

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。

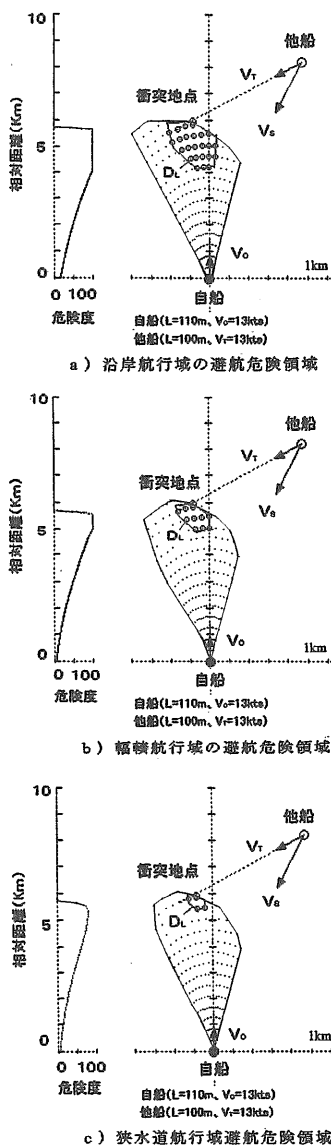


図-3.29 航海領域における避航危険領域の比較

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)

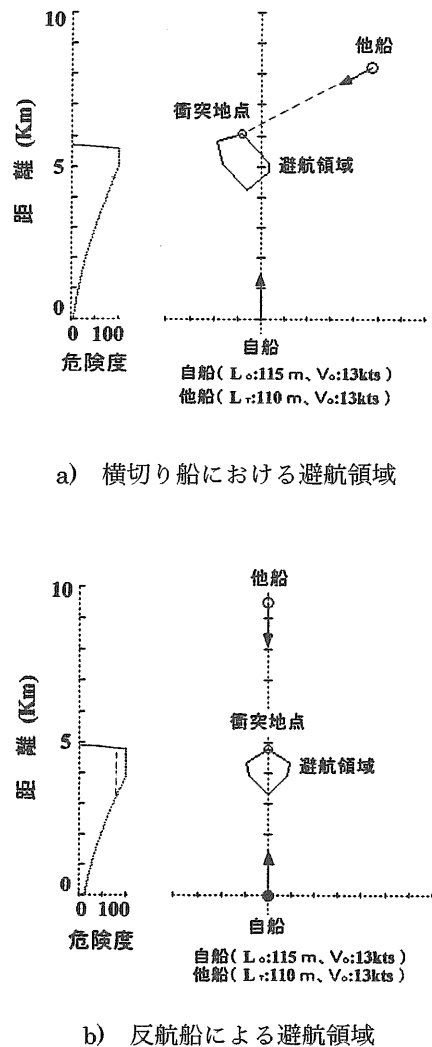
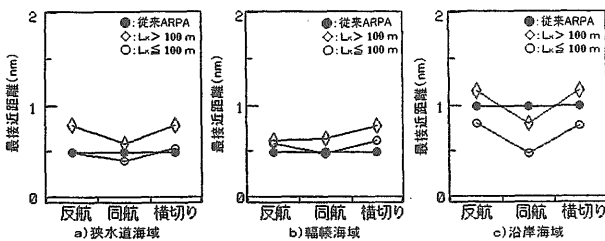


図-3.30 避航領域の評価

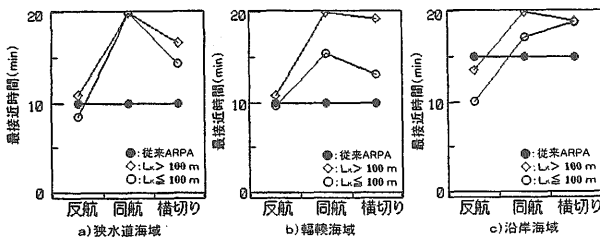
b) 航行環境評価指標の適用に伴う警報対象領域の比較

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、新型では狭水道、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。

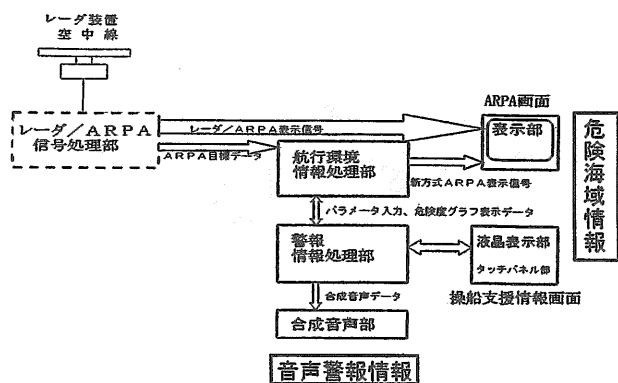


図-3.32 実証機ARPAのシステム構成

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

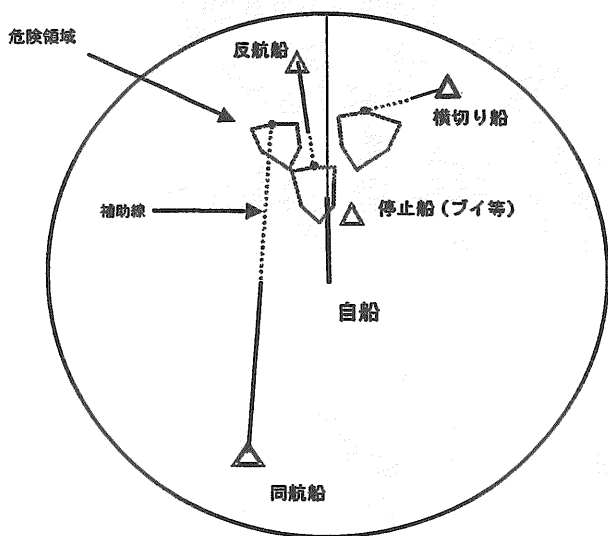


図-3.33 潜在的危険領域表示

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)。

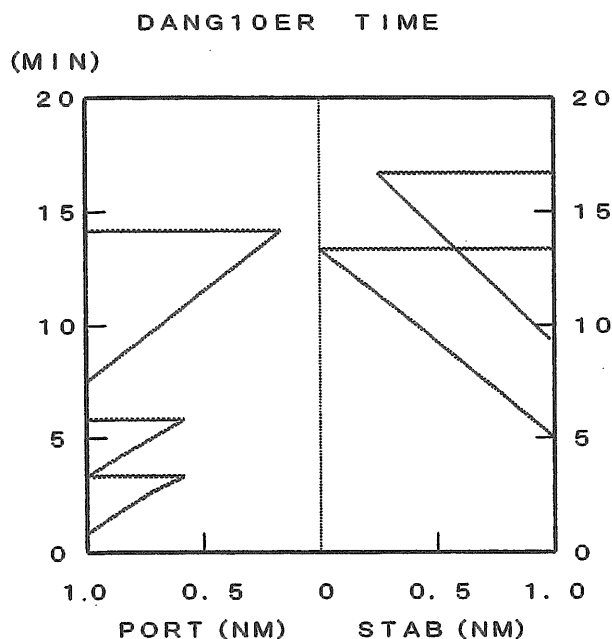


図-3.34 船首方向の危険度表示

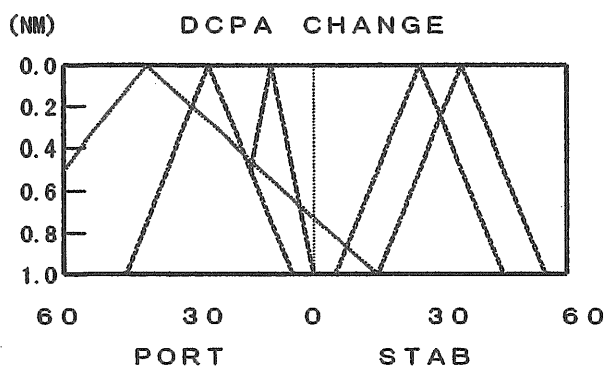


図-3.35 変針によるDCPAの変化の表示

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

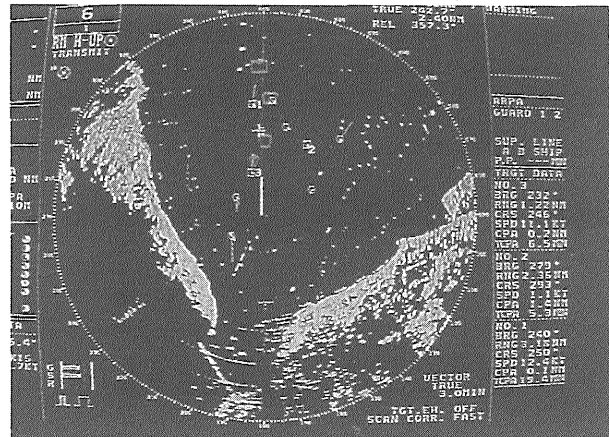


写真-3.3 ARPAのメイン画面

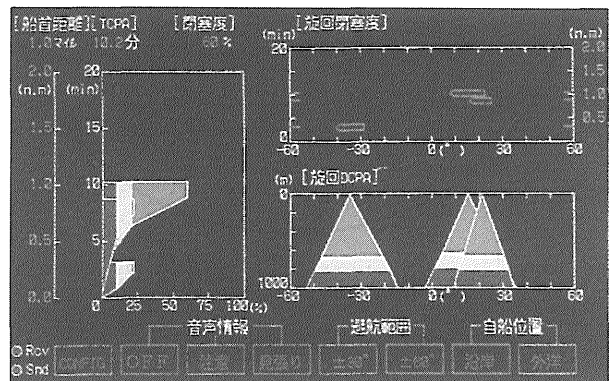


写真-3.4 ARPAのサブ画面

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。

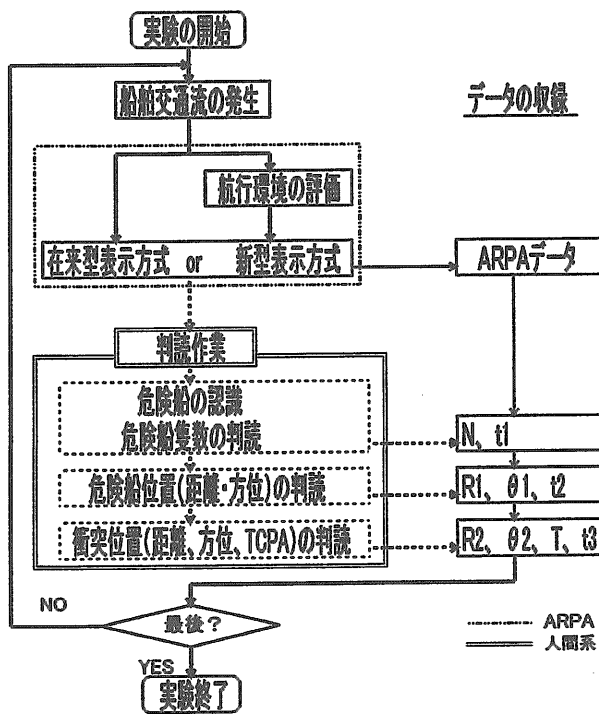


図-4.1 表示情報の判読作業負担に関する実験

船舶交通流の発生条件は、発生位置、衝突地点、速度、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、速度、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 と速度; 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。

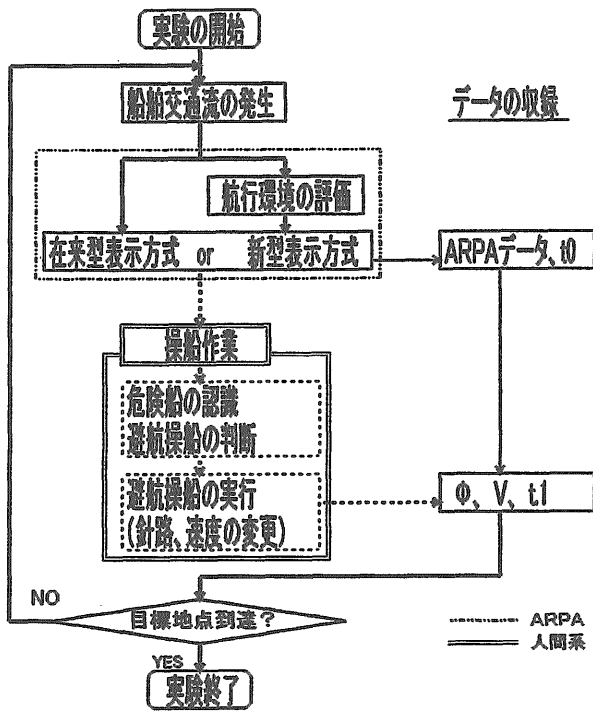


図-4.2 表示情報の衝突予防支援効果に関する実験

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。

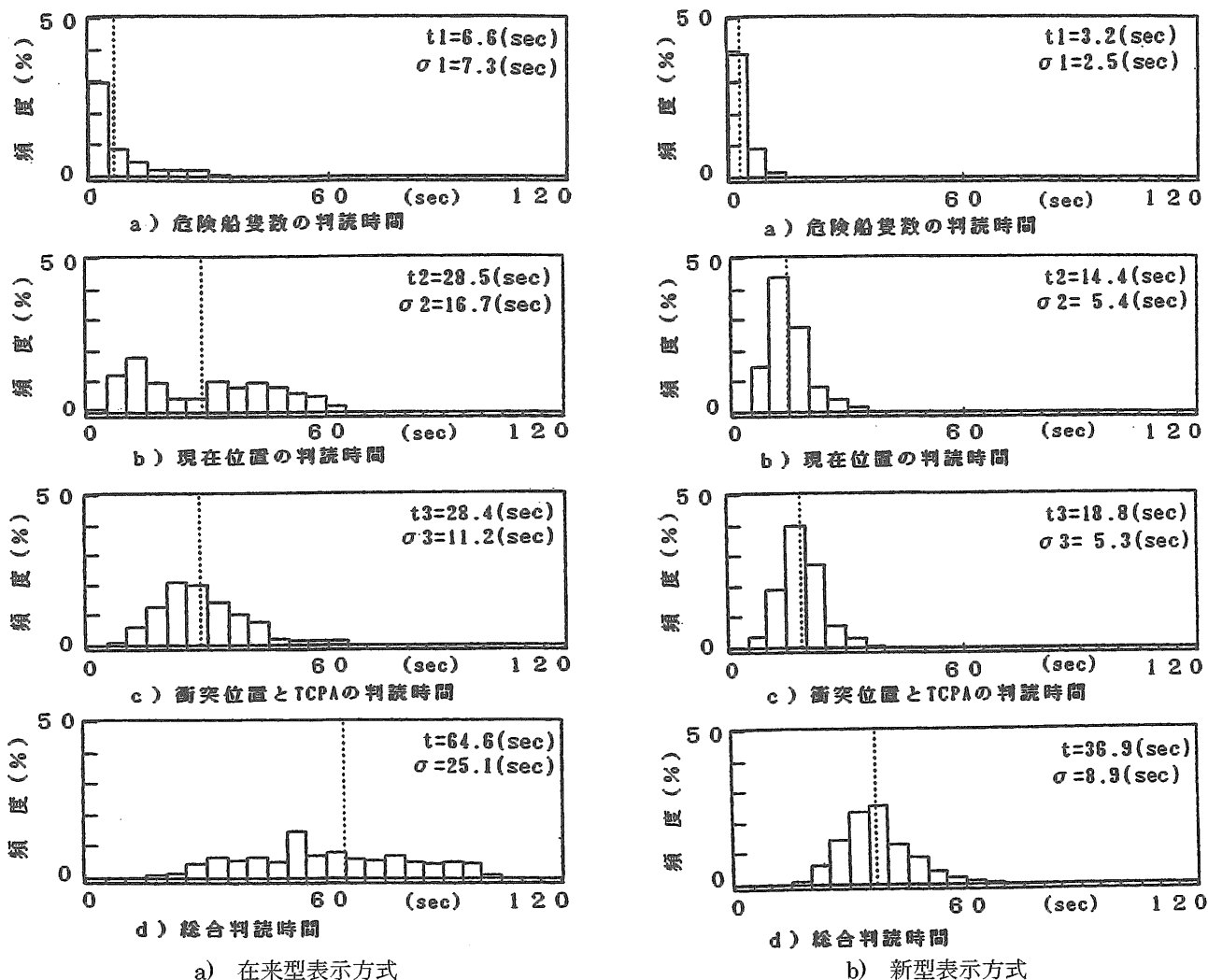


図-4.3 表示方式による判読時間の比較

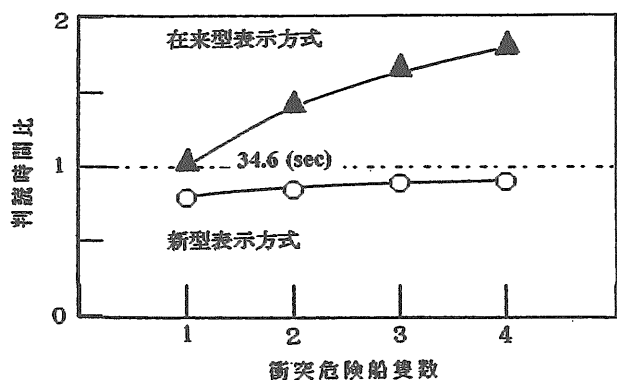


図-4.4 危険船隻数増加に伴う1隻当たり情報の判読時間の変化

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。

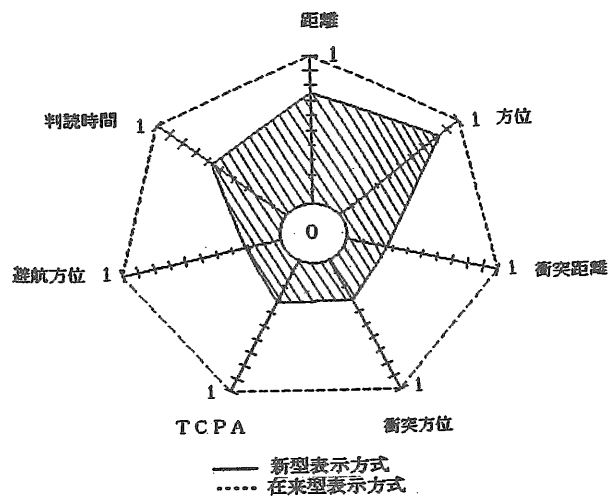


図-4.5 表示方式による判読誤差の比較

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。

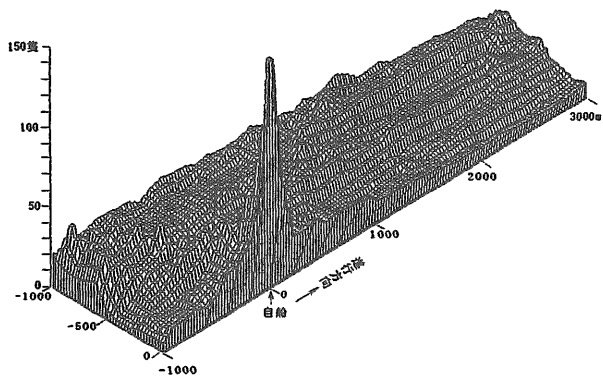
4.2.2 衝突事故の予防と避航操船への支援効果

a) 船舶交通流設定条件の航跡密度分布

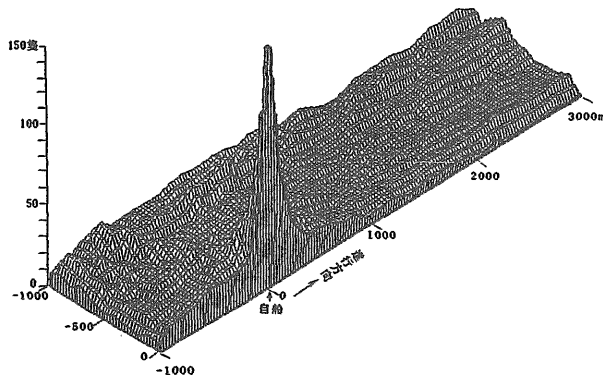
本実験で被験船が避航せずに直進して航行した場合に得られる、設定船舶交通流の相対航跡密度分布を図-4.6に示した。

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

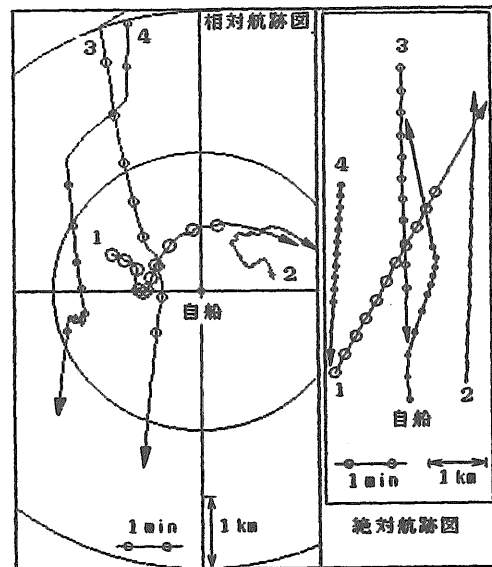


図-4.7 避航操船に伴う相対航跡例

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

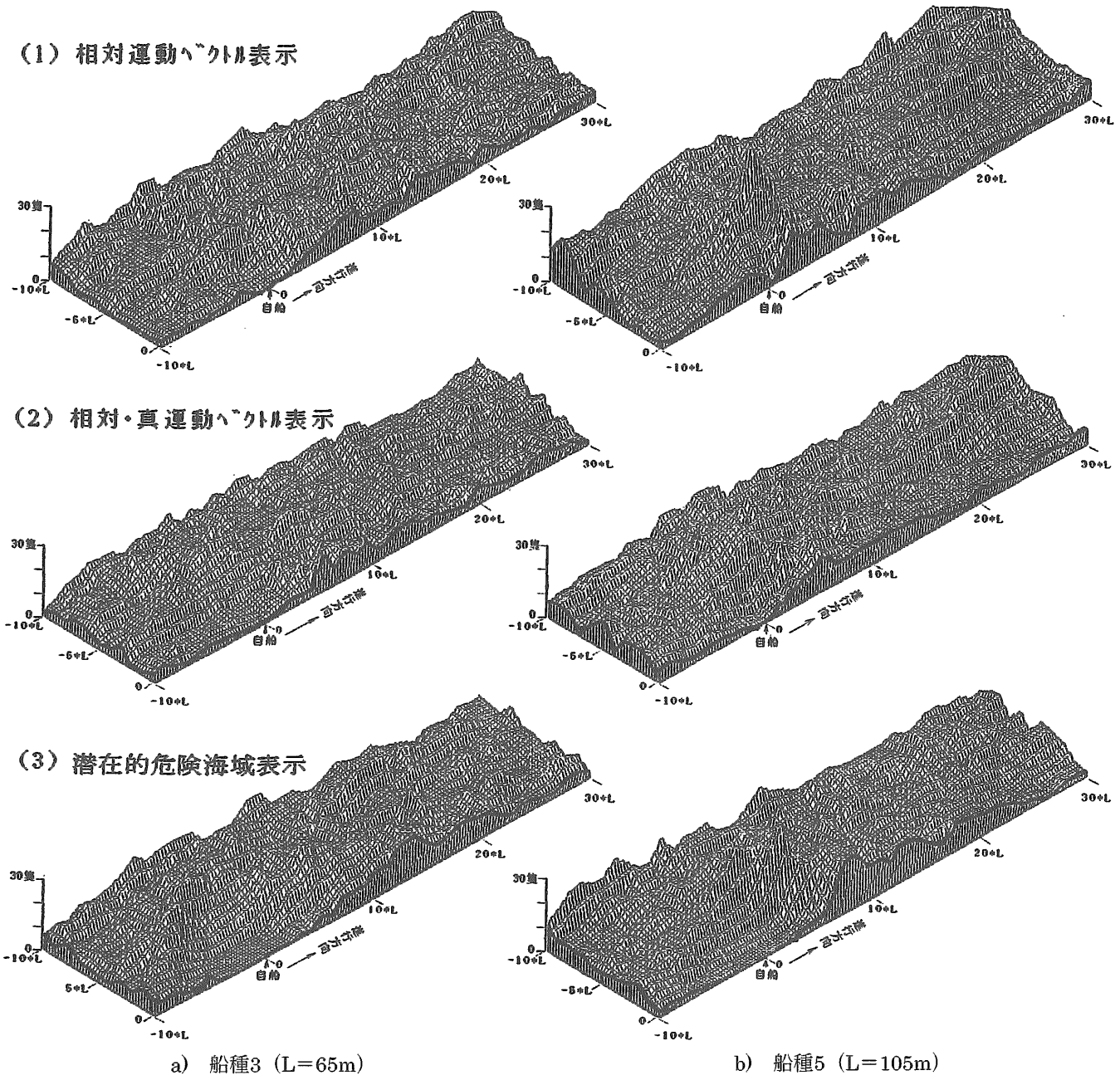


図-4.8 表示情報による相対航跡密度分布の比較

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。

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

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