の関係

$$L_D = -0.23L_0 + 42.41, \sigma = \pm 32.55 \text{ (m)} \quad (3.11)$$

観測誤差の最大値は-7m~48mの範囲にあり、平均値は27.6mである。

2) 0.6 μsec幅パルスによる観測精度

観測船舶長と実船舶長の関係を図-3.13に、また、実船舶長に対する観測船舶長 L_K の回帰式は式(3.12)に示した。

$$L_K = 0.49L_0 + 102, \sigma = \pm 24.6 \text{ (m)} \quad (3.12)$$

なお、図-3.11では(鎖線:距離分解能(30m)、実線:観測船舶長の回帰直線)を示す。

次に、観測船舶長誤差と実船舶長の関係を図-3.12に、また、実船舶長に対する観測誤差 L_D (m)の回帰直線(鎖線)式は式(3.11)に示した。

観測値は、小型船では実船舶長より大きな値になるが、90m以上の船では実船舶長と等しくなる傾向が認められた。

なお、図-3.13では(鎖線:距離分解能(90m)、1点鎖線:観測船舶長の回帰直線、白丸(○):在来船、黒丸(●):高速船)を示す。

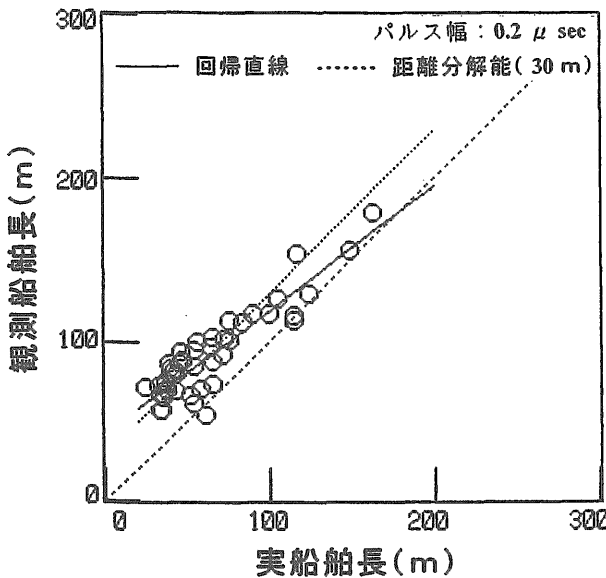


図-3.11 0.2 μsecパルスによる観測船舶長と実船舶長の関係

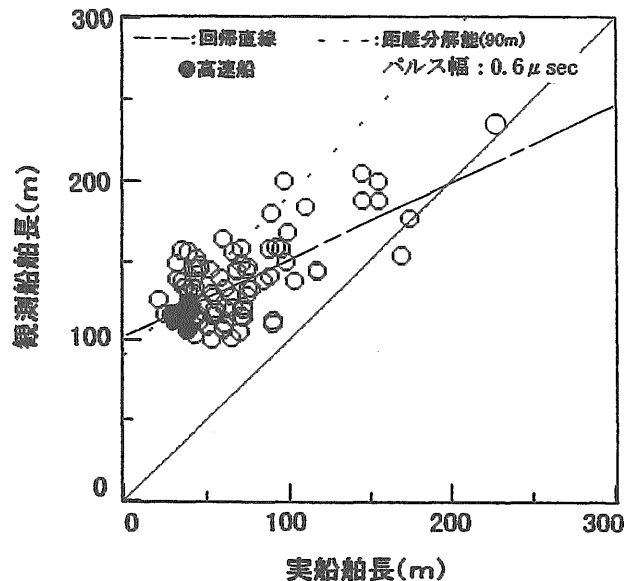


図-3.13 0.6 μsecパルスによる観測船舶長と実船舶長の関係

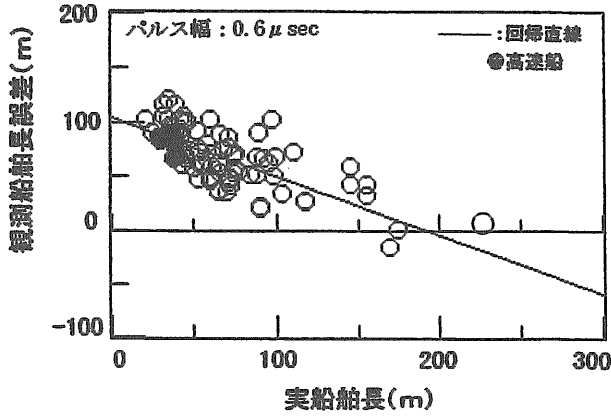


図-3.14 0.6 μ secパルスによる観測船舶長誤差と実船舶長の関係

次に、観測船舶長誤差と実船舶長の関係を図-3.14に、また、実船舶長に対する観測誤差； L_D の回帰式は式(3.13)に示した。

$$L_D = -0.5L_0 + 102, \quad \sigma = \pm 24.9 \quad (\text{m}) \quad (3.13)$$

観測誤差は、実船舶長が約100m以下の船では約(距離分解能-実船舶長)の範囲で、小型船ほど大き目に測定されるが、約100m以上の船では誤差が小さくなって、実船舶長に近い値を測定している。

3) 観測距離と観測誤差の関係

観測距離に対して観測船舶長が小さくなる領域は、自船の近傍約1nm以内にあり、1nm以遠では実船舶長に対して観測船舶長が大きく、観測誤差はほぼ一定になっている。

この傾向は、シークラッタの感度特性と一致している。

e) まとめ

解析の結果は、次の通りである。

- ①シークラッタレベルは、通常、海面反射信号の受信状態によって適宜変えて使用するが、 $SL \leq 5$ の範囲であれば、船舶長データとして有効である。また、自船の近傍(1nm以下)では観測値が小さくなるので、安全性の観点からは1nm以遠のデータを使用する必要がある。
- ②ゲインレベルは、 $GL \geq 7$ で使用すれば船舶長が大き目に測定できるので、安全性の観点からは $GL \geq 7$ で使用する必要がある。
- ③ARPAレーダのパルス幅は、現在はレンジ毎切り替えているが、将来的には10nmレンジまで、0.2 μ secを使用する必要がある。

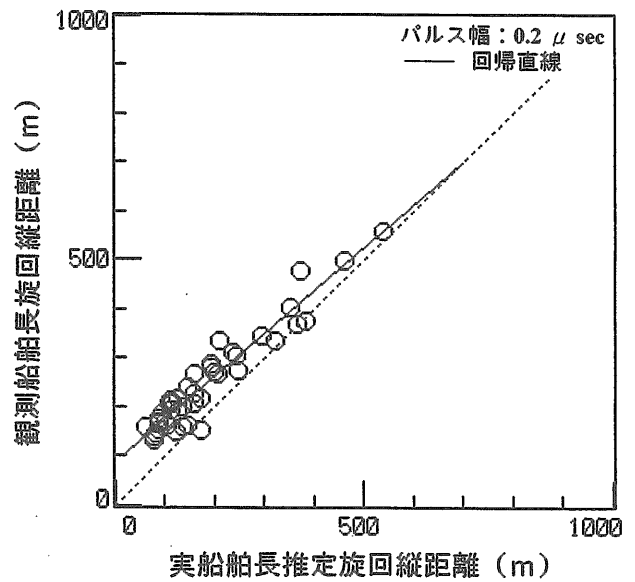
即ち、従来のARPAレーダでは、レンジを拡大してレーダ画面上で、陸地と自船の航行位置関係を確認する必要があつたが、GPS (Global

Positioning System)が普及した現在においては自船位置はGPSで確認できるので、ARPAでは約10nmまでの他船情報が有れば十分である。

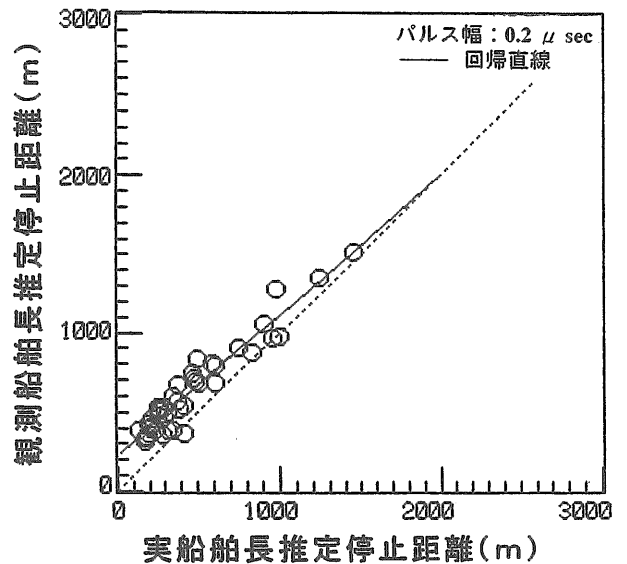
3.2.5 ARPAによる操縦性能特性の推定

新型ARPAの航行環境評価指標の避航領域を判断する要素の操縦性能特性(旋回縦距離と停止距離)は、ARPA(レーダパルス幅; 0.2 μ sec)で測定した相手船舶の速力と船舶長で推定した。

推定方式の妥当性を比較する為、観測船舶長と速力で推定した操縦性能特性(旋回縦距離; D_{AK} 、停止距離; D_{SK})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(D_{A0} 、 D_{S0})の関係を、図-3.15.a)



a) 旋回縦距離の推定



b) 停止距離の推定

図-3.15 観測船舶長と速力による操縦性能特性の推定

(旋回縦距離)と図-3.15.b) (停止距離)に示した。

なお、図-3.15.a)の横軸は実船舶長による推定値の旋回縦距離、縦軸は観測船舶長による推定値の停止距離を示す。

推定値(旋回縦距離; D_{AK} 、停止距離; D_{SK})の回帰式は、実船舶長による推定値(旋回縦距離; D_{A0} 、停止距離; D_{S0})として、式(3.14, 3.15)に示した。

$$D_{AK} = 0.87D_{A0} + 89.1, \quad \sigma = \pm 109.11 \quad (\text{m}) \quad (3.14)$$

$$D_{SK} = 0.88D_{S0} + 229.4, \quad \sigma = \pm 229.92 \quad (\text{m}) \quad (3.15)$$

図-3.15によると、観測船舶長による推定値(旋回縦距離; D_{AK} 、停止距離; D_{SK})の平均誤差は、実船舶長を用いた推定値と比較して、旋回縦距離では約66m (1.4L)、停止距離では約230m (4.8L)大きい。

推定結果は、次の通りである。

- ① ARPA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。
- ② 避航領域の規格化要素としては、旋回縦距離を採用した。

3.2.6 避航領域の実態調査

航行環境評価指標要素の避航領域は、実船調査で観測集積した船舶航跡データを基に、解析した^{21), 22)}。

a) 実船による航跡データの調査の概要

航跡データの調査方法は、次の通りである。

1) 調査期間

航跡データの実船調査は、平成元年から6年度と平成11, 12年に「銀河丸」(主要な諸元: $L \times B \times D = 110 \text{ m} \times 16 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 、 $G_T = 4,888 \text{ t}$ 、航海速力: 17kts)で、また、平成7年から9年度に「こがね丸」($L \times B \times D = 150 \text{ m} \times 25 \text{ m} \times 13 \text{ m}$ 、 $G_T = 9,684 \text{ t}$ 、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)を利用して実施した。

2) 調査海域

調査海域を図-3.16に示した。

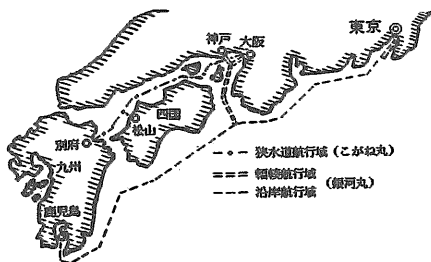


図-3.16 実船調査の航行海域

航行海域における被験船の主な航行時間帯と平均速力は、次の通りである。

沿岸海域: 「銀河丸」は昼間における中速航行(17kts)

幅狭海域: 「銀河丸」は昼間における低速航行(13kts)

狭水道域: 「こがね丸」は夜間における高速航行(23kts)

3) 航跡データ

ARPAデータの時刻歴例を図-3.17に示した。

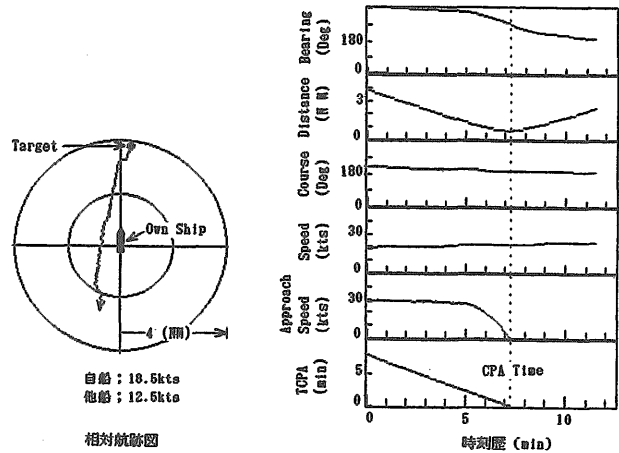


図-3.17 ARPAデータの時刻歴

航跡データの航行海域における捕捉追尾回数分布は、次の通りである。

全航跡データの捕捉追尾回数は、沿岸航行海域: 240,498回、幅狭航行海域: 146,341回、狭水道航行海域: 430,309回である。また、潜在的衝突の危険性がある避航対象船が捕捉データ全体に占める割合は約10%である。更に、避航対象船の接近方位分布は、航行海域の平均値で示すと船首方位: 80%、前横方位: 18.1%、後横方位: 1.1%、船尾方位: 0.7%である。

なお、この避航対象船による航跡数頻度分布は、避航距離の解析で使用した。

4) 避航領域の解析項目

避航操船時の操船者は、相対ベクトルが衝突針路上にある時は避航開始時の距離的・時間的余裕を、また、衝突の見合い関係を回避した後は自船と相手船がすれ違う時の離間距離「航過距離」の余裕を判断要素にしている。

したがって、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。

なお、避航領域の解析では、航跡数頻度が5%以上

の分布データを取り扱った。

5) 避航領域の規格化指標

操縦性能特性と速度依存性を図-3.18に示した。

避航操船時の判断要素には、旋回縦距離； $D_A(L, V)$ が影響しているものと考えて、避航領域は旋回縦距離； $D_A(L, V)$ の式 (3.16) で規格化した。また、停止距離の規格化式； $D_s(L, V)$ は式 (3.17) に、旋回縦距離； $D_A(L, V)$ と停止距離； $D_s(L, V)$ (式 (3.17)) との換算係数は V が10kts~40ktsの範囲の値を近似して式 (3.18) に示した。なお、換算船舶長； $L=L_K$ or L_W 、接近速度； V である。

$$D_A(L, V) = \text{Exp}(0.892 \cdot \log L + 0.631 \cdot \log V - 0.0367) \quad (\text{m}) \quad (3.16)$$

$$D_s(L, V) = \text{Exp}(1.253 \cdot \log L + 0.351 \cdot \log V + 0.0082) \quad (\text{m}) \quad (3.17)$$

$$H = (D_s(L, V) / D_A(L, V)) = 0.0046 \cdot L + 1.87 \quad (3.18)$$

旋回縦距離の表記は、自船舶長； L_0 、相手船舶長； L_T として、

①換算船舶長 ($L_K = \sqrt{(L_0^2 + L_T^2)}/2$)と接近速度 V による旋回縦距離； $D_{ALK}(=D_A(L_K, V))$

②換算船舶長 ($L_W = L_0 + L_T$)と接近速度 V による旋回縦距離； $D_{ALW}(=D_A(L_W, V))$

と置いた。

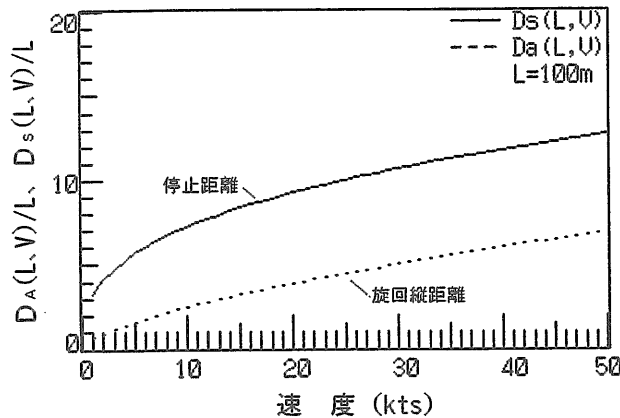


図-3.18 規格化操縦性能特性の速度依存性

b) 避航領域の解析結果

1) 航行海域の航跡数頻度分布

実船調査の航跡数頻度分布はX軸に接近速度、Y軸に相対距離、Z軸に航跡数頻度として、上から順に a) 沿岸航行海域、b) 輻輳航行海域、c) 狭水道航行海域として図-3.19に示した。

図-3.19の航跡数頻度分布からは、自船の周りには他船の侵入を避ける領域(「避航領域」又は「閉塞領

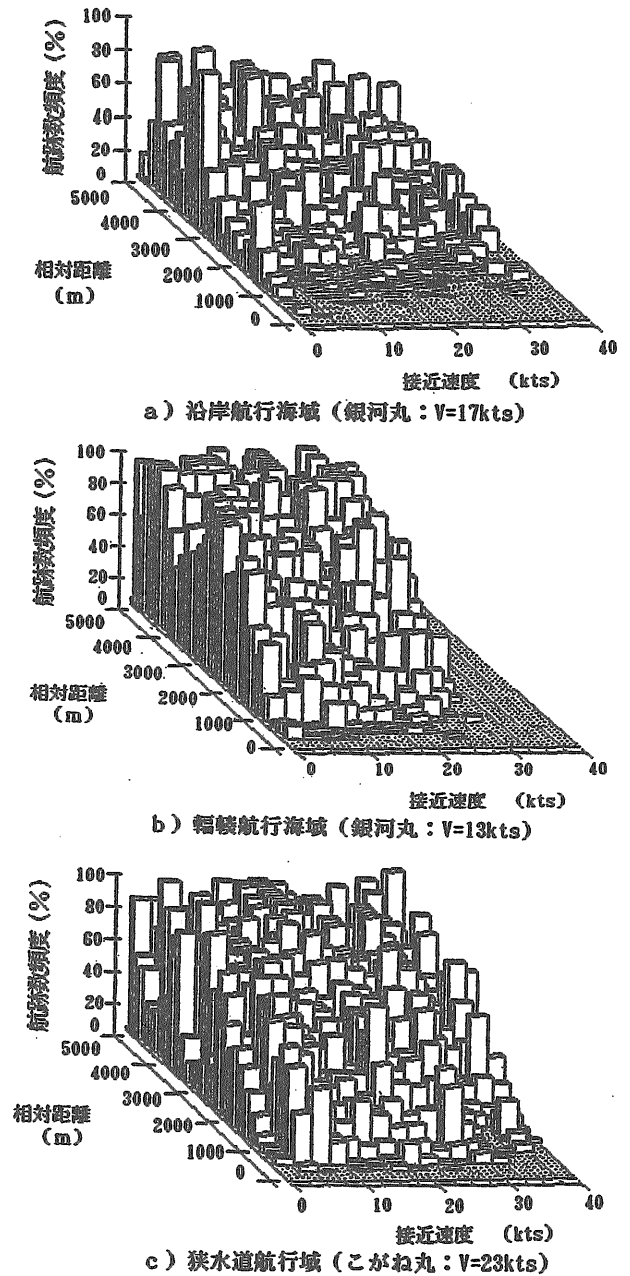


図-3.19 航行海域における航跡数頻度分布

域²³⁾と言う)が認められる。

この避航領域の航跡数頻度分布は、操船者が避航動作の判断時に航行海域の輻輳状況や相手船の諸元及び性能特性を推測して得た2船間の衝突防止に必要な避航操船の評価指標量を表しているものと考えた。

したがって、避航領域の要素には、接近速度、船舶の停止距離特性、相対ベクトル、見会い状態、航行海域の輻輳状況等を取り入れた。

2) 避航領域を構成する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-3.20に示した。

図-3.20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。

したがって、避航領域の解析では、自船近傍の避航危険領域は小型船 ($L_T=20m$) によって、避航十分領域は大型船 ($L_T=170m$) によって構成されたものと仮定した。

例えば、自船と小型の相手船による換算船舶長は、沿岸航行域と輻輳航行海域では ($L_O=115m$, $L_K=82m$)、狭水道航行域では ($L_O=150m$, $L_K=107m$) 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 $L_K=145m$ 、狭水道航行域では $L_K=160m$ とした。

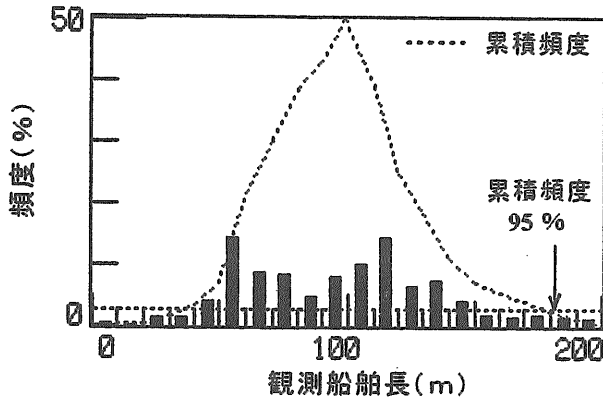


図-3.20 航行船舶の船舶長分布

3) 輻輳海域における避航領域と換算船舶長の関係

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

輻輳海域における避航危険領域 (航過危険距離、避航危険距離) と旋回縦距離; $D_A(L, V)$ 要素の換算船舶長 (L_K, L_W) の関係を図-3.21に示した。

図-3.21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、換算船舶長; L_W は、旋回縦距離比 ($L_W=135m:2.5D_A(L_W, V)$, $L_W=195m:2.8D_A(L_W, V)$, $W=245m:3.0D_A(L_W, V)$) と比例関係にある

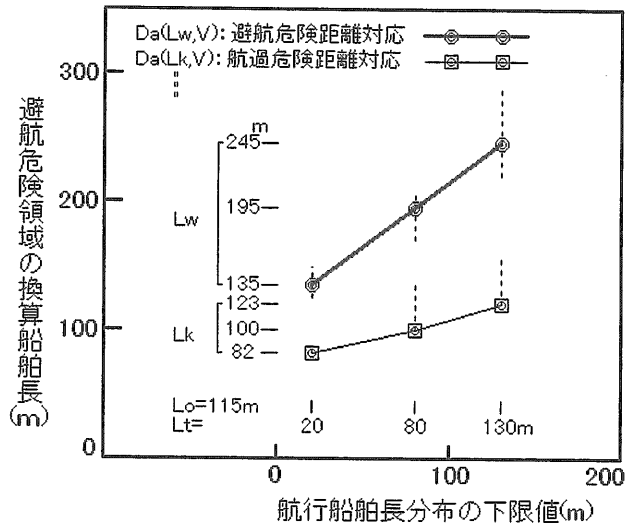


図-3.21 輻輳航行海域における避航危険領域の換算船舶長と航行船舶長の関係

が、換算船舶長; L_K は旋回縦距離比 ($L_K=83m:3.7D_A(L_K, V)$, $L_K=99m:5.1D_A(L_K, V)$, $L_K=123m:5.8D_A(L_K, V)$) と比例関係にない。

- ③航過十分距離は、換算船舶長; L_K と接近速度; V による旋回縦距離; $D_A(L_K, V)$ 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相手船舶長; L_T (約170m) と自船舶長; L_O による換算船舶長; L_K と接近速度; V による旋回縦距離; $D_A(L_{K170}, V)$ と相関がある。

例えば、相手船の船舶長が ($L_T=20m:L_K=83m:L_W=135m$, $L_T=80m:L_K=99m:L_W=195m$, $L_T=130m:L_K=123m:L_W=245m$) の場合、航過危険距離と避航危険距離は図-3.22の様になる。

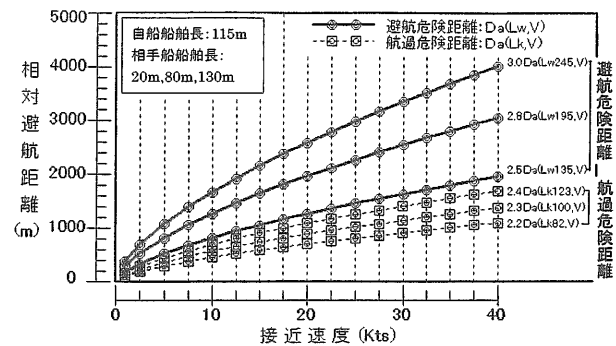


図-3.22 輻輳海域における避航領域と換算船舶長の関係

4) 航行海域における避航領域

航行海域における避航領域 (避航距離、航過距離) は、旋回縦距離 ($D_{ALK}, D_{ALK170}, D_{ALW}$) で規格化して、また停止距離 ($D_{SLK}, D_{SLK170}, D_{SLW}$) との関係も併記して、表-3.2に示した。更に、避航領域定数は見会い状

表-3.2 航行海域における避航領域のパラメータ

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

態係数 $\alpha=0.2$ 、定数 $n=6$ である。

(1) 航過危険距離

幅員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-3.23に示した。図-3.23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 と接近速度による旋回縦距離; D_{ALK} を示す。

航行海域の航過危険距離は、狭水道航行海域では約 $1.4D_{ALK}$ 、幅員航行海域では約 $2.2D_{ALK}$ 、沿岸航行海域では約 $3.6D_{ALK}$ である。

即ち、幅員航行海域を基準に取ると、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。

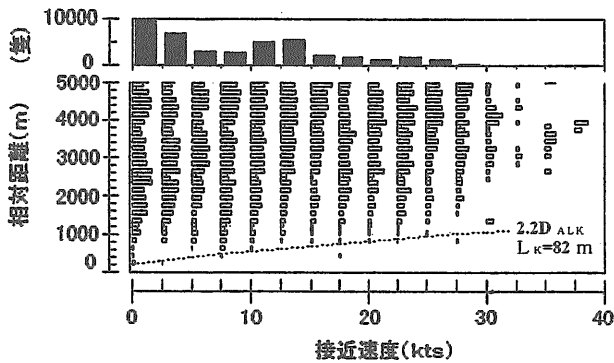


図-3.23 幅員航行海域における航過危険距離

(2) 避航危険距離

幅員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-3.24に示した。

避航危険距離(図-3.24の近地点分布)は、小型船によって形成されているものと仮定して、被験船と小型船による換算船舶長; L_W と接近速度による旋回縦距離; D_{ALW} で規格化した。

分析の結果、次の通りである。

①幅員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

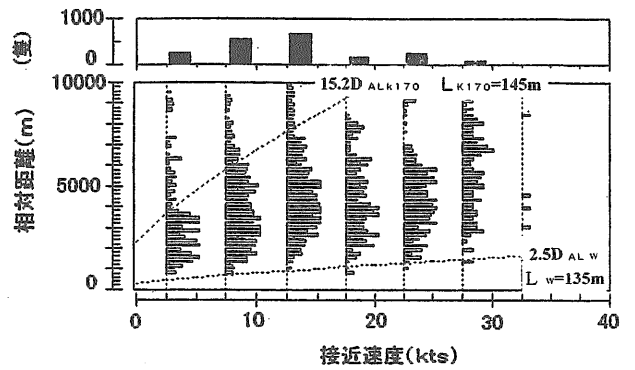


図-3.24 幅員航行海域における避航距離

航船や同航船に比較して、約20%大きくなっている。

②航行海域の避航危険距離は、狭水道航行域では約 $1.5D_{ALW}$ 、幅員航行域では約 $2.5D_{ALW}$ 、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-3.24の遠地点分布)は、相手船の大きさよりも航行海域の大型船(約170m)を想定した余裕を取っていることが分かった。したがって、被験船と大型船の相手船($L_T=170m$)による換算船舶長; L_{LK170} 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、沿岸航行域では約 $17.7D_{ALK170}$ 、幅員航行海域では約 $15.2D_{ALK170}$ 、狭水道航行域では約 $13.1D_{ALK170}$ である。

即ち、避航十分距離は通常航行時の大型船(約170m)を相手船として想定した場合の換算船舶長; L_{LK170} と接近速度による旋回縦距離; D_{ALK170} に相当する余裕を取っている。

(4) 航過十分距離

幅員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-3.25に示した。

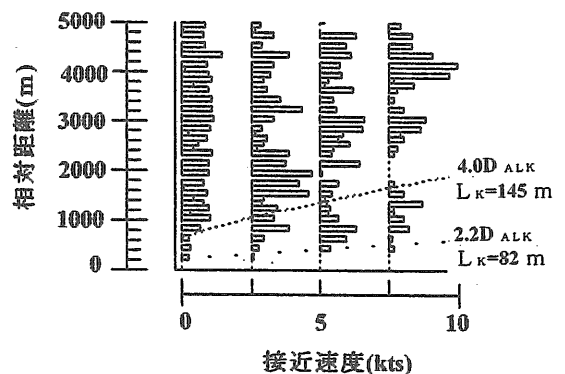


図-3.25 幅員航行海域における航過距離

図-3.25から、航跡数頻度分布が高くなる航過十分距離は、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。

航行海域の航過十分距離は狭水道航行域では約 $3.1D_{ALK}$ 、輻輳航行海域では約 $4.0D_{ALK}$ 、沿岸航行域では約 $5.8D_{ALK}$ であることが分かった。

(5) 避航領域の規格指標（旋回縦距離、停止距離）による比較

航行海域における避航領域は、自船舶長：100m、他船舶長：100m、接近速度：25ktsの条件の計算例を図-3.26に示した。

例えば、輻輳航行海域における避航領域を旋回縦距離で規格化すると（避航十分距離：約 $6D_{SLK}$ 、避航危険距離：約 $1D_{SLW}$ 、航過十分距離：約 $1.6D_{SLK}$ 、航過危険距離：約 $1D_{SLK}$ ）である。

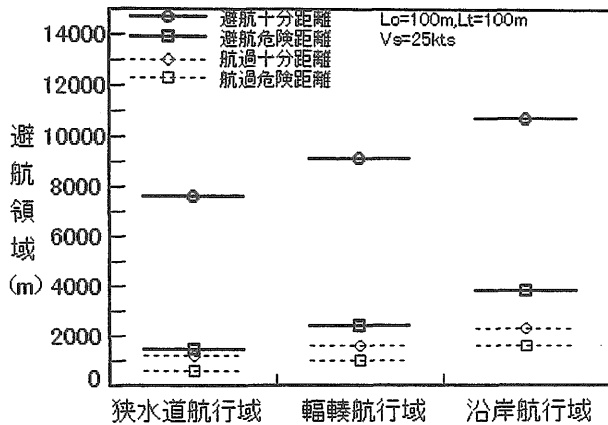


図-3.26 航行海域に対する避航領域の変化

(6) まとめ

航跡数頻度分布の解析結果は、次の通りである。

- ① 避航領域は、旋回性能特性で規格化できる。
- ② 避航危険距離は換算船舶長； L_K と、航過危険距離は換算船舶長； L_W と相関がある。
- ③ 航行海域によって避航領域の大きさは異なる。

3.2.7 避航領域のシミュレーション

a) 避航領域の形状

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に左右に避航変針した場合をシミュレーションして、図-3.27の相対座標上に示した。

b) 避航領域と衝突危険度の関係

避航領域と衝突危険度の関係は、絶対座標避航領域を図-3.28の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（式3.3）を示した。

図-3.28の避航領域は、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の避航危険領域距離をシミュレーションして示している。

図-3.28からは、自船の現在針路は避航危険領域上にあつて、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。

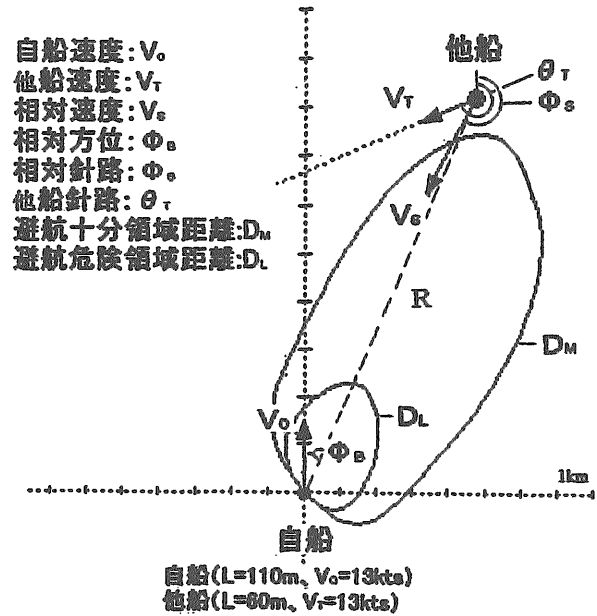


図-3.27 相対座標上の避航領域

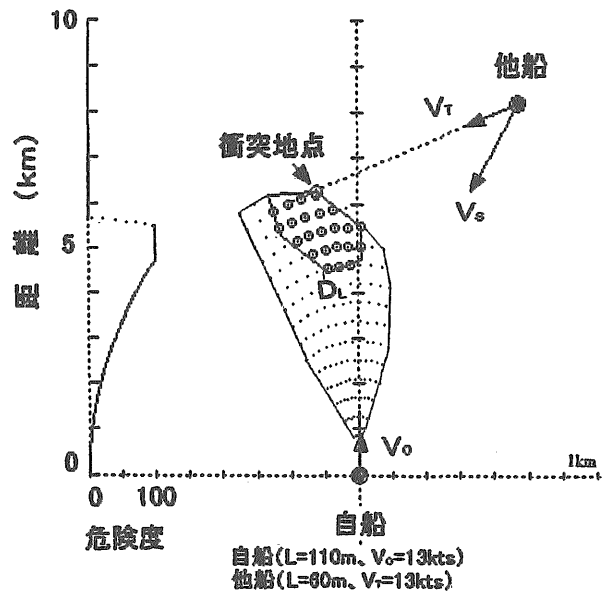


図-3.28 絶対座標上の避航危険領域

c) 航行海域における避航領域の推定

航行海域における避航危険領域は、避航領域モデルで計算して、針路上の衝突危険度指標と共に、上から順に a) 沿岸航行海域、b) 輻輳航行海域、c) 狭水道航行海域の場合を図-3.29に示した。

図-3.29の避航危険領域距離 D_L は、輻輳海域を基準に採ると沿岸海域では余裕を大きく、狭水道航行海域では余裕を小さく取って航行していることを示している。

したがって、避航操船において操船者は、航行海域の輻輳状況を考慮して、潜在的衝突危険領域を予測し、航行海域の輻輳状況に応じた避航危険領域の余裕を取って、操船を行っているものと考えた。

なお、図-3.29の被験船は($L_o=110m, V_o=13kts$)、相手船は($L_T=100m, V_T=13kts$)である。

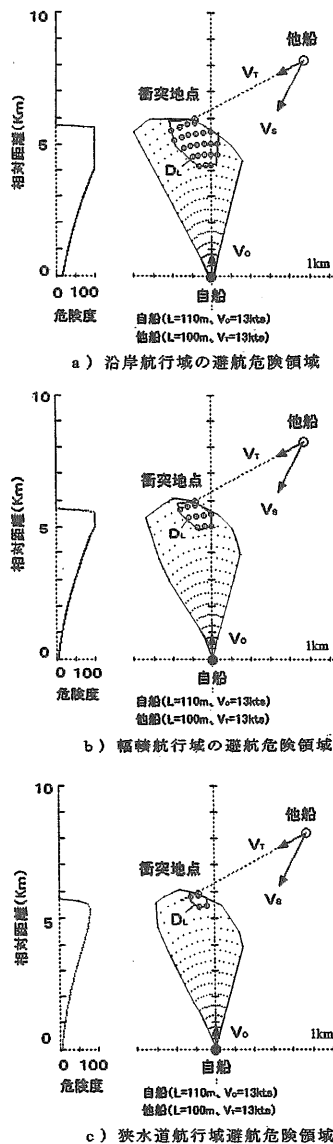


図-3.29 航海領域における避航危険領域の比較

3.2.8 航行環境評価指標の適用

航行環境評価指標は、警報対象船舶の判定と、ARPA画面の潜在的衝突危険海域表示情報として活用した。

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、これまでの解析で得た避航領域の潜在的衝突危険度の等高線を画像表示する方式を提案した。

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図-3.30に示した。

潜在的衝突危険度の等高線の避航領域図からは、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、余裕を大きく取って安全に航行するためには、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。

ここでは、潜在的衝突危険度の等高線領域を画像表示して、避航操船判断の支援情報を操船者に提供した。(写真-3.1)

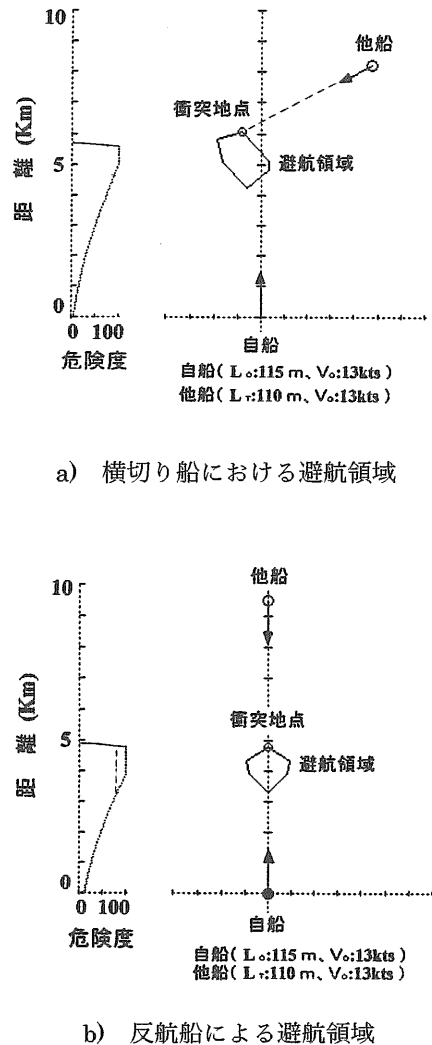
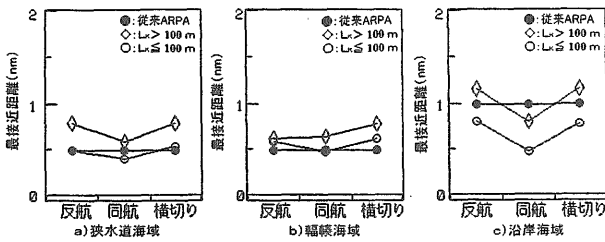


図-3.30 避航領域の評価

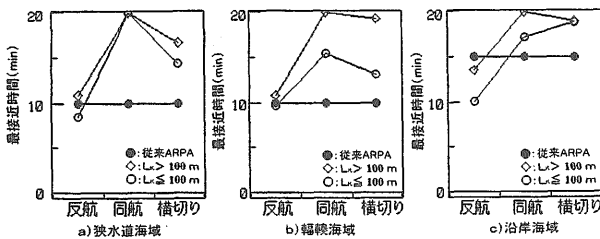
b) 航行環境評価指標の適用に伴う警報対象領域の比較

衝突予防援助装置の警報判定に航行環境評価指標を適用した場合の警報対象領域の比較は、新型ARPA（避航領域で評価）と従来ARPA（DCPAとTCPAで評価）について計算値を示した。

新型ARPAと従来型ARPAによる警報対象領域の比較は、東京港から大阪港の航海時に収集したARPAデータを基に、航行状態を評価して警報対象船舶の選択を行った場合の最接近距離（DCPA：Distance of CPA, CPA：Closest point of Approach）と、最接近時間（TCPA：Time of Closest point of Approach）を計算して、値の最大値を航行海域別に図-3.31に示した。なお、図-3.31の警報レベルは、従来型ARPAの狭水道域と幅員域ではDCPA；0.5nm、TCPA；10min、沿岸域ではDCPA；1nm、TCPA；15minに設定した場合と、新型ARPAでは表-3.2のパラメータで評価した場合について比較した。また、図-3.31の横軸は見会い関係、●；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。



1) 最接近距離の比較



2) 最接近時間の比較

図-3.31 警報対象領域の比較

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) 最接近距離の警報対象領域

警報対象船舶の最接近距離の評価範囲を図-3.31.1)に示した。

DCPAの警報対象領域は、従来方式では一定であるが、新型では狭水域、幅員域、沿岸海域の順で大きくなる。また、船舶長が大きい船ほど大きい。更に、同

航船に対して反航、横切り船では大きい。

(2) 最接近時間の警報対象領域

警報対象船舶の最接近時間の評価範囲を図-3.31.2)に示した。

TCPAの警報対象領域は、従来方式では一定であるが、新型では船舶長が大きい船ほど大きい。また、反航船に対して同航船、横切り船では大きい。

(3) 警報対象船舶隻数

新型ARPAの警報対象船舶隻数は従来型ARPAに比較して、狭水道域では81%、幅員域では91%、沿岸域では71%に減少することが分かった。

(4) まとめ

解析結果は、次の通りである。

従来型ARPAの警報レベルは、DCPA、TCPAで設定しているため、船舶の大きさ・速度・見会い状態に関係なく、警報対象船舶のDCPA、TCPAは一定である。

しかし、新型ARPAの警報レベルは航行環境評価要素に船舶長、速力、接近速度、操縦性能特性等を取り入れているため、警報対象船舶のDCPA、TCPAの範囲は航行状態によって変化する。

その結果、新型の警報の発生件数は、従来方式に比較して、減少するので有効であることが分かった。

3.3 実証機ARPAの開発

新型ARPAの実証機は、従来型ARPAに相手船舶の船舶長を測定する機能、航行環境評価機能、警報情報処理機能、音声・画像情報発生機能を追加して製作した。

a) システムの構成

実証機ARPAのシステム構成は、図-3.32に示した。

従来型ARPAに追加したARPAの信号処理機能は、航行環境情報処理部、警報情報処理部、合成音声部、表示部である。

各処理部の動作内容は、次の通りである。

①ARPA信号処理部

レーダ信号を基に、捕捉目標のARPAデータと船舶目標長のデータを解析する。

②航行環境情報処理部

転送されたARPAの他船情報と船舶長情報により、航行の危険度と潜在的危険海域を計算して、レーダ画面に重畳表示する描画データの計算を行う。

③警報情報処理部

警報処理部で使用する、自船データ、パラメータの入力処理、及び、船首方向に危険度、旋回による危険度のグラフ表示データの処理を行う。

④合成音声部

危険船発生時、警報情報処理部から転送されるデータにより、危険船についての警報を合成音声で発生する。

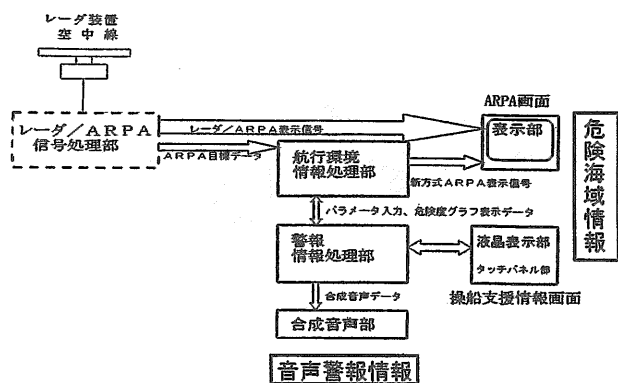


図-3.32 実証機ARPAのシステム構成

b) 仕様

実証機ARPAの仕様は、潜在的危険領域表示情報、グラフ表示情報、音声警報について、示した。

1) 潜在的衝突危険領域表示

自船及び他船サイズ、自船速力、他船速力、海域の輻輳度により潜在的危険領域を計算して、表示する(図-3.33)。

- ①危険領域目標の選択: 衝突予測地点が自船に近く、かつ、自船の針路に近い目標の危険領域から順に表示する。
- ②危険領域表示数: 最大5目標
- ③表示内容: 衝突地点および危険領域(衝突予測地点を頂点とする6角形)
- ④補助線: 目標の真ベクトルの先端と衝突予測点を結ぶ点線

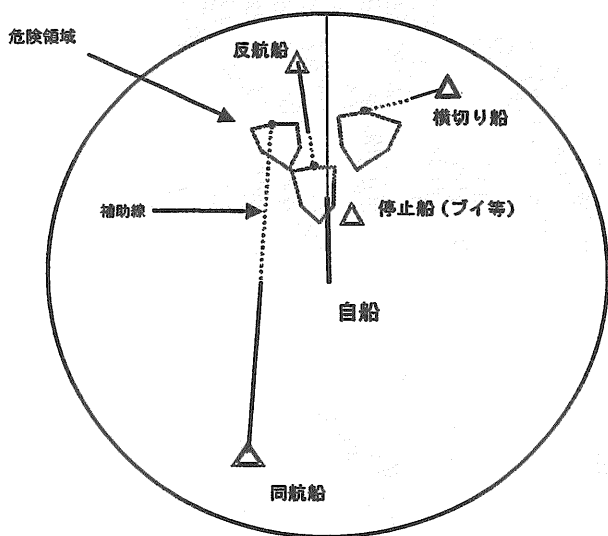


図-3.33 潜在的危険領域表示

2) グラフ表示

- ①船首方向危険度のグラフ表示: 目標数値データエ

リアに20分後までの危険度の変化(衝突予測点と距離の時間変化)を表示する(図-3.34)。

- ②変針によるDCPA変化の表示: 目標数値データエリアに自船の変針による目標のDCPA変化のグラフを表示する(図-3.35)。

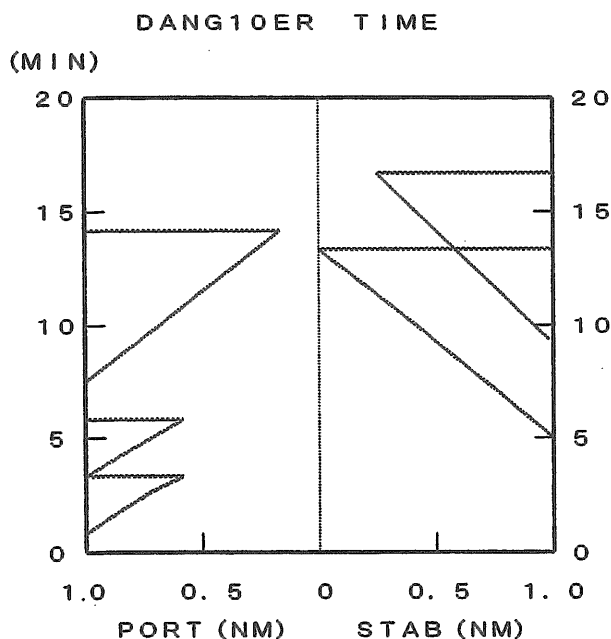


図-3.34 船首方向の危険度表示

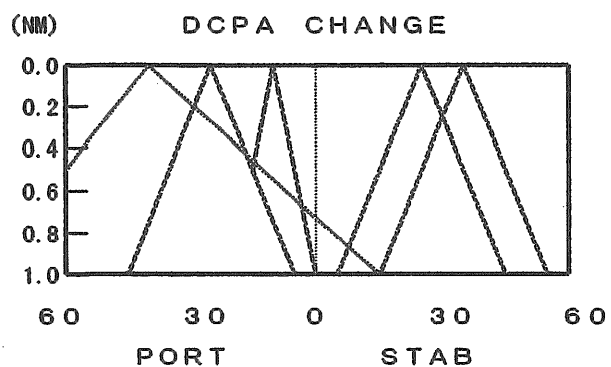


図-3.35 変針によるDCPAの変化の表示

3) 音声警報

- ①警報の内容: 危険領域を表示している目標の情報を合成音声で発生する。
- ②目標の方位: N-UPの時は、真方位「***度」
H-UPの時は、相対方位「右舷**度」
「左舷**度」
「船首方向」船首±1度時
- ③目標の距離: 「**.*マイルに」
- ④目標の動向: 「停止目標」: 目標の速力2ノット以下時、

2ノット以上の場合、反航船、同航船、追い越し船、横切り船のいずれか

「反航船」：目標真針路が自船針路+135～+225度

「同航船」：自船の前方にあり、目標針路が-22.5～+22.5度

「追越船」：自船の後方にあり、自船より速力が大きく自船を追い越している。

「横切り船」：自船の前方にあり、目標針路が自船針路+45～+135度、または、自船針路+225～+305度で自船を横切っている。

「接近船」：上記に該当しない。(目標針路が自船針路+22.5～45度、または、自船針路+305～337.5度)

⑤危険度 「注意して下さい」：TCPAが10分以上
「危険です」：TCPAが10分以下

「衝突の危険あり」：TCPAが5分以下

⑥TCPA値 「TCPA**分」：TCPAが15分以下の時、TCPAが15分以上の時は省略。

c) 実証機

写真は、試作装置の外観と、その表示例を示した。

写真-3.2は、衝突予防援助装置の実証評価機を(手前)フェリーの船橋に搭載して瀬戸内海の狭水道で評価実験をしている様子を示した。

写真-3.3は、衝突予防援助装置にはARPA画面と避航判断支援画面がある。このARPA画面は、明石海峡のものであり、赤色の領域が衝突危険領域を表した。

写真-3.4は、避航判断支援情報画面は、衝突までの距離と時間の余裕や旋回による衝突予測地点の方位と距離、旋回による最接近点を表示した。



写真-3.2 実証機ARPAの実験風景

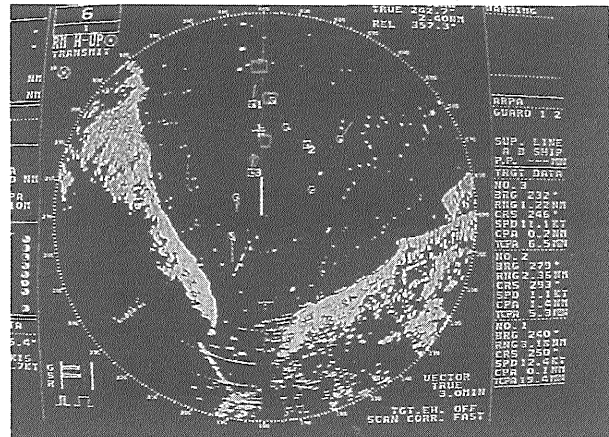


写真-3.3 ARPAのメイン画面

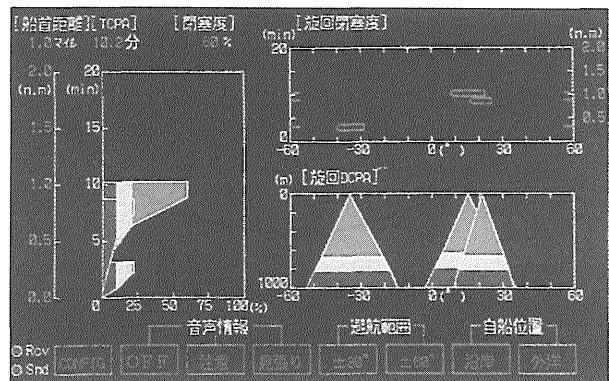


写真-3.4 ARPAのサブ画面

4. 新型ARPA機能の評価

通常航海時の見張り作業において、操船者が入手する様々な感覚情報の80%以上が視覚情報である²⁰⁾とされている様に、ARPAの支援情報の中でも視覚情報は警報情報と同様に重要な操船判断支援情報である。

新型ARPA機能の評価は、避航操船時の判断錯誤等の人為的ミスに関わる問題を改善する為、次の項目について検討を行った。

- ①表示情報の判読作業負担と衝突事故予防の操船への支援効果
- ②警報情報の支援効果

③音声入力情報の音声認識率

即ち、表示情報の判読作業負担に関する実験や、非常に小さい確率で起こる衝突事故の再現や接近現場での観測を実船で行うことは困難である。

したがって、表示情報の支援効果はパソコンを使った実験室での模擬実験で、また、警報情報の支援効果は実船調査で検討^{25), 26), 27)}した。

更に、音声入力の音声認識率は実験室で調査した。

4.1 実験方法

評価実験の内容は、次の通りである。

4.1.1 表示情報の支援効果に関する実験

評価実験は、①表示情報の判読作業負担に関する実験と、②衝突事故予防の操船への支援効果に関する実験に分けて行った。

両者とも、ARPAシステムの本質を変えない様にCRTディスプレイ上にARPA画面を模擬した簡易シミュレータで、支援方式の異なる在来の先航ベクトル表示方式(「在来型表示方式」と言う)と、他船の先航ベクトルと潜在的衝突危険海域を併せて表示する新型ARPA(「新型表示方式」と言う)につて、比較検討した。

a) 表示情報の判読作業負担に関する実験

表示情報の判読作業負担に関する実験フローを図-4.1に示した。

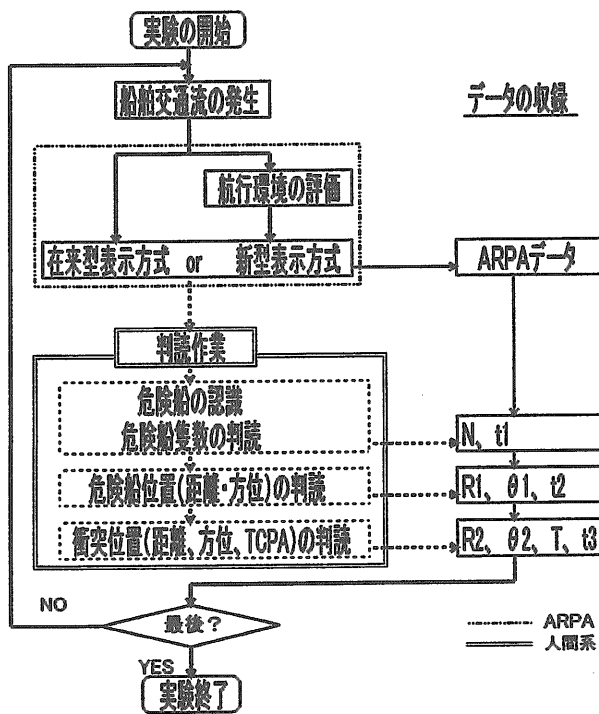


図-4.1 表示情報の判読作業負担に関する実験

船舶交通流の発生条件は、発生位置、衝突地点、速力、衝突危険船の発生隻数を乱数で設定して、他船は直進航行するものとした。

実験では、被験者が在来型表示方式と新型表示方式の表示画面を観て、その都度、衝突地点(PCP: Potential Collision Point)が針路上0.5nm以内にある危険船に関する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作業を各表示方式について約200回繰り返して行い、入力時間と入力値を収集した。そして、判読時間は、入力作業時間と判読作業時間の和として取り扱った。

表示情報の判読項目は、次の通りである。

- ①危険船の隻数(N)の判読
- ②危険船の現在位置(距離: R_1 、方位: θ_1)の判読
- ③危険船の衝突位置(距離: R_2 、方位: θ_2 、最接近時間: T)の判読

解析は、表示情報の判読時間、危険船隻数増加に伴う1隻当たりの判読時間の変化、判読誤差について行った。

実験で使用したARPAの表示方式の内容は、次の通りである。

- ①在来型表示方式: 他船の真運動の先航ベクトルを表示する方式
- ②新型表示方式: 他船の真運動の先航ベクトルと潜在的衝突危険領域、衝突予測位置方位、最接近距離を表示する方式

なお、判読実験の対象となった被験者は、一般大学生である。

b) 衝突事故予防の操船への支援効果に関する実験

衝突事故予防の操船への支援効果に関する実験フローを図-4.2に示した

評価実験は、操船者が表示情報から受け取る画像情報を基に避航操船を行った場合の操船支援効果について行った。

船舶交通流の発生条件は、発生位置、衝突地点、速力、衝突危険船の発生隻数を乱数で設定して、他船は直進航行するものとした。

被験者は、10秒毎に更新されるCRTディスプレイ上に表示されるARPAの表示画面を見て、操船時には危険船に対する避航操船量(避航操船針路; Φ と速力; V)をキーボードで入力して、目標地点に達するまで試行操船を、それぞれの表示方式について約140回繰り返して行った。そして、操船入力の拘束条件としては、前回の操船入力量が90%以上に達成するまでは次の操船入力を受け付けない事とした。

更に、実験の被験船は全長を65m、105mの2種類として、運動性能特性は統計的操縦性能特性¹²⁾を用いた。なお、シミュレータ実験の被験者は一般大学生である。

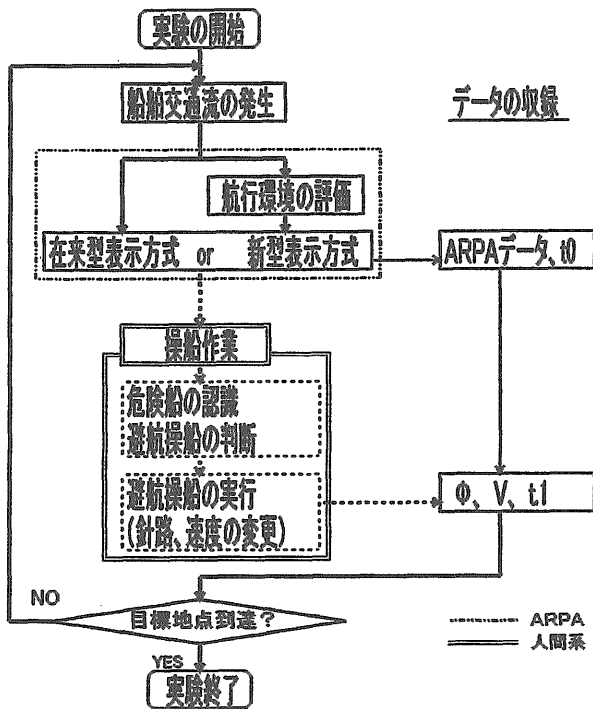


図-4.2 表示情報の衝突予防支援効果に関する実験

解析は、衝突予防の支援効果に関わる被験船周りの相対航跡密度分布による避航領域、衝突事故率、目的地までの通過遅れ時間率、操船回数等について行った。

なお、実験で使用したARPAの表示方式は、次の通りである。

- ① 在来型表示方式1：他船の相対運動の先航ベクトル表示方式
- ② 在来型表示方式2：他船の真運動と相対運動の先航ベクトルを併せて表示する方式
- ③ 新型表示方式：他船の真運動の先航ベクトルと潜在的衝突危険領域、衝突予測位置方位、最接近距離を表示する方式

4.1.2 警報情報の支援効果に関する実験

警報の支援効果に関わる評価実験は、「警報の発生状況」と、「画像と音声警報の参照度合い」の調査を実船で実施した^{9),10)}。

(1) 警報発生状況

警報発生状況の調査は、従来のARPA警報と、航行環境を評価して発生した音声警報の発生状況を「銀河丸」の東京港から大阪港間の航海経路で行った。また、解析では、警報の発生頻度を比較して、不要警報発生の低減効果を調べた。

(2) 画像と音声警報の参照度合い

画像と音声警報の参照度合いに関する調査は、「銀河丸」と「こがね丸」の航海経路（銀河丸：東京港から大阪港間、こがね丸：大阪港から別府港間）を利用し

て、操船者による主観的評価量をアンケートと内省報告で調べた。

4.1.3 音声入力方式による音声認識率の実験

操船者がARPA情報を入手する対象は、見張りを継続して行う必要がある目標に限定して、機能動作時の音声認識率を実験により調査⁹⁾した。

なお、音声認識部としては、SR15（NEC製）を使用したので使用する人があらかじめ入力音声を登録した後、音声認識装置として使用した。

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

a) 表示情報の判読時間

ARPA画面から危険船隻数、危険船の現在位置、衝突位置、最接近時間（TCPA）等の見張り情報を収集するために要した判読時間分布を図-4.3に示した。また、図-4.3の縦軸は判読時間の頻度、横軸は判読時間、また、上から順に a) 危険船隻数、b) 現在位置、c) 衝突位置と最接近時間、d) 全体の和の総合判読時間として、平均判読時間 t と標準偏差 σ を併せて示した。

新型表示方式の判読時間は、在来型表示方式に比較して、いずれの判読時間も、また、頻度の分散も小さい。更に、総合判読時間は平均値比で57%（ $36.9\text{sec}/64.6\text{sec}$ ）、標準偏差比で35%（ $8.9\text{sec}/25.1\text{sec}$ ）改善する。

b) 衝突危険船の増加に伴う1隻当たり情報の判読時間の変化

衝突危険船の隻数増加に伴う1隻当たり情報の判読時間の変化は、在来型表示方式で危険船が1隻の場合の判読時間（約34.6秒）を基準に取って、縦軸に危険船隻数が異なる場合の相対的判読時間比を比較して、図-4.4に示した。

衝突危険船の増加に伴う判読時間の増加率は新型表示方式では小さい。しかし、在来型表示方式では危険船隻数の増加に伴って1隻当たりの判読時間が大きく増加することが分かった。

この理由としては、新型表示方式では画面上に表示された潜在的衝突危険領域の位置情報を判読するが、在来型表示方式では速度ベクトルから衝突位置を推測して判読するために、衝突危険船の隻数が増加するのに伴い判読作業負担が増加して、表示情報の判読時間が長くなるものと考えた。

したがって、新型ARPAは在来型に比較して、危険船の発生頻度が高い海域において、表示情報の判読作業負担が軽減されるものと考えた。

なお、ここで述べる一隻の判読情報は、現在位置の距離方位、衝突位置の距離方位、TCPAである。

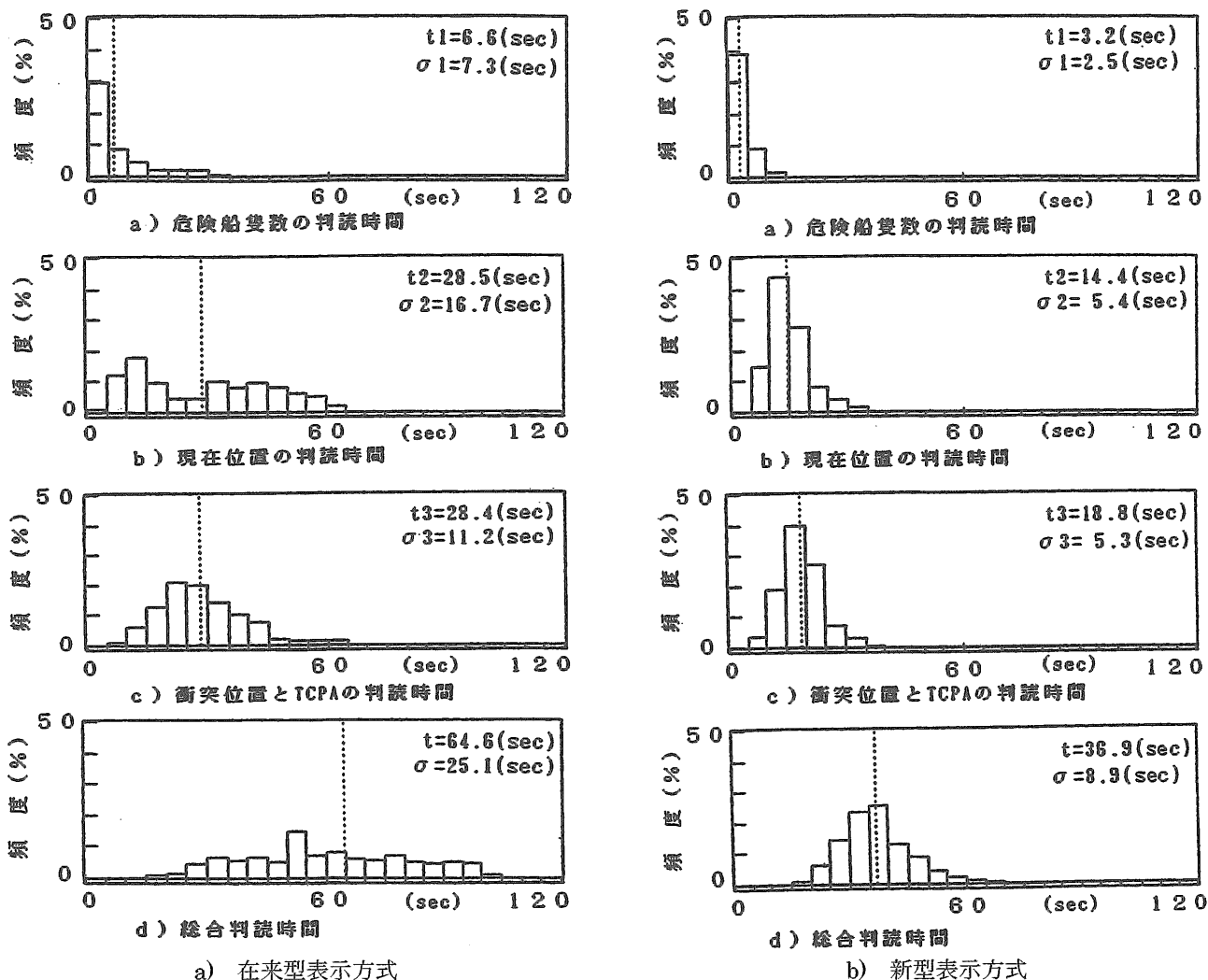


図-4.3 表示方式による判読時間の比較

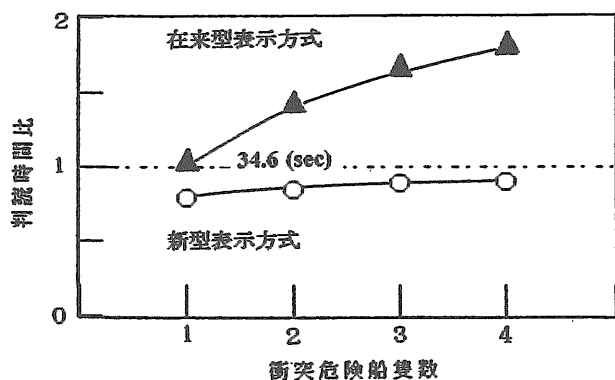


図-4.4 危険船隻数増加に伴う1隻当たり情報の判読時間の変化

c) 表示情報の判読誤差

新型表示方式の表示情報の判読誤差は、個々の情報単位が違うため、在来型表示方式の平均誤差(外側)を基準に取って規格化して、図-4.5に示した。

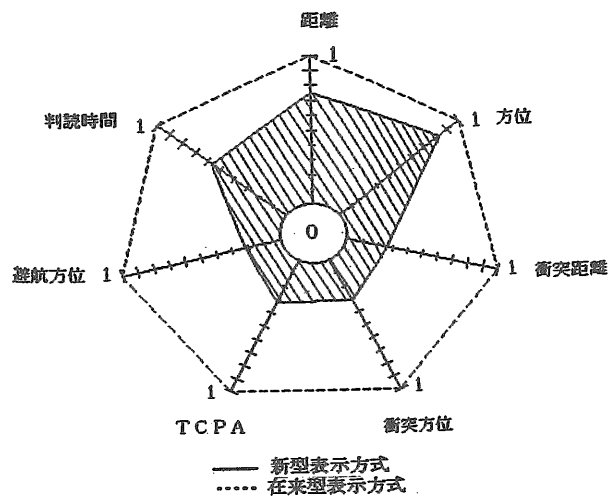


図-4.5 表示方式による判読誤差の比較

判読誤差は、現在位置情報の処理に関しては大きな差は認められない。

しかし、衝突位置と避航領域及び最接近時間については、新型表示方式の方が小さくなり、表示情報の判読精度の改善効果が大きいことが分かった。

即ち、新型表示方式では在来型表示方式に比較して、次の点で改善が認められた。

- ①平均判読誤差は約53%小さくなるので、避航操船の判断がより正確に行われる。
- ②判読時間と判読誤差が改善するので表示情報の判読に伴う作業負担は、軽減される。

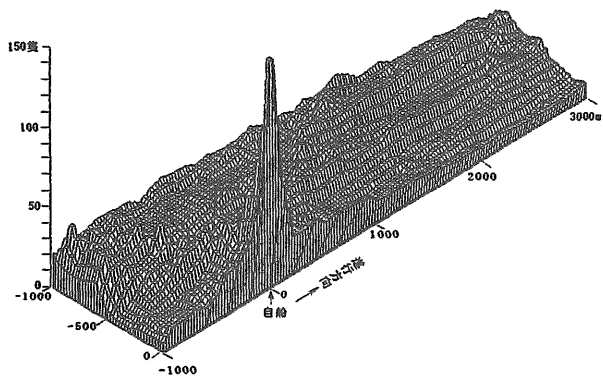
4.2.2 衝突事故の予防と避航操船への支援効果

a) 船舶交通流設定条件の航跡密度分布

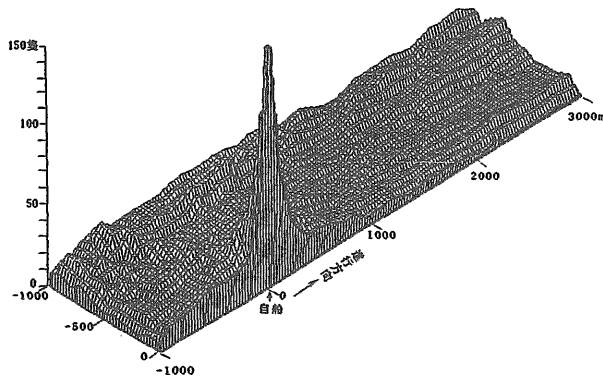
本実験で被験船が避航せずに直進して航行した場合に得られる、設定船舶交通流の相対航跡密度分布を図-4.6に示した。

図-4.6の航跡密度分布は、被験船が避航せずに直進して航行した場合には衝突または接近する船が多数存在することを示している。

実験において被験船は、例えば、左舷より接近する横切り船と反航船に対して、図-4.7に示す様に避航操船を行った。



a) 船種3 (L=65m)



b) 船種5 (L=105m)

図-4.6 設定交通流の潜在的相対航跡密度分布

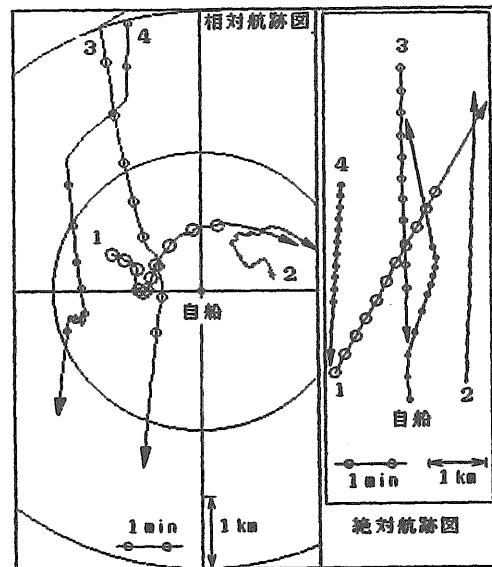


図-4.7 避航操船に伴う相対航跡例

そして、衝突事故予防の操船への支援効果は、相手船の相対航跡密度分布で形成される避航領域の形状と衝突事故率、通過遅れ時間率、避航操船回数等を評価した。

b) 衝突事故の予防効果

表示情報を基に避航操船を行った結果の相対航跡密度分布の形状を図-4.8に示した。

図-4.8は相手船との相対距離を被験船の長さで無次元化した被験船の左舷側の航跡密度分布(航跡数/船の長さの平方)を、また、図-4.9は被験船の船首方向の航跡密度分布を、上から順に①在来型表示方式1, ②在来型表示方式2, ③新型表示方式として、被験船の船舶長がL=65m (図-4.8.a)), L=105m (図-4.8.b)) の場合を示している。

図-4.8と図-4.9の新型表示方式では在来型表示方式に比較して、自船近傍の相対航跡密度分布で他船の侵入を避ける避航領域の形成が明確であり、安全な避航領域が確保されているので衝突予防支援効果が大きいことが分かった。

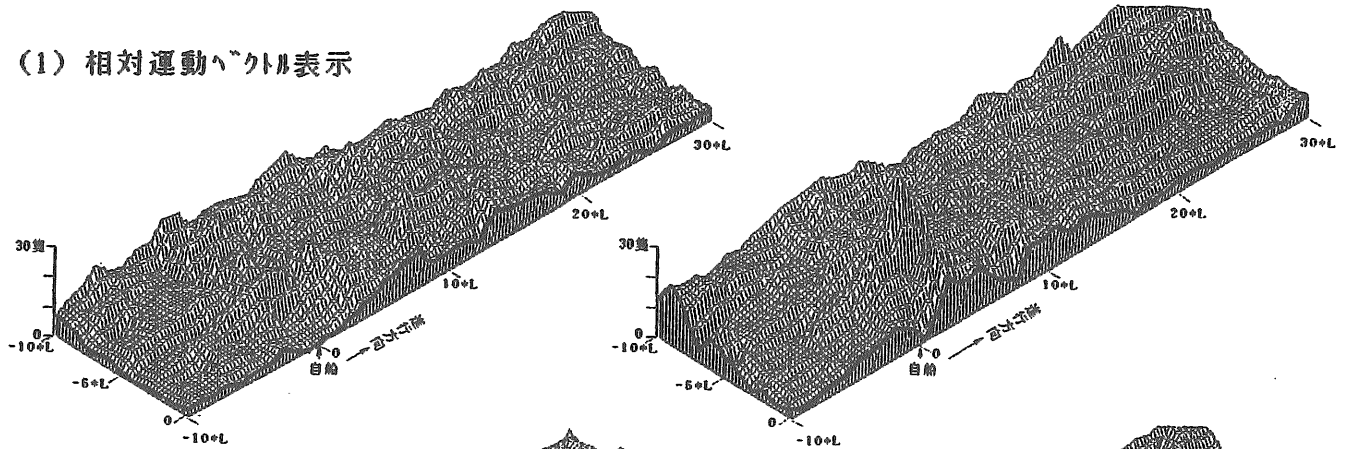
すなわち、実験で得られた他船の侵入を避ける避航領域の形状の違いは、被験者による表示情報の判断基準が同様であるとすれば、ARPAの表示画面から受け取る情報伝達量の有意差を表しているものと考えた。

更に、在来型では避航判断に関する支援情報が不足しているために、避航操船の判断量にバラツキが生じて、避航方位と避航操船の判断時期を誤り、安全な避航領域を確保できなかったものと解釈した。

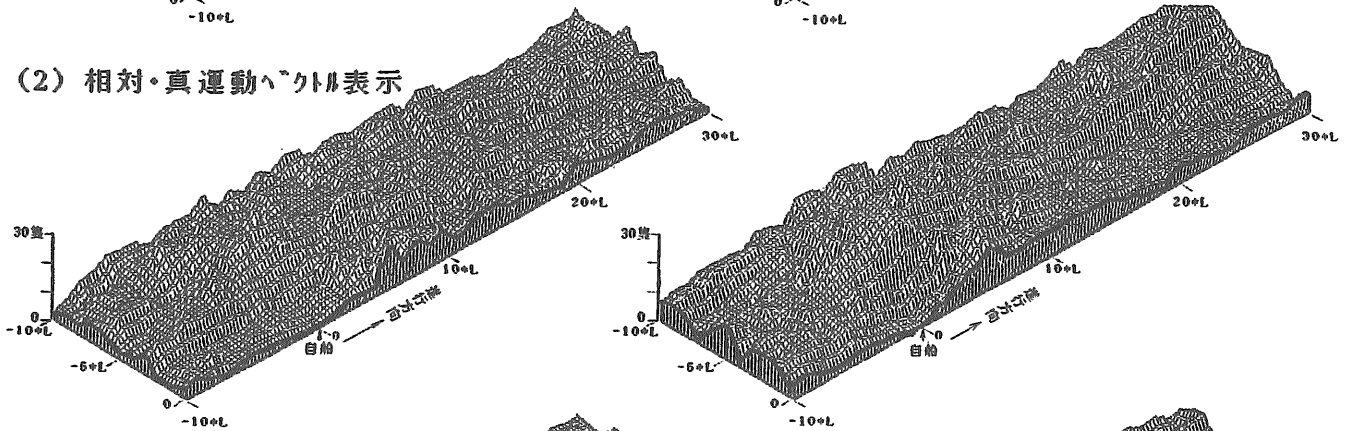
c) 操船への支援効果

各表示方式に対する操船への支援効果は衝突事故

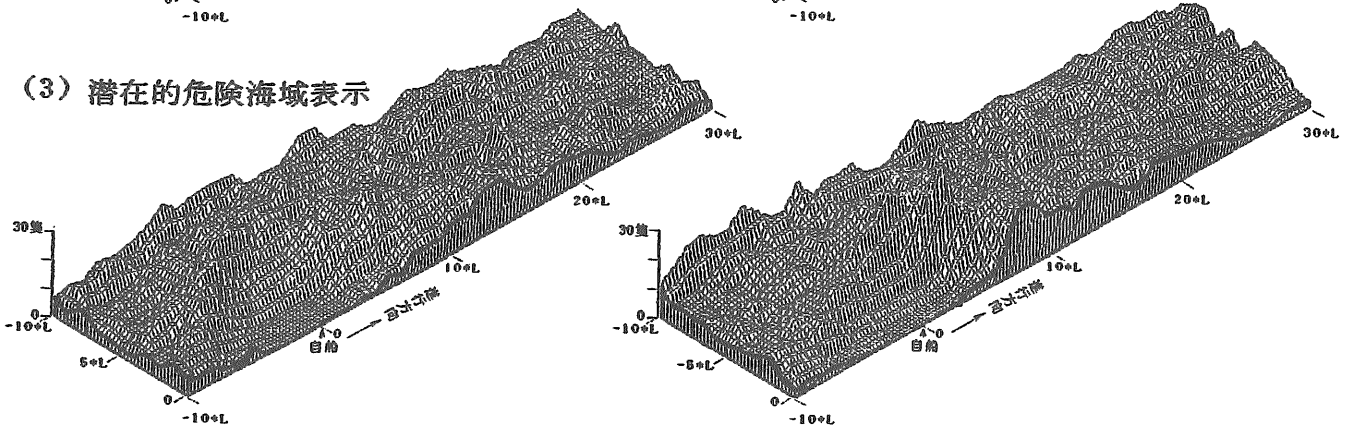
(1) 相対運動ベクトル表示



(2) 相対・真運動ベクトル表示



(3) 潜在的危険海域表示



a) 船種3 (L=65m)

b) 船種5 (L=105m)

図-4.8 表示情報による相対航跡密度分布の比較

率、通過遅れ時間率、避航操船回数を、船種別に比較して、図-4.10に示した。

図-4.10の新型表示方式では衝突事故を未然に防止しているが、在来型表示方式では約3% (船種3) から約11% (船種5) の範囲で衝突事故が発生している。また、通過遅れ時間率と操船回数は、新型表示方式の方が小さい値を示している。

したがって、新型表示方式では、支援情報が効率良く被験者に伝達しているために、避航操船のやり直しが少なくなって、通過遅れ時間率、衝突事故率が改善して、操船への支援効果が向上したものと考えた。

なお、衝突事故率と通過遅れ時間の定義は、次の通りである。

衝突危険船の発生条件では、危険船の最接近距離を被験船と相手船の長さの和の範囲に設定したので、ここでは他船の航過距離が両船の長さの和より短い場合を衝突事故船と定義して、衝突事故率は式 (4.1) で、通過遅れ時間は式 (4.2) で与えた。

$$\text{衝突事故率} = (\text{衝突事故船隻数} / \text{衝突事故船の潜在隻数}) \cdot 100 \quad (4.1)$$

$$\text{通過遅れ時間率} = (\text{操船通過時間} / \text{直線距離通過時間} - 1) \cdot 100 \quad (4.2)$$

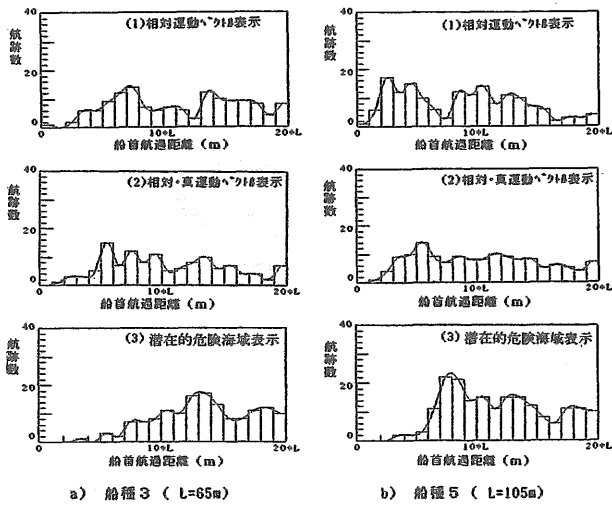


図-4.9 表示情報による船首方向の相対航跡密度分布

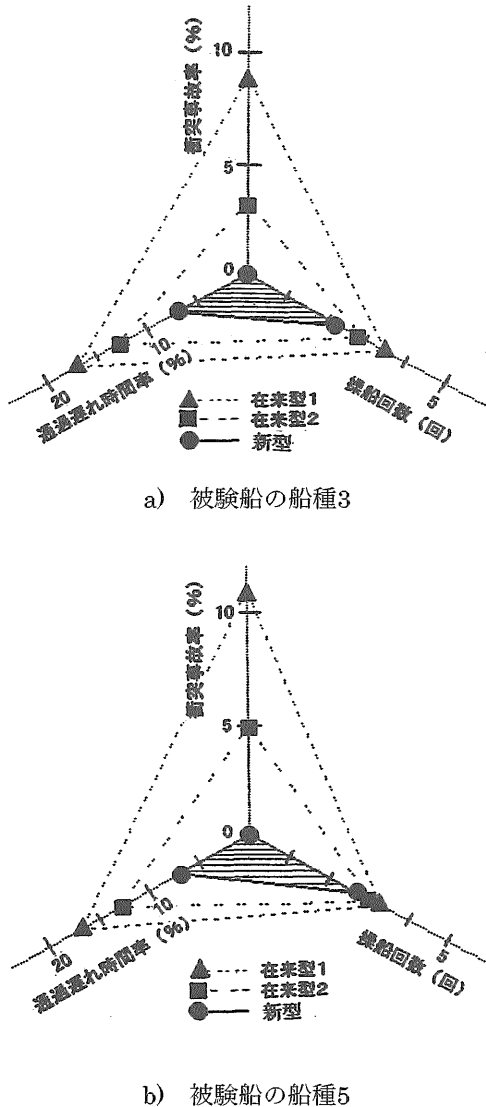


図-4.10 表示方式による支援効果の比較

4.2.3 警報情報の支援効果

警報情報の支援効果は、①警報の発生状況と、②画像と音声警報の参照度合いについて示した。

a) 警報の発生状況

1) ロスト警報

ARPAのロスト目標警報の発生状況を図-4.11に示した。調査時間は延約226時間、捕捉隻数2,891隻である。

在来ARPAではロスト目標警報が1,919隻発生して、1時間当たり平均で8.5隻発生しているの、輻輳海域で全てのロスト目標警報について確認を行うとすると繁雑な作業になる。

一方、新型ARPAの音声ロスト警報は41隻に減って、従来型ロスト目標警報の約2%に低減する。また、音声警報からロスト目標の確認を行うことは実行可能な値であることが分かった。

即ち、ロスト目標船舶の航行状態を評価すると、ロスト目標の中で潜在的衝突危険海域に針路を採って航行したことのある潜在的衝突危険船舶は174隻で、ロスト目標警報の9%に減少する。更に、潜在的衝突危険船舶の中で最接近時間:TCPAが負のロスト目標を除くと、警報を発生する必要があるロスト目標は41隻になる。

したがって、図-4.11は、航行状態を評価して警報を発生することにより、不要な警報の発生頻度が低くなって、警報の信頼性が向上することが分かった。

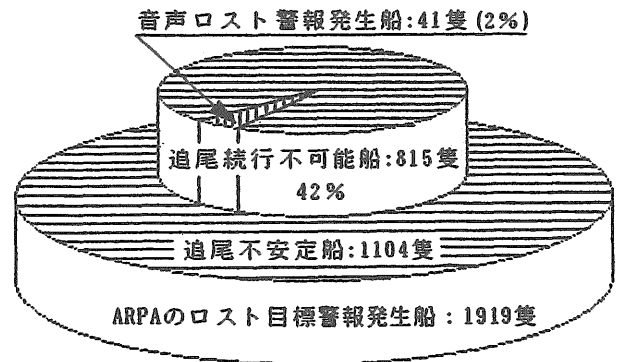


図-4.11 音声ロスト警報の発生状況

2) 危険目標警報

危険目標に対する音声警報の発生状況を図-4.12に示した。

調査の結果、音声による警報の確認作業が可能であることが分かった。

即ち、警報の発生状況は、次の通りである。

①見張り目標警報

見張り目標警報は特に多く発生して、危険目標警報の82%を占めている。

この見張り警報が多い理由は、次の様に分類で

きる。

◇捕捉初期のベクトル変動誤差が大きいために生じる警報は、捕捉初期データ誤差の影響により警報の対象になるが、捕捉が安定した状態では警報の対象から外れることが多い。

◇航路が曲がる海域で発生する警報は、航路の形状が湾曲する海域で一時的に見会い状態が生じることにより発生するもので、操船者は相手船が航路変更することを予想している場合が多い。

②注意警報と危険警報

注意警報は54隻、危険警報は21隻発生している。これらの船舶は、操船者による見張りの対象になっていて、警報の確認を直ちに行うことが可能であることが分かった。

したがって、見張り目標警報の発生条件の設定に関しては、今後更に検討が必要である。

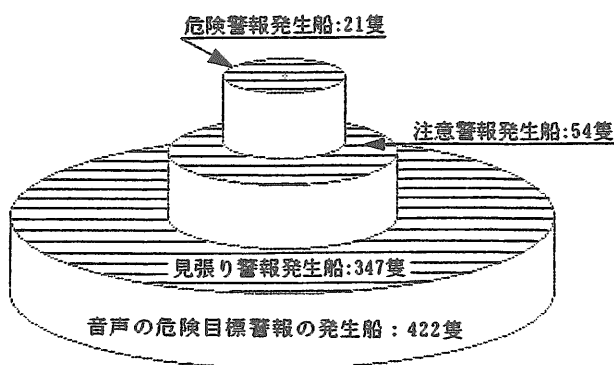


図-4.12 音声危険目標警報の発生状況

b) 危険海域表示情報と音声警報情報の参照度合い

画像と音声による警報情報の参照度合いの調査は、避航対象船の主観的危険度の判断項目を「警報の聞き取りによる情報伝達状況」と、「操船者の主観的評価を基にした警報の参照度合い」について行った。

操船者による航行の危険性の主観的評価は大藤氏²⁸⁾の評価量に準じて、表-4.1.a)の4段階に分けた。また、警報の参照度合いは表-4.1.b)の3段階に分けて、更に、操船者の内省報告による聞き取り調査を実施した。

操船者の主観的評価内容を表-4.2に示した。表-4.2の画像と音声による警報は、反航船の場合よりも、避航判断が難しい横切り船や追い越し船の場合に参照されていることが分かった。

更に、内省報告では、次のことが分かった。

(1) 衝突危険海域表示情報

次の航行環境を把握する場合に有効性が認められた。

①避航操船時の避航海域を迅速かつ精度良く把握で

表-4.1 航行状況の主観的評価指標

a) 航行状態の主観的評価

1	衝突のおそれは無いが余裕を見て避航する
2	衝突のおそれを生ずる可能性がある
3	衝突のおそれがある
4	衝突の危険性がある

b) 警報の参照度合い

1	全く参考にしない
2	少し参考にした
3	大変参考にした

表-4.2 警報の参照度合い

航行状態	操船者の主観的評価				
	見合状況	着目船隻数	危険評価	画像警報	音声警報
反航船		2	1	1	1
		1	2	1	1
		1	2	1	1
		1	2	1	1
		2	2	1	1
		1	2	2	1
		3	3	2	1
		2	3	2	2
横切り船		1	1	1	2
		1	2	2	2
		3	2	2	2
		2	2	1	1
		1	3	1	1
		1	3	1	1
		1	3	2	2
		1	3	3	2
		2	3	2	2
		3	3	2	2
漁船 追越し船 滞留船		1	2	1	1
		1	2	2	2
		2	3	2	2

きる。

②視界制限状態において、視認できない他船との避航領域の動静を知ることができる。

③自船が針路保持船であって、他船の避航動作が遅れている様な状況下で、自船の避航海域を判断することができる。

(2) 音声警報

従来方式と比較すると、次の点で改善が認められた。

①ARPAから離れて見張り以外の作業に従事している時でも、警報の指示内容を聴覚に容易に把握する事が可能である。

②操船者は警報の種類、注意すべき船舶の所在位置、見会い状況、予測航過状況の支援情報を正確に把握できるので、従来方式と比較して、警報の情報伝達時間の高速化が図られる。

③音声による警報を基に、画像警報への注意喚起が出来るため、画像や文字の情報をより効果的に活用することが可能である。

4.2.4 ARPA情報入手時の音声認識率

ARPAへの音声入力部は試作機では導入したが、実証機ではコマンド入力方式として音声入力部は導入しなかったため、ここでは試作機の音声認識率を示した。

音声コマンドに対する音声認識率を、表-4.3に示した。なお、試行回数100回である。

ARPA情報を音声認識入力で入手する方式は、可能であり有効であるが、音声認識時に誤認識が発生することもあった。

実験の結果、数字の音声認識率は単語の音声認識率に比較して低く、次に示す場合には更に認識率が低下することが分かった。

- ①音声認識率はマイクを口元から遠ざけるほど低下する。したがって、マイクと口元の距離を一定に保つ必要がある。
- ②外部の高い騒音によっても誤認識が発生する。
- ③音声認識率は音声認識装置の性能と使用環境に左右されることがある。

したがって、音声認識率は、音声認識装置の性能と使用環境に左右されることがあるため、音声コマンドでARPA情報を入手する場合、誤認識が発生しやすい環境では安全性を考慮して、コマンドキーを用いた入力方式を併用して誤動作を避けるべきであると考えた。

表-4.3 音声の認識率

音声言語	認識率	音声言語	認識率
0番船	100 (%)	危険船は	100 (%)
1番船	99	継続	100
2番船	85	中断	100
3番船	89	中止	100
4番船	82		
5番船	94		
DCPAは	89 (%)	航過距離は	100 (%)
TCPAは	96	接近時間は	100
Distanceは	100	距離は	100
Bearingは	100	方位は	100

4.3 まとめ

航行環境を評価して危険船に関する見張りや警報の情報を音声と、衝突の潜在的危険海域の画像情報を用いて支援する方式は、衝突予防援助システムに活用でき、かつ次の点で有効であることが分かった。

- ①潜在的衝突危険海域情報の表示方式は、衝突事故を予防して、視覚情報処理の負担を低減する。
- ②音声警報情報指示方式は、警報情報収集の迅速化と、情報伝達効率を改善する。
- ③航行環境評価機能は、不要な警報の低減と警報の

信頼性を向上する。

- ④ARPA情報の音声入手時の音声認識率は、今後向上する必要がある。

したがって、音声と画像を用いた支援方式は、少数化された内航船の船橋において有効であり、また、居眠り防止の効果も期待できるものと考えた。

更に、見張り目標警報の発生条件の設定に関しては、今後更に検討が必要であることが分かった。

5. あとがき

衝突予防援助装置の操船判断支援機能の向上を図る為、航行環境評価指標に船舶の操縦性能特性を採り入れて、音声と画像を用いて支援情報を提供する新型ARPAを開発した。

考察の結果、航行環境評価指標に船舶の操縦性能特性を取り入れて、見張り情報や警報の意味・内容を音声と画像情報を提供する新型ARPAは有効であることが分かった。

考察の結果は、次の通りである。

- ①ARPAで相手船の船舶長を約30mの誤差で推定できる。
- ②ARPAで測定した相手船の船舶長と速力で、操縦性能を計算して避航領域を推定する支援方式は、新型ARPAの航行環境評価指標に活用でき有効である。
- ③見張りの警報情報を音声と、潜在的衝突危険海域情報で提供する支援方式は、操船者に、支援情報を迅速、かつ正確に効率良く伝達するので、衝突予防援助システムに活用でき、かつ有効である。
- ④現状のARPAでは、捕捉追尾目標の乗り移りや、捕捉データに誤差が生じる問題が残っているので、安全性の観点から、最終的には操船者自身が見張りで航行状態を確認する必要があることも分かった。

したがって、今後は、ARPA情報の精度向上を図るために、新型ARPAの他船情報の入手部分に、将来実用化が予測される自動船舶識別システム (AIS) の他船データを取り込んで、ARPA機能の高度化を図る予定である。

謝辞

本研究の実施に当たり、貴重な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、レーダARPAメーカー、日本無線株式会社他関係者、実船調査でご尽力頂いた航海訓練所(青雲丸、銀河丸)、関西汽船株式会社、阪九汽船株式会社の各位、研究の御指導を賜った山田一成氏に、厚くお礼を述べる。

参考文献

- 1) 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、平成10年9月、pp. 12～17
- 2) 海難審判協会：海難審判の現状 (昭和58, 60, 62年)
- 3) 鍋島正昭：衝突海難の背景について、海と安全、1993, 11, p2～8
- 4) 有村他：船舶交通流のマン・マシンシステムの一考察、一実船調査による避航時のレーダ写真解析一、船舶技術研究所報告、1988、Vol.25, No, 3、pp. 305～321
- 5) 小林弘明、遠藤真：船舶避航操縦の解析、一人間・機械系解析の観点より一、日本航海学会論文集56号、昭51-12、pp. 101～109
- 6) 有村他：アドバンスARPAの標準化に関するアンケート調査の考察、船研発表会講演集、第62回、平成5年12月
- 7) シップアンド・オーシャン財団：内航船の近代化に関する研究報告、平成6年3月、pp. 54～55
- 8) 有村他：航行環境情報の表示方式に関する考察一Ⅲ、一音声支援システムについて一、日本航海学会論文集、第87号、平成4年5月、pp. 89～97
- 9) 有村他：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、平成4年、pp. 13～32
- 10) 今津隼馬他：変針動作による避航限界の研究、日本航海学会論文集、第82号、平成2年、pp. 77～84
- 11) 今津隼馬：船舶航行と操縦性能、日本造船学会運動性能研究委員会、第10回シンポジウム、平成5年12月、pp. 107-119
- 12) 有村他：船舶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89号、平成5年5月、pp. 237～243
- 13) 杉山高一：多変量データ解析入門、朝倉書店、1996, 11
- 14) 門野明他：旋回性能について、西部造船学会会報、56号、pp. 23～31、昭和53年5月
- 15) 芳村康男：操縦性基準における停止性能の検討、日本造船学会論文集、第176号、平成6年11月
- 16) 日本海事協会：船舶の停止性能について、pp. 1～6、昭和54年2月
- 17) 佐藤裕司：海上ニアミス回避システムへのアプローチ、計測と自動制御学会論文、Vol32、No3、1996年、pp. 401～408
- 18) 吉村義弘：レーダ工学の基礎、啓学出版、1975年8月
- 19) 日本船舶明細書：日本海運集会所、平成4年度出版
- 20) 日本内航船舶明細書：日本海運集会所、平成4年度出版
- 21) 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10月、pp.213～223
- 22) 有村他：航行環境評価指標に関する一考察、実船の航跡データを用いた避航領域の提示一、船研発表会講演集、第72回、平成10年12月、pp. 247～252
- 23) 藤井弥平：海上交通工学序説、海文堂出版、昭和46年
- 24) 橋本進：視覚情報とヒューマンエラー、海分堂、平成8年
- 25) 有村他：航行環境情報の表示方式に関する考察、日本航海学会論文集、第82号、平成元年10月、pp. 93～101
- 26) 有村他：新しい衝突予防支援装置の開発一Ⅱ、安全性の評価に関する考察、船研発表会講演集、第66回、平成7年12月、pp. 189～192
- 27) 有村他：航行環境情報の表示方式に関する考察一Ⅱ、一実船調査によるARPA情報の解析一、日本航海学会論文集、第86号、平成3年5月、pp. 325～335
- 28) 大藤高広、原潔：決定木最適化報による避航操船に関する知識構造、日本航海学会論文集、84号、平成2年10月、pp. 29～36

付録 船舶の諸元及び操縦性能特性

海上交通の観測者が、通常のレーダや目視観測で得ることができる他船情報は、船舶の長さや速力に関する情報であるため、航行船舶の判断資料として、船舶の諸元及び統計的性能特性を以下に示した。

1. 船舶の全長と諸元の関係

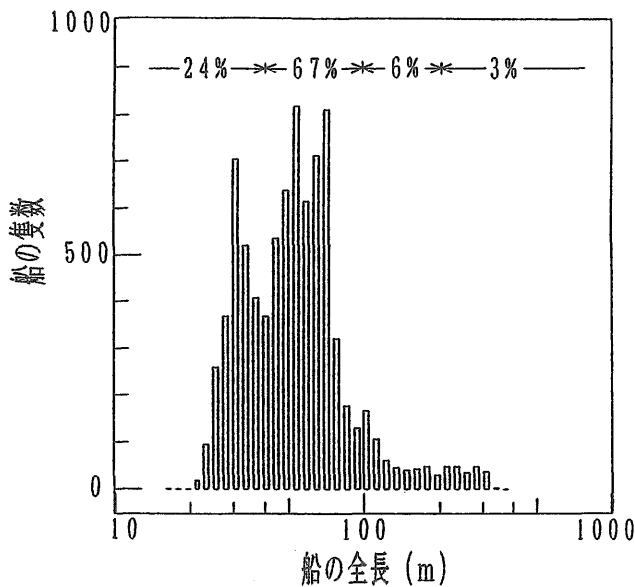
ここで、使用した船舶の諸元統計データは、海運集会所発行の「日本船舶明細書¹⁹⁾；3042隻」と「日本内航船舶明細書²⁰⁾；5240隻」で、これから100トン以上40万トン未満の船舶（8,282隻）の各船毎の船舶全長；L、総トン数；G_T、航海速力；V、型幅；B、型深さ；Dなどの船舶の諸元を得た。また、船舶の形状パターンは船の大きさによってあまり変わらないと仮定すると、 $G_T \propto L^3$ 、 $D \propto L$ 、 $B \propto L$ と考えられるので、常用対数logLとlogG_T、logD、logBの相関を調べた。

なお、両日本船舶明細書では、木船と100トン未満の鋼船及び500トン未満の漁船等は除外されている。

解析で使用した統計データの全長別隻数分布を図一付1に示した。

船舶の全長は15mから400mの広い範囲にわたるが、100m未満の船が全船舶の91%を占めており、残りの9%が100m以上の船となっている。

更に、先に示した船舶明細書では100トン未満の小型船を除外していることを考慮すると、この範囲の船舶はさらに増加するものと考えられる。

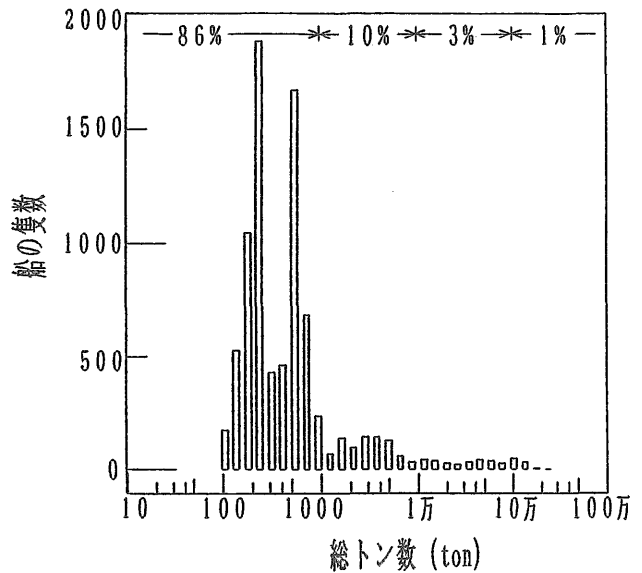


図一付1 船舶の全長の分布

- a) 全長と総トン数の関係
- 1) 総トン数の隻数分布

船舶の総トン数別隻数分布を図一付2に示した。

1000トン未満の船舶は全船舶の約86%、1000トン



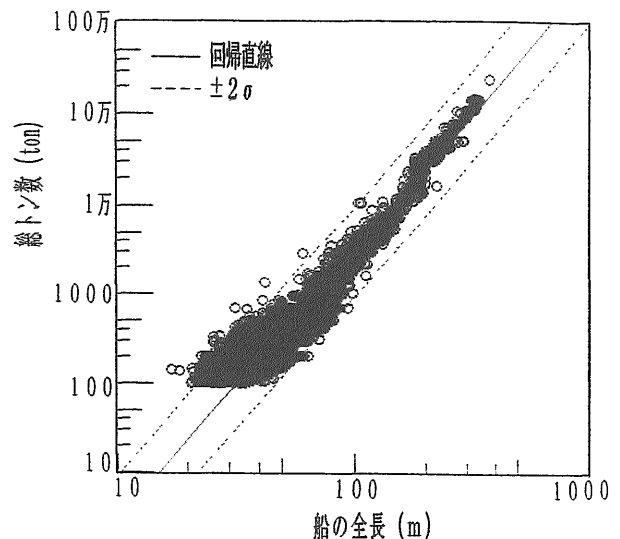
図一付2 船舶の総トン数の分布

～3000トンは5%、3000トン以上は9%ある。また、隻数が多い総トン数分布は200トンと500トン及び700トンの近傍に存在している。これらの総トン数分布が多い理由としては、199トン、499トン、699トンで、船に掛かる税金や着岸料金、登録料金、建造枠等が異なることが影響しているものと考えられる。

そして、1万トン以上の船舶は4%と少ないが、この値の他に外国籍の船舶が加わることを考慮すれば日本近海で航行している船舶はもう少し増加するものと考えられる。

2) 全長と総トン数の相関

船舶の全長と総トン数の関係を図一付3に、また、



図一付3 船舶の全長と総トン数の関係

総トン数； G_T の回帰式は式(1)に示した。

$$\log G_T = 2.669 \log L - 2.011, \quad \sigma = \pm 0.212 \quad (1)$$

回帰式の相関係数は $r = 0.92$ 、 $t = 218$ 、 σ は標準偏差である。

なお、図一付3の実線は $\log G_T$ の $\log L$ 上への回帰直線で、点線は $\pm 2\sigma$ の値を示す。また、回帰直線より $\pm 2\sigma$ 離れたものはほとんどが押船や曳船等である。

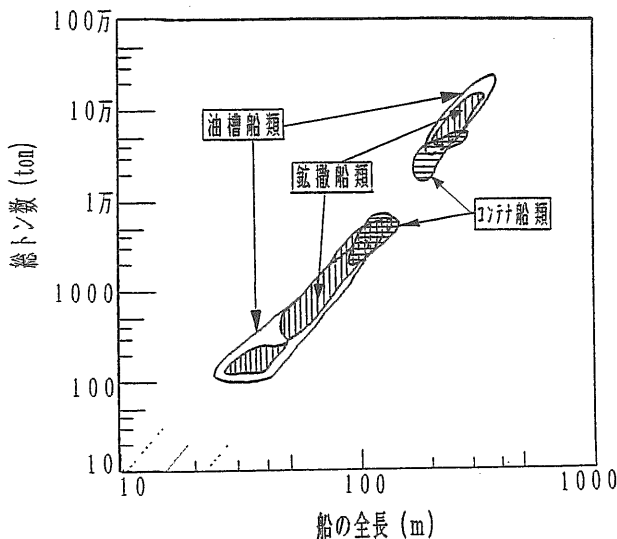
3) 船種分類別の全長と総トン数の関係

船舶の種類は46種に分類されているので、ここでは船種の分類を表一付1の様に7種類に区別して割合と分布傾向を示した。また、船種分類別分布を図一付

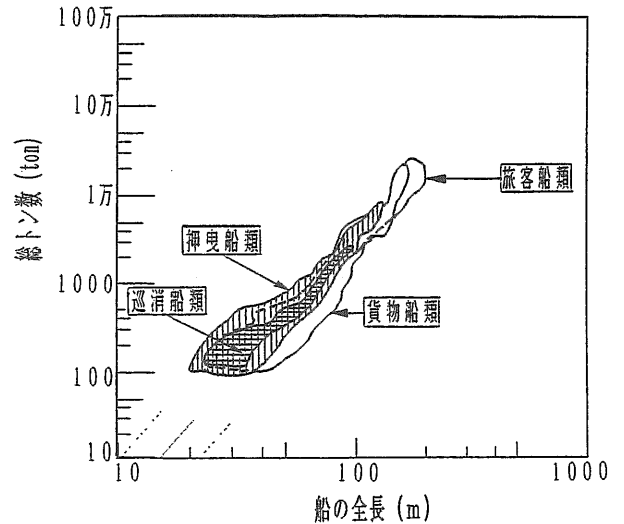
表一付1 海運集会所データにおける船種の分類と割合

船種の分類	船種	隻数	比率 (%)
1. コンテナ船	自動車運搬船・コンテナ船	157	1.9
2. 油槽船	油槽船・鉱油・OBO・撤油・ ガス・液化ガス運搬船	1,743	21.1
3. 鉱撤船	鉱撤・鉱炭・炭・撤・鋼材・ ペレット・コーク・ボーキサイト運搬船	552	6.7
4. 貨物船	貨物・曳重船・スクラップ・セメント・ コークス・灰・土砂・石材・木材・ パルプ・チップ・穀物・塩・ 冷凍運搬船	3,301	39.9
5. 旅客船	旅客・フェリー	790	9.5
6. 押曳船	ロー・押曳船・特殊・起重・ 渡津船	1,514	18.2
7. 巡消船	巡・消・救・観・測・加工・ 給水船	225	2.7
合計		8,282	

* 100ト未満の鋼船、木船及び500ト未満の漁船は除外されています。



図一付4 船種別全長と総トン数の関係 (油槽船類、鉱撤船類、コンテナ船類)



図一付5 船種別全長と総トン数の関係 (巡消船類、貨物船類、旅客船類、押曳船類)

表一付2 船種別の全長と総トン数の関係

種類	単回帰式 (ton)	標準偏差 (σ)	相関係数 (r)	係数の t 値	データ数 (隻)
1. コンテナ船類	$\log G_T = 3.422 \log L - 3.496$	± 0.121	0.97	60.07	157
2. 油槽船類	$\log G_T = 2.941 \log L - 2.485$	± 0.135	0.97	192.53	1743
3. 鉱撤船類	$\log G_T = 3.072 \log L - 2.638$	± 0.092	0.99	177.62	552
4. 貨物船類	$\log G_T = 2.316 \log L - 1.511$	± 0.192	0.84	92.73	3301
5. 旅客船類	$\log G_T = 2.425 \log L - 1.402$	± 0.140	0.97	119.18	790
6. 押曳船類	$\log G_T = 2.011 \log L - 0.735$	± 0.130	0.89	80.12	1514
7. 巡消船類	$\log G_T = 1.939 \log L - 0.702$	± 0.133	0.94	42.94	225

4、図一付5に示した。

図一付4によると、コンテナ船類、鉱撤船類、油槽船類では長さ約200m、総トン数1万トンを境に内航船と外航船が分れている。また、図一付5の貨物船、旅客船は約2万トンを上限として分布する。

更に、船種分類別の全長と総トン数に係る回帰式は、表一付2で示すように用途により諸元と相関係数 r 、 t 値に相違が認められた。

例えば、総トン数 G_T は、コンテナ船類では全長の3.422乗に比例しているが、巡消船類の船舶では全長の1.939乗に比例しており小さくなっている。

したがって、船種によって全長に対する総トン数の分布傾向が異なる。

b) 全長と型幅の相関

船舶の全長と型幅の関係を図一付6に、また、型幅； B の回帰式は式(2)に示した。

$$\log B = 0.673 \log L - 0.152, \quad \sigma = \pm 0.075 \quad (2)$$

相関係数は $r = 0.88$ 、 t 値は171.63である。

図一付6によると、船舶の全長が150m以上の油槽船類と鉱撤船類では船型が肥大化している。

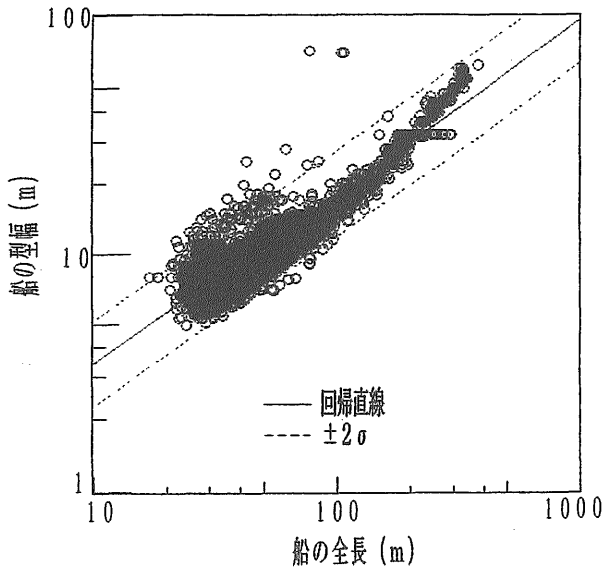


図-付6 船舶の全長と型幅の関係

例えば、船舶の全長Lが180m以上のコンテナ船の型幅は、全長に関係なく約35mで一定である。また、全長100m以下の船舶で型幅の標準偏差が 2σ の近傍にあって、型幅が10mから20mの船舶の多くは押曳船等の作業船である。

更に、図-付7によると、肥大度係数(L/B)は100m以下の船舶では増加する傾向を示すが、100m以上の船舶ではコンテナ船を除くと弓なりに減少して船型が肥大化している。

したがって、式(2)の使用は注意する必要がある。

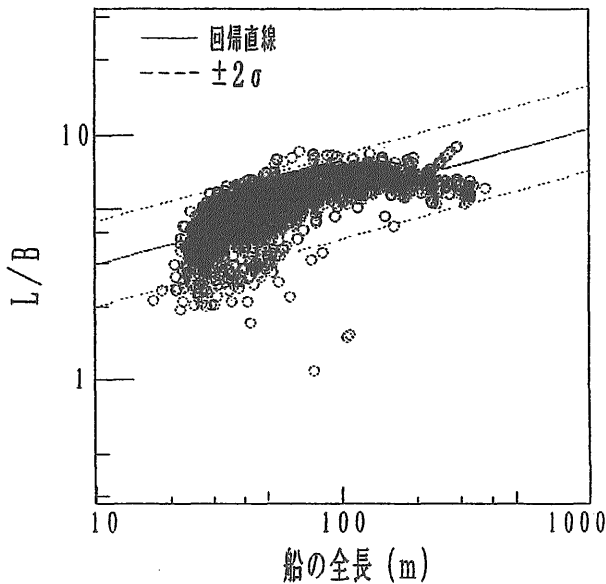


図-付7 船舶の全長と肥大度係数の関係

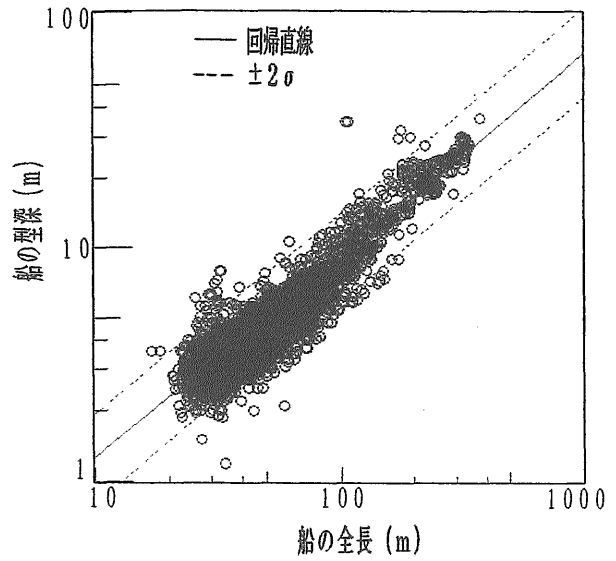


図-付8 船舶の全長と型深さの関係

c) 全長と型深さの相関

船舶の全長と型深の関係を図-付8に、また、型深さDの回帰式は式(3)に示した。

$$\log D = 0.851 \log L - 0.789, \quad \sigma = \pm 0.083 \quad (3)$$

相関係数は $r = 0.90$ 、t 値は197.73である。また、型深さDは船舶全長の0.851乗に比例して、超大型船の型深さの上限は約35mである。

d) 全長と航海速力の関係

航海速力の隻数分布を図-付9に示した。

船舶の航海速力は、11ktsを中心に1.5ktsから50kts

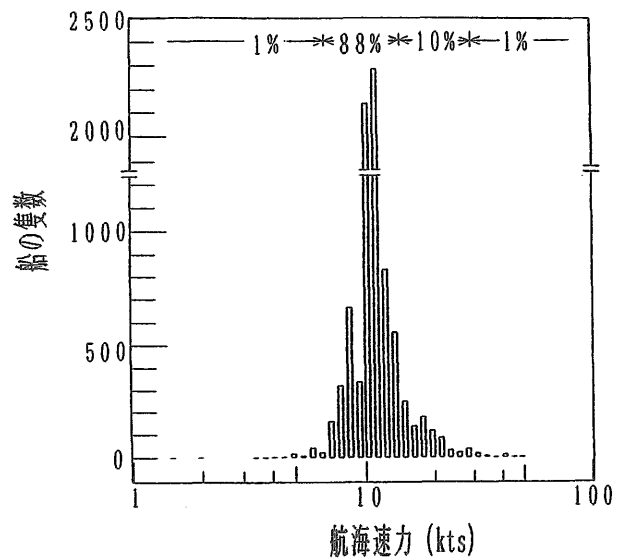


図-付9 船舶の航海速力分布

の範囲に分布しているが、7kts未満と30kts以上の船舶はそれぞれ約1%で少なくなっている。また、30kts以上の高速船は近年増加する傾向にある。

更に、全長と速力の間には一般的に相関性はないが、全長と航海速力の関係を図-付10に示す。

現状における航海速力;Vの回帰式は、式(4)に示した。

$$\log V = 0.253 \log L + 0.605, \quad \sigma = \pm 0.075 \quad (4)$$

相関係数 $r = 0.57$ 、 t 値 = 63.7である。

なお、回帰式は船舶の全長が50m未満で、5kts未満の低速船と18kts以上の高速船を除いて求めた。また、航海速力としては、公式運転時の約85%出力の値を取った。

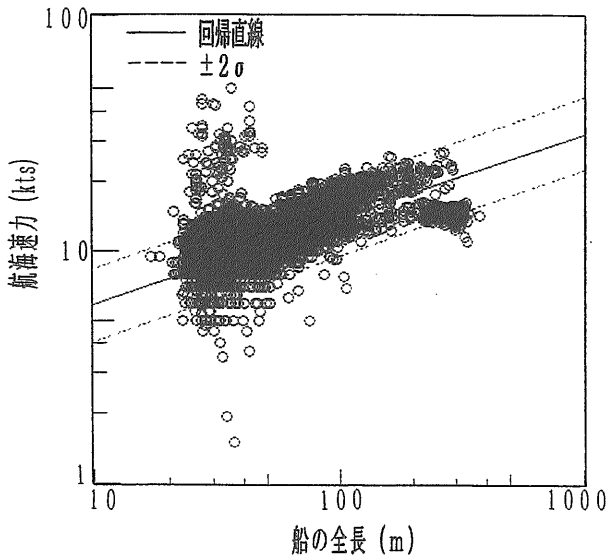


図-付10 船舶の全長と航海速力

e) 全長と特性時間の相関

特性時間; τ は、船舶が自船の全長の距離だけ進む時間; L/V で定義して、全長と特性時間の関係を図-付11に、また、特性時間 τ の回帰式は式(5)に示した。

$$\log \tau = 0.787 \log L - 0.402, \quad \sigma = \pm 0.096 \quad (5)$$

相関係数は $r = 0.86$ 、 t 値は157.93である。

高速船の航海速力時の特性時間 τ は約1秒で小さいが、大型タンカーの τ は約50秒となっている。

2. 船舶の諸元と性能特性の関係

船舶の諸元と性能特性の関係は、本文3.2.3章に示した操縦性能試験データ¹²⁾を使用して、全長L及び速力Vと性能特性(旋回性能、停止性能)の回帰式を表-

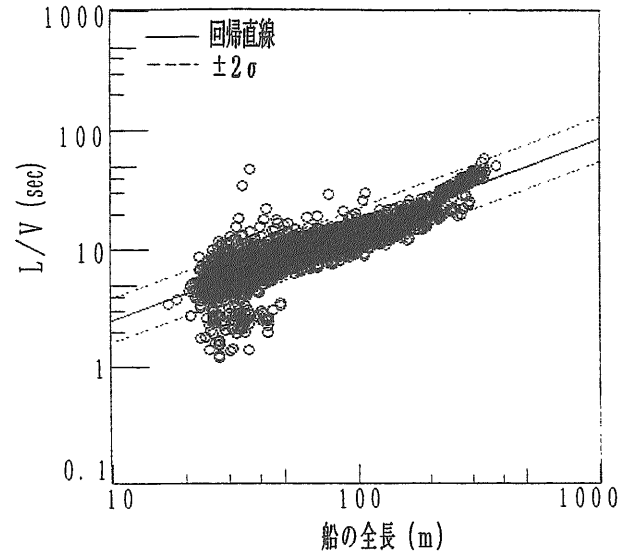


図-付11 全長と特性時間の関係

表-付3 船舶の全長と性能の関係

諸元性能	回帰式 log L	標準偏差(σ)	相関係数(r)	係数のt値	データ数(隻)
1. 旋回縦距離	$\log D_A = 1.135 \log L + 0.225$	± 0.084	0.87	26.67	212
2. D_A/L	$\log D_A/L = 0.135 \log L + 0.225$	± 0.085	0.21	3.18	212
3. 旋回横距離	$\log D_r = 1.152 \log L + 0.218$	± 0.100	0.84	23.27	212
4. D_r/L	$\log D_r/L = 0.152 \log L + 0.218$	± 0.100	0.23	3.44	212
5. 90度旋回時間	$\log T_{90} = 0.768 \log L + 0.258$	± 0.040	0.91	20.43	82
6. 停止距離	$\log D_s = 1.395 \log L + 0.119$	± 0.126	0.93	44.18	269
7. D_s/L	$\log D_s/L = 0.395 \log L + 0.119$	± 0.126	0.61	12.53	269
8. 停止時間	$\log T_s = 1.106 \log L + 0.106$	± 0.137	0.89	32.10	269

表-付4 速力と性能の関係

諸元性能	単回帰式 log V	標準偏差(σ)	相関係数(r)	係数のt値	データ数(隻)
1. 旋回縦距離	$\log D_A = 2.137 \log V - 0.018$	± 0.181	0.79	18.68	212
2. D_A/L	$\log D_A/L = 0.449 \log V - 0.016$	± 0.081	0.34	5.24	212
3. 旋回横距離	$\log D_r = 2.237 \log V - 0.095$	± 0.119	0.77	17.69	212
4. D_r/L	$\log D_r/L = 0.550 \log V - 0.094$	± 0.096	0.35	5.42	212
5. 90度旋回時間	$\log T_{90} = 1.331 \log V + 0.270$	± 0.072	0.69	8.71	82
6. 停止距離	$\log D_s = 2.549 \log V - 0.043$	± 0.257	0.71	16.49	269
7. D_s/L	$\log D_s/L = 0.667 \log V + 0.135$	± 0.144	0.43	7.71	269
8. 停止時間	$\log T_s = 1.645 \log V + 0.398$	± 0.257	0.54	10.73	269

表-付5 全長および速度と性能の関係

諸元性能	重回帰式	重相関係数(r)	係数Lのt値	係数Vのt値	D.V比
1. 旋回縦距離	$\log D_A = 0.892 \log L + 0.631 \log V - 0.016$	0.88	10.43	15.46	1.71
2. D_A/L	$\log D_A/L = -0.107 \log L + 0.631 \log V - 0.016$	0.35	1.26	15.46	1.71
3. 旋回横距離	$\log D_r = 0.889 \log L + 0.737 \log V - 0.094$	0.86	8.77	5.22	1.61
4. D_r/L	$\log D_r/L = -0.110 \log L + 0.737 \log V - 0.094$	0.36	-1.09	15.22	1.67
5. 旋回時間	$\log T_{90} = 0.614 \log L + 0.137 \log V + 0.396$	0.91	8.11	3.38	1.07
6. 停止距離	$\log D_s = 1.253 \log L + 0.351 \log V + 0.003$	0.93	17.56	10.75	1.36
7. D_s/L	$\log D_s/L = 0.253 \log L + 0.351 \log V + 0.003$	0.57	3.54	10.75	1.36
8. T_s	$\log T_s = 1.239 \log L - 0.490 \log V + 0.404$	0.90	17.45	-15.13	1.25

(付3、付4)に、LとVによる重回帰式を表-付5に示した。

a) 船舶の旋回性能の概要

ここでは、全長L及び速力Vと旋回性能の関係を示した。

1) 全長と旋回径の相関

全長と旋回横距(D_T/L)の関係を図-付12に、また、旋回横距(D_T/L)の回帰式は式(6,7)に示した。

$$\log D_A/L = 0.135 \log L + 0.225, \sigma_A = \pm 0.085 \quad (6)$$

$$\log D_T/L = 0.158 \log L + 0.196, \sigma_T = \pm 0.010 \quad (7)$$

相関係数は ($r_A=0.21, r_T=0.23$)、 t 値は ($t_A=3.18, t_T=3.34$) である。

式(6,7)は、全長に対する依存性が小さいことを示している。

そして、一般船では ($D_A/L \leq 4.5$ と、 $(D_T/L) \leq 5$ の範囲にあるが、高速船では ($D_A/L \geq 10$ 以上にあるため、高速船はこの回帰式を適用できないことが分かった。

なお、図-付12とでは、横軸 ($\log L$) のメッシュ: 0.04 毎に取り出した (D_A/L) と (D_T/L) の対数平均を黒丸 (●) で、また、高速船を (○) で、更にデータの分布範囲を縦の棒線で示している。

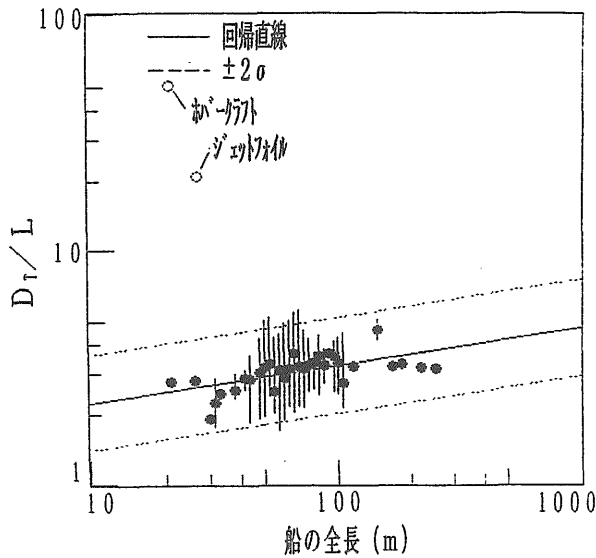


図-付12 全長と旋回横距離の関係

2) 全長と旋回時間の相関

航海速力を旋回初期速力として、35度転舵した場合の90度旋回所要時間; T_{90} (sec) と全長の関係を表-付3と表-付4の5番目の式に示した。

全長と無次元化90度旋回時間の関係を図-付13に、また、無次元化90度旋回時間; T_{90}/τ は式(8)に示した。

$$\log T_{90}/\tau = 0.109 \log L + 0.396 \quad (8)$$

そして、高速船を除くと ($T_{90}/\tau \leq 5$ の範囲で90度旋回が可能であると考えられる。

なお、図-付13では、横軸 ($\log L$) のメッシュ: 0.04 毎に取り出して、 T_{90}/τ の値を黒丸 (●: 在来船) でまた、(○) は高速船を示している。

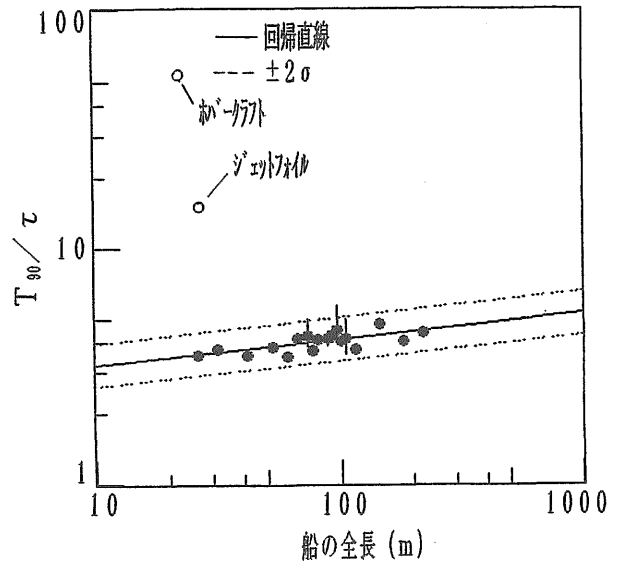


図-付13 全長と90度旋回時間の特性時間比

3) 速力と旋回径の相関

船舶の全長で無次元化旋回横距離と速力 V (kts) の関係を図-付14に、また、旋回径 ($D_A/L, D_T/L$) の回帰式は式(9,10)に示した。

$$\log D_A/L = 0.449 \log V - 0.016, \sigma_A = \pm 0.081 \quad (9)$$

$$\log D_T/L = 0.550 \log V - 0.094, \sigma_T = \pm 0.096 \quad (10)$$

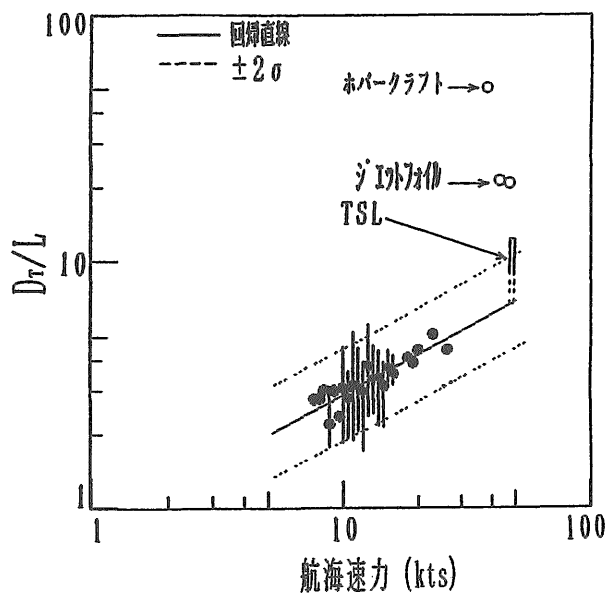


図-付14 旋回横距離の速力依存性

相関係数は ($r_A=0.34$, $t_T=0.35$)、 t 値は ($t_A=5.2$, $t_T=5.4$) である。

図-付14によれば、20ktsの時の旋回径は10ktsの時に比較して約20%大きくなるが、約47ktsの高速船では回帰式の約2倍になっている。

したがって、旋回性能は全長 L に比べて、速力依存性の傾向が大きい。また、高速船では回帰式からの分散が大きい。

なお、図-付14では、横軸 ($\log V$) のメッシュ: 0.04毎に取り出した値 (D_A/L , D_T/L) の平均を黒丸 (●: 在来船) と白丸 (○: 高速船) で、データの分布範囲を縦の棒線で示す。

4) 全長及び速力と旋回径の相関

旋回性能は、全長と速力に関する重回帰式で求めて、重相関係数と t 値及びダービン・ワトソン比; $D.W$ を表-付5に示した。

旋回径 (D_A , D_T) の重回帰式は、式 (11,12) に示した。

$$\log D_A = 0.892 \log L + 0.631 \log V - 0.016 \quad (11)$$

$$\log D_T = 0.899 \log L + 0.737 \log V - 0.094 \quad (12)$$

重相関係数と t 値及びダービン・ワトソン比は ($r_A=0.89$, $t_L=10.43$, $t_V=15.46$, $D.W=1.71$) と、 ($r_T=0.86$, $t_L=8.77$, $t_V=15.22$, $D.W$ 比=1.61) である。

また、実測データの L と V を用いて、式 (11,12) の重回帰式で旋回径を計算した推定値と、実測値の旋回横距離の関係は図-付15に示した。

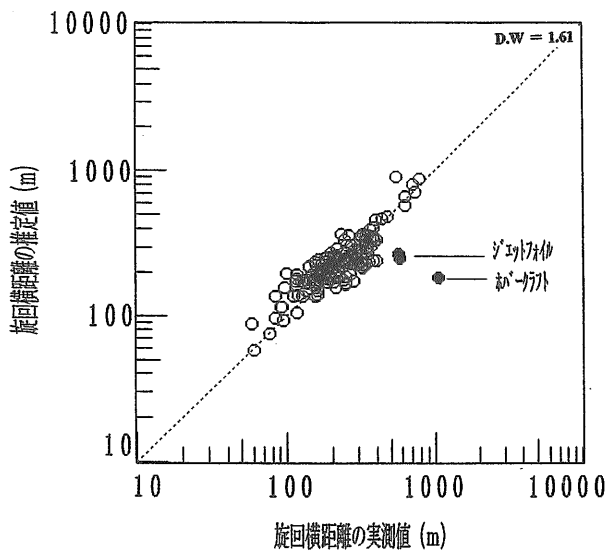


図-付15 旋回横距離の実測値と推定値の関係

5) 全長及び速力と90度旋回時間の相関
90度旋回時間; T_{90} の重回帰式は、式(13)に示した。

$$\log T_{90} = 0.614 \log L + 0.137 \log V + 0.396 \quad (13)$$

回帰式の重相関係数と t 値及びダービン・ワトソン比は ($r=0.91$, $t_L=8.11$, $t_V=3.38$, $D.W=1.07$) である。また、実測データ L と V を用いて式(13)の90度旋回時間を計算した推定値と実測値との関係は図-付16に示した。

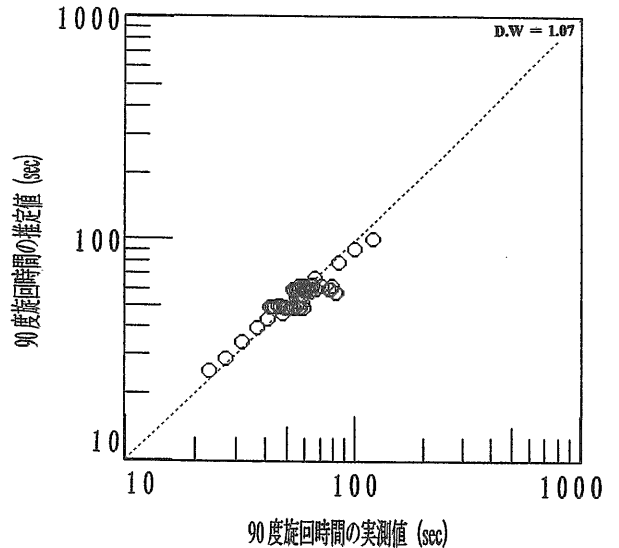


図-付16 90度旋回時間の実測値と推定値の関係

b) 船舶の停止性能

全長及び速力と統計的停止性能の関係を次に示した。

1) 全長と停止距離の相関

無次元化停止距離; D_s/L と全長の回帰式は、式(14)に示した。

$$\log D_s/L = 0.667 \log V + 0.135, \quad \sigma = \pm 0.144 \quad (14)$$

相関係数と t 値は ($r=0.43$, t 値=7.71) である。停止距離; D_s の回帰式は、式(15)に示した。

$$\log D_s = 0.395 \log L + 0.119, \quad \sigma = \pm 0.126 \quad (15)$$

相関係数と t 値は ($r=0.61$, $t=12.53$) である。そして、停止距離の上限は、(D_s/L) ≤ 20 の範囲にある。

なお、ジェットフォイルではウオータージェットを逆噴射して緊急停止するので無次元化停止距離は約5.5倍から6.6倍になって、在来船に比較して非常に短くなるが、機関停止による航走停止距離は在来船の停止距離特性に相当して長いので、操船の安全性を考慮して、

高速船の場合は機関停止航走距離のデータを用いた。

2) 全長と停止時間の相関

全長と停止時間の関係を図-付17に示した。

表-付3の8番目の式によると逆転制動時の停止時間 T_s (sec) は全長 L の1.106乗に比例して、相関係数と t 値は ($r=0.89$ 、 t 値=32.10) である。

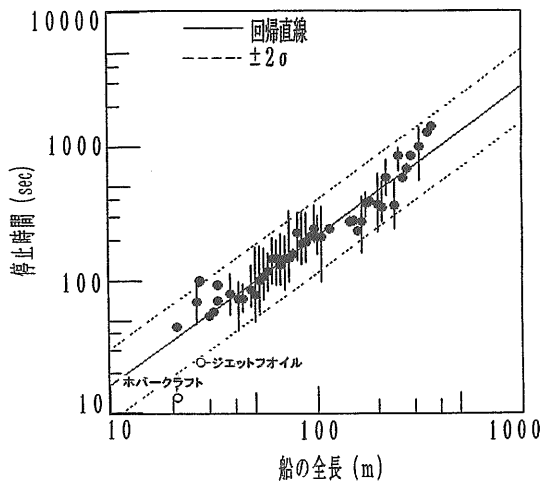


図-付17 全長と停止時間の関係

3) 全長及び速力と停止時間の相関

停止時間 T_s の重回帰式は、式(16)に示した。

$$\log T_s = 1.239 \log L + 0.490 \log V + 0.404 \quad (16)$$

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($r_s=0.90$ 、 $t_L=17.45$ 、 $t_V=-15.13$ 、 $D.W=1.25$)である。また、実測データ L 、 V を用いて式(16)の重回帰式で停止時間を計算した推定値と実測値との関係は図-付18に示した。

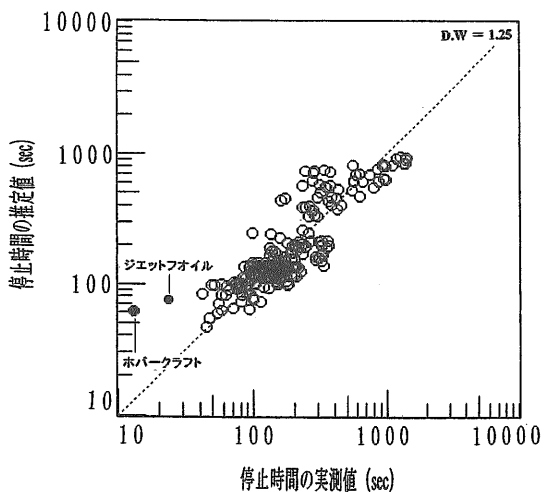


図-付18 停止時間の実測値と推定値の関係

重回帰式のダービン・ワトソン比の有意性は低いので、 L と V の他にも影響を与える要素があることが考えられる。