

## 高速航行シミュレーションによる安全性評価法等の研究

伊藤 泰義、沼野 正義、田中 邦彦、福戸 淳司、宮崎 恵子  
桐谷 伸夫、三友 信夫、有村 信夫  
金湖 富士夫\*  
平尾 好弘\*\*  
村山 雄二郎\*\*\*

A Study on a Method of Safety Assessment by Using a Simulator  
for a High-Speed Vessel

Yasuyoshi ITOH, Masayoshi NUMANO, Kunihiko TANAKA, Junji HUKUTO  
Keiko MIYAZAKI, Nobuo KIRIYA, Nobuo MITOMO, Nobuo ARIMURA,  
Fujio KANEKO, Yoshihiro HIRAO, Yujiro MURAYAMA

### Abstract

With the current economic growth of our country, many high-speed vessels are coming into the market. Because of their high performances, the safety of navigation between the new high-speed vessels and conventional systems, which include conventional ships, traffic routes and navigation aids, has been required. To establish the navigation safety of high-speed vessels, we conducted "A study on methods of safety assessment by using a simulator for a high-speed vessel" and the study was carried out from 1991 to 1995 with a financial support by the budget of the Research and development in Transportation Technology.

This report summarizes the research activities of "A study on methods of safety assessment by using a simulator for a high-speed vessel". Through the study, we proposed an evaluation method for ship navigation by using a ship-handling simulator, safety manners in navigating high-speed vessels and some effective navigational aids for high-speed vessels.

This study is divided into three parts. The first part is the improvement of our ship-handling simulator to fit for high-speed vessels and various navigation aides. The study on a safety evaluation method for high-speed vessel is the second part. The last part is the experimental evaluation of a support system to assist high-speed navigation. As the result of simulator experiments under various conditions of our renewed ship-handling simulator, practical safety margin and safety manners of high-speed navigation and the support system were proposed. In

---

無印 システム技術部  
\* 装備部  
\*\* 東海支所  
\*\*\* 弓月商船高等専門学校  
原稿受付 平成10年3月4日  
審査済 平成10年5月13日

addition to those principal results of our simulator experiments, we conducted on-board experiments of encounter between a high-speed vessel and ordinary speed ships. It suggested the way of safety high-speed navigation in a congested area.

Through the researches of high-speed vessel's safety, we also examined effective support for conventional ships that is handled by fewer personnel. This Study will lead to produce the practical support equipment that enables even one-man watch. Furthermore we developed the technique which represents lights of aids to navigation properly in computer graphics imagery of a ship-handling simulator.

Results of our study were referred by RR committees in the Shipbuilding Research Association of Japan. Our proposal of the safety assessment of high-speed navigation with a safety margin as an index has been accepted widely in a ship navigation field. The support system for one-man watch is going to be installed in a newly-developed domestic oil tanker. In cooperation research with the Safety Marine Agency, the rearrangement of the Kanmon Passage was effectively assessed using the light expression technique.

We hope that a safe and efficient marine transportation system will be realized by using our research results.

目次			
1. 始めに	26	3.3.2.2 実験方法	37
2. シミュレータの構築	27	3.3.2.3 実験結果	37
2.1 シミュレータの調査	27	3.3.2.4 対象海域の航行密度との比較	37
2.1.1 調査先	27	3.3.3 運航体制評価実験	37
2.1.2 調査したシミュレータ概要	27	3.3.3.1 シナリオ	37
(1) 海上自衛隊操船シミュレータ(NAT)	27	3.3.3.2 実験方法と実験結果	38
(2) 広島大学出入港操船シミュレータ	27	3.3.4 運航体制の有効性評価	38
(3) 日本電装ドライビングシミュレータ	27	3.3.4.1 避航開始距離の分散分析による	
(4) 三菱重工業フライトシミュレータ	27	評価	38
(5) 川崎重工業フライトシミュレータ	27	3.3.4.2 アンケート結果の数量化理論Ⅲ類による評価	38
2.2 景観画像表示システム用計算機の仕様と選定	28	3.3.5 結果のまとめ	39
2.3 高速航行シミュレーションシステムの構築	28	3.4 主成分分析による解析 <sup>16)</sup>	39
2.3.1 概要	28	3.4.1 主成分分析について	39
2.3.2 景観画像表示システム用計算機の仕様概要	28	3.4.2 シミュレータ実験	39
3. 運航体制評価手法とシミュレータ実験 <sup>3)</sup>	29	3.4.2.1 シミュレータ実験のアンケートの取り方	39
3.1 運航体制評価手法	29	3.4.2.2 調査した操船支援	39
3.1.1 評価基準量の導出	29	3.4.3 主成分分析による	
3.1.2 限界輻輳度の導出	30	操船支援の主観的評価	41
3.1.3 限界輻輳度と対象海域の輻輳度との比較	30	3.4.3.1 主成分分析と	
3.1.4 シミュレータ実験による評価量の導出と操船者へのアンケート	30	アンケート回答の数量化	41
3.1.5 運航体制の有効性の評価	31	3.4.3.2 夜間の航行実験の主成分分析	41
3.1.6 評価基準量(避航開始限界距離)の導出	31	3.4.3.3 昼間の航行実験の主成分分析	43
3.2 昼間航行のシミュレータ実験と運航体制評価 <sup>11)</sup>	31	3.4.4 結果のまとめ	44
3.2.1 シミュレータ実験の概要	31	3.5 結論	44
3.2.2 限界航行密度	31	4. 安全性評価法について	44
3.2.2.1 シナリオ	31	4.1 余裕による安全性評価法	44
3.2.2.2 実験方法	31	4.2 操船シミュレータによる	
3.2.2.3 実験結果	31	狭水道航行の安全性評価例 <sup>18)</sup>	45
3.2.2.4 対象海域の航行密度との比較	33	4.3 操船シミュレータによる	
3.2.3 運航体制評価実験	33	長時間高速航行の安全性評価例 <sup>19)</sup>	46
3.2.3.1 シナリオ	33	4.3.1 長時間航行の安全性評価法	46
3.2.3.2 実験方法と実験結果	33	4.3.1.1 長時間高速航行の	
3.2.4 運航体制の有効性評価	33	安全性評価の実験	46
3.2.4.1 避航開始距離の分散分析 <sup>12)、13)</sup> による評価	33	4.3.1.2 長時間高速航行の	
3.2.4.2 アンケート結果の数量化理論Ⅲ類による評価	34	安全性評価の実験結果	47
3.2.5 結果のまとめ	36	4.3.2 長時間高速航行の安全性向上の方策	48
3.3 夜間航行のシミュレータ実験と評価 <sup>15)</sup>	36	4.3.2.1 疲労要因低減	48
3.3.1 シミュレータ実験の概要	36	4.3.2.2 時間要因低減	49
3.3.2 限界航行密度	37	4.3.2.3 操船支援作業	49
3.3.2.1 シナリオ	37	4.3.2.4 緊急時処理事業支援	49
		4.3.3 結果のまとめ	49
		5. 内航タンカー近代化船を例とした	
		適切な航行支援について	49
		5.1 内航タンカー近代化船の	
		狭水道航行における運航支援 <sup>21)</sup>	49
		5.1.1 操船シミュレータ実験	49
		5.1.1.1 実験の概要	49
		5.1.1.2 実験の方法	50

5.1.2 狭水道航行における 支援装置の機能仕様	51
5.1.3 適切な支援装置を 備えた一人当直のモデル	51
5.1.4 結果のまとめ	52
5.2 内航タンカー近代化船の 長時間航行の安全確保支援 <sup>19)</sup>	52
5.2.1 シミュレータ実験	52
5.2.1.1 実験の概要	52
5.2.1.2 実験の手順	52
5.2.1.3 実験の進め方	52
5.2.2 実験インタビューの結果	53
5.2.2.1 ①の実験インタビュー	53
5.2.2.2 ①の実験インタビューの考察	53
5.2.2.3 ②の実験インタビュー	53
5.2.2.4 ②の実験インタビューの考察	54
5.2.2.5 ③の実験インタビュー	54
5.2.2.6 ③の実験インタビューの考察	54
5.2.3 内航近代化船の総合評価	54
6. 操船シミュレータを用いた関門海峡の 灯火の表現方法 <sup>24)、25)</sup>	54
6.1 関門海峡について	54
6.2 関門航路の現状と改良点 <sup>26)</sup>	55
6.2.1 現航路の問題点	55
6.2.2 新航路の概要	55
6.3 航路標識の灯火表現	55
6.4 シミュレータ実験	55
6.4.1 実験概要	55
6.4.2 評価	55
6.5 関門航路における灯浮標の 新設等整備計画	55
7. 輻輳海域を航行する高速船の航法の提案	56
7.1 高速船と一般船による見合い実船実験 <sup>20)</sup>	56
7.1.1 シミュレータ実験	56
7.1.1.1 シミュレータ実験の概要	56
7.1.1.2 シミュレータ実験結果と考察	57
7.1.1.3 実船実験	57
7.1.1.4 結果のまとめ	58
7.2 東京湾を例にした 高速航行シミュレータ実験例 <sup>31)</sup>	58
7.3 輻輳海域における航法の提案 <sup>32)</sup>	59
7.3.1 輻輳海域における航法	59
7.3.2 高速船が与える危険感の構造モデル	59
7.3.3 許容できる危険感	59
7.3.4 通過(海上衝突予防法第8条) に対する考察	60
7.3.5 実験結果(避航開始距離)の考察	60
7.3.6 実験結果(航過距離)の考察	61
7.4 輻輳海域での許容できる 避航開始距離の考察	61

7.5 高速船の安全な航行方法について	62
8. おわりに	62
<参考文献>	63

## 1. 始めに

本報告は、平成3年度から平成7年度までの5年間にわたり運輸技術の研究開発費にて実施した「高速航行シミュレーションシステムによる安全性評価法の研究」の報告である。

近年における経済活動の高まりとともに、高速船の運航が実現化するなかで、輻輳海域等における高速航行に関する安全性の評価および安全対策の確立が求められている。こうした高速船を含んだ海上交通の安全を確保するためには、高速航行シミュレーションシステムの開発とそれを用いた高速航行の安全性の評価技法や高速航行における支援システムの評価技法の研究が必要である。

本研究は、次の3つの項目に分けて実施した。第1に研究を進めるうえで必要不可欠な操船シミュレータの整備、第2に高速航行における安全を評価する手法の確立、第3に高速での航行が安全にできる支援システムの検討である。研究に先立って整備したシミュレータを用いて、種々の条件下でのシミュレータ実験を実施し、安全性評価法の研究及び航行支援システムの研究を行った。しかし、高速航行について必要な支援方法については、現状ではあまり経験がないため、在来船に対する支援方法の検討から、高速船に必要な支援方法を求めた。また、こうした検討の中から、少人数で運航する内航タンカー近代化船に必要な航行支援方法についても成果が得られ、一人当直を可能とする支援機器の開発を行った。

さらに、シミュレータ技術の臨場感を支える景観画像の作成技術の利用として、航行標識である灯台、ブイ等の灯火を表現する技術を開発した。

3つの項目に分けて実施した研究の成果は、第1の操船シミュレータの整備については、第2章と関連技術として得られた成果を第6章に記述している。第2の高速航行における安全を評価する手法の確立については、第3章と第4章に記述した。第3の支援システムの検討については、在来船の支援も含めて第5章と第7章で記述した。

研究開発の手順は以下の通りである。

- 高速航行シミュレーションシステムの調査を行い、シミュレーションシステムに必要な要件を明らかにする。
- 高速航行を模擬するシミュレーションシステムを構築する。
- 高速航行シミュレーション実験を行い、安全性の評価および高速航行に必要な支援システムについて考察を行い、そのデータの集積と検討・

評価を行う。

- シミュレーションを利用した高速航行の安全性評価の手法を確立する。
- 実船実験によるデータをもとにした検証等から高速航行の安全性等を総合的に評価し、高速船を含んだ海上総合交通体系の検討と提案を行う。

## 2. シミュレータの構築

### 2.1 シミュレータの調査

高速航行シミュレーションシステムを構築するにあたって、日本における現状のシミュレーション技術の程度を把握するために、国内における操船シミュレータ、フライトシミュレータ、ドライビングシミュレータ等各種交通機関のために整備されたシミュレータを調査し、高速航行シミュレーションシステムが具備すべき機能要件を明らかにした。続いて、この要件をもとにシミュレーションシステムを設計し、主構成要素である画像表示用計算機の仕様を確定した。

このシミュレーションシステムは、高速船の運航において想定される全ての状況において、安全性を確保するための検討が行えるものでなければならない。それに不可欠なものが、運航者に提供される景観画像である。この景観画像に要求される機能としては、少なくとも数十以上の移動体が同時に取り扱えることと連続した画像を得るために、1秒間に16画面以上の出来うるかぎり高速な描画速度が実現できることである。そこで、今回のシミュレータの調査では、特にリアルタイムシミュレータの景観部分の現状を調査し、高速航行シミュレーションシステムの景観画像表示システムを作成するに当たっての参考とすることを目的として実施した。

#### 2.1.1 調査先

海上自衛隊：広島市江田島  
操船シミュレータ  
広島大学船舶海洋教室：東広島市西条町  
操船シミュレータ  
日本電装(株)本社：愛知県刈谷市  
ドライビングシミュレータ  
三菱重工業(株)名古屋航空宇宙システム製作所  
：名古屋市フライトシミュレータ  
川崎重工業(株)岐阜工場：岐阜県各務原市  
フライトシミュレータ

#### 2.1.2 調査したシミュレータ概要

調査したシミュレータの概要は、以下のようである。

##### (1) 海上自衛隊操船シミュレータ(NAT)

CGI方式のビジュアルシステム(三菱プレジジョン社製)、7台のプロジェクタ、自衛艦のブリッジのモックアップ、およびコンピュータシステムより構成

される。

広視界(240度)の景観を表示でき、かつ、海面のテクスチャ、高い画面更新速度(秒30枚?)のため、非常に臨場感がある。夜間、昼間の景観を表示できる。霧の表現が可能である。波によるローリング等の運動を反映した画像を作成することが可能であるため、感覚的にも動揺している気分になる。移動物体は少数しか扱うことができない。

##### (2) 広島大学出入港操船シミュレータ

CGI方式のビジュアルシステム(サンマイクロシステムズ社製)、3台のプロジェクタ、一般商船のブリッジのモックアップ、およびコンピュータシステムより構成される。このシミュレータでは、比較的近距离においた3枚のスクリーンで180度の視野を確保している。また、180度のスクリーンを左舷に120度、右舷に60度に割り振っており、海上衝突予防法に対する配慮がなされているほか、左舷付けの着岸操船を限られた視野角の中で可能にしている。リアルタイム性を考えると20隻程度の表示が可能である。

##### (3) 日本電装ドライビングシミュレータ

CGI方式のビジュアルシステム(三菱プレジジョン社製)、3台のプロジェクタ、3自由度のモーション装置およびコンピュータシステムより構成される。画像はテクスチャ無しであり、かつ、スクリーンの継目がかかり空いているが、画面更新速度が秒30枚であり高速なため、それほど違和感がなかった。移動物体は少数しか扱えない。夜間、昼間の景観を表示できる。霧の表現が可能である。夜間のシーンでは、他の物体(他車、道路等)のヘッドライトの当たっている部分だけ明るい色で表示する等、細かな工夫がなされていた。モーション装置は、稼働スペースが狭いため十分な加速度を出すことは無理であるが、通常時の運転時の感覚を生起させるにはまずまずのものとのことである。

##### (4) 三菱重工業フライトシミュレータ

CGI方式のビジュアルシステム(ESI G1000: Evans and Sutherland社製)、景観画像を投影するドーム(24ft: 7.3m)、航空機のcockピットのモックアップおよびコンピュータシステムより構成される。モーション装置はない。

夜間、昼間の景観を表示できる。霧の表現が可能である。景観画像は2台のプロジェクタでドーム内全体に投影され、また別のプロジェクタで目の前の詳細な画像を表示している。また、ターゲットを表示するもう1台のプロジェクタがある。全体的に暗くボヤけた画像になっているためか、それほどの臨場感は得られていなかった。

##### (5) 川崎重工業フライトシミュレータ

構成は、三菱重工業と同様であり、CGI方式のビジュアルシステム(2システム、Compu SceneIVA: General Electric社製、三菱プレジジョン社製)、景観画像を投

影するドーム(24ft:7.3m)、航空機のcockピットのモックアップおよびコンピュータシステムより構成され、モーション装置はない。

夜間、昼間の景観を表示できる。霧の表現が可能である。景観画像はcockピット上方にある3台のプロジェクタでドーム内に投影される。カバーされる視野は、水平200度、垂直85度であり、全方向の景観は表示されないが、景観画像が明るく、かつシャープであるため、非常に臨場感があり、画面が傾くと自然と足に力が入ってしまう。

## 2.2 景観画像表示システム用計算機の仕様と選定

今回調査したシミュレータは、広島大学のシミュレータを除いて、それぞれシミュレータメーカー(三菱プレジジョン、Evans and Sutherland、General Electric)のビジュアルシステムを採用したものであり、現状の最先端のシミュレータ技術を実装している。

画像更新速度は、60回/秒であれば高速の移動体である飛行機のシミュレータであってもスムーズな動きの景観画像が得られたと評価されているので、高速船の場合であれば、その速度の違いから30回/秒程度で十分と考えられる。

移動体に関しては、シミュレータメーカーのシミュレータではセパレーションプレーンによる陰面処理を行っているため、取扱可能な移動物体の数に制約があり、多数の船舶の同時表示が求められる高速航行シミュレーションシステムにそのまま採用することはできない。広島大学のシミュレータでは、Zバッファ方式の陰面処理を行っており、理論的には無限の移動物体を表現できるが、描画能力の点で制約がある。このため、本システムを作成するうえで、Zバッファによる陰面処理を用いた描画能力が優れ、レベル・オブ・ディテール(注1)による描画作業の軽減が可能なシステムが必要と考えられる。

海面等面の表示については、臨場感特にスピード感を得るためには、テクスチャによる表現が重要と思われる。

スクリーンについては、平面を比較的遠距離に配置したもの、近距離に配置したものおよびドーム型のスクリーンについて、調査を行った。比較的遠方に置いたものは、視点の移動による誤差が少なく、画面までの距離が長いと違和感が少ない。しかし、この方法で広い視野を確保するには、画面数が多くなり、多くの費用と広いスペースが必要となる。近距離にスクリーンを置いたシステムでは、焦点距離が近いと多少違和感はあるが、視点を固定すれば見え方の誤差はなく、比較的安価に高速船の様な狭い操縦席を再現するシステムには向いている。ドームによる球面投影による方法は、少ないチャンネルでの広範囲の景観の表現が可能で、スクリーン間の継ぎ目もなく自然に見える。こ

のため、今後安価で鮮明な球面又は円筒投影システムができれば、こちらへの移行を考えたほうが良いと思われる。以上のように今回の調査で高速航行シミュレーションシステム作成にとって参考になる技術を目にすることができた。

(注1): 視点に近い対象物は、精密に描き細かい観察に耐えられるようにし、視点から遠い対象物は、粗く描く。計算機の負荷を減らし描画更新速度を確保する手法。

## 2.3 高速航行シミュレーションシステムの構築

### 2.3.1 概要

船舶技術研究所に整備されたシミュレータ<sup>1)</sup>について述べる。前述の調査をもとに高速航行シミュレーションシステムのハードウェア構成を検討し(図2-1)、高速航行シミュレーションシステムの景観画像表示システム<sup>2)</sup>を構成する計算機の仕様を導出し、その仕様を満足する計算機を導入した。

同計算機として、米国BALL社製の944システムを選定した。944システムは、輻輳海域を想定したシミュレータ実験で必要となる多数の船舶をリアルタイムで表示でき、臨場感を現出するためのテクスチャ付きのポリゴンで毎秒80000ポリゴンの表示が可能であり、また、視程の影響を調査するために必要な霧の設定等が可能である。

機能例として、100隻同時に航行している状態で、海面模様のテクスチャを貼り、かつ霧をかけて、平均30枚/秒の画像更新速度を達成することができた。また、主コンピュータと接続してシミュレーションを実施しても、通信を介した画像表示能力は、ほとんど低下しなかった。

### 2.3.2 景観画像表示システム用計算機の仕様概要

高速航行シミュレーションシステムは、高速船が航行することによって引き起こされる船舶航行の種々の状況の安全評価を行う際に使用されるシミュレータと位置づけられる。「船舶航行システム」の安全評価用シミュレータの機能要件として、景観画像表示システムは、操船情報のリアリティを満足しなければならない。リアリティとは、現実の景観と同程度の詳細な画像を操船者に提示することではなく、操船者が実海域での操船に使用している情報(操船情報)を欠落なく操船者に与え、操船者の反応が実海域での反応と有意な差をもたらさないようにするということを意味する。

景観画像表示システムで表現すべき主な操船情報、およびシミュレーションで実現する際に以下の考慮点について検討し、景観画像表示システムで使用する計算機の主な仕様を導出した。

- a. 航行船舶の表現(必要な箇所が十分に表現されている)

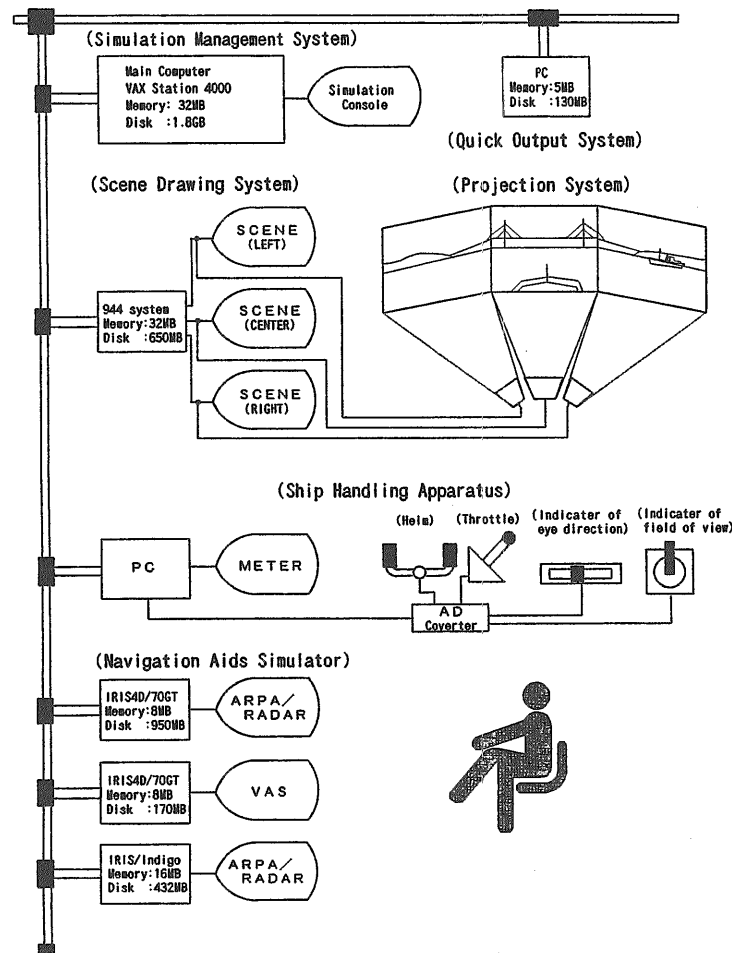


図2-1 航行シミュレーションシステムの構成

- b. 目に見える物体の動きのスムーズさ
- c. 視野
- d. 自船のスピード感

### 3. 運航体制評価手法とシミュレータ実験<sup>3)</sup>

#### 3.1 運航体制評価手法

運航体制の評価を行う場合、実海域での試験はほとんど不可能であり、シミュレータ実験以外に有効な試験方法は存在しないと言えよう。また、運航体制は人間-機械系であり、人間-機械系の評価はその要素のみの評価では不十分で、人間-機械系の全体による実験によりダイナミックな状態でテストして総合的な評価をすることの重要性が強調されている。さらに、人間-機械系の評価は、経験の浅い人間による数多くの例より、熟練した操船経験者による実海域航行を想定した運航体制全体での総合的なシミュレータ実験の実施が、非常に有効であると言われている<sup>4)</sup>。従って、熟練した操船経験者によるシミュレータ実験を実施し、その結果による評価を行うことが、運航体制の評価方法として有効であると言える。そのため、運航体制全体による実験が不可欠となる。

また、シミュレータ実験は、ある想定した海域の条件下で行うもので、結果が、どの海域でも適用できるものではない。そのため、ある定められた対象海域に大型高速船運航を行うにはどのような運航体制が良いかを、シミュレータ実験で求めることを目標とする、合目的な運航体制を評価する手法を開発した。

#### 3.1.1 評価基準量の導出

評価は主に安全性の観点からなされる。したがって、安全性を何等かの方法で定量化し、比較可能にすることが必要である。

航行における安全とは、物理的に船舶が衝突しないことだけを意味するわけではない。航行の際に操船者は、自船の周囲に他船の進入を忌避する領域すなわち閉塞領域<sup>5)</sup>を設けていることが知られている。このことから、ここでは、航行の安全とは対象海域の操船者に心理的な脅威を与えない状態<sup>6)</sup>と定義することにする。

操船者に脅威を与えるものとして、閉塞領域を侵すことの他に、危険な見合いが生じた場合に海上衝突予防法にしたがって避航義務船が速やかに避航しないこ

とが挙げられる。しかし、相手船が高速船の場合は、危険な見合いが生じたら権利船、義務船の別なくどの場合でも高速船が避航しなければ衝突してしまう可能性が高い<sup>7)</sup>。また、その場合衝突までの時間は一般船同士に比べて格段に短い。これらのことより、一般船操船者が脅威を感じることもない大型高速船の避航開始の時点での一般船と大型高速船との距離を基準にして安全を定量化することも可能である<sup>8)</sup>。

また、航行の各時点における、通常は表面には表れないが種々の不測の事態によって顕在化する潜在的な危険の程度によって航行の各時点における安全を計測しようとの研究もなされている。

このように、評価基準として、それぞれ他の基準に置き換えることができず、かつ安全の指標として有効と思われる幾つかの基準を策定し、計測可能な量としてそれらの基準の量を求めることができるものを選択する。これを評価基準量という。ある海域で航行可能であるためには、関係者によって合意された評価基準量のすべてを満たすことが必要である。これらの評価基準量は既に報告されている値、あるいはシミュレータ実験で求めた値等で定量化して用いることになる。そして、評価基準として「限界避航開始距離」を用いた。この距離は、一般船操船者が脅威を感じることもない大型高速船が避航を開始した時点での一般船と大型高速船との距離である。シミュレータ実験を実施し、計測可能量である評価基準の量としての、距離を求めた。

### 3.1.2 限界輻輳度の導出

限界輻輳度は、これ以上の輻輳度の交通環境では評価基準を守れないとみなされる限界的な輻輳度であり、運航体制の評価において使用する交通環境を作成する際に使用される。運航体制として幾つかの方法が考えられるが、それらの有効性をシミュレータ実験で評価する際、有効性の違いが十分に表れると期待される交通環境で実施することが重要である。そのためには、標準的な運航体制(既に採用されている、あるいは、有効性がほぼ中間的と思われる運航体制の代替案)を使用したシミュレータ実験により求めた限界輻輳度で交通環境を作成し、運航体制の実験を実施することが有効である。

海域が輻輳しているということには種々の要素が関係している。それらの要素には、航行密度、航行船舶の速度分布、遭遇頻度、遭遇パターン、航行船舶の船種の構成、空き水域等がある。それらの要素を複合した輻輳度という指標は未だ開発されていない。それらの要素はすべて航行における困難さに影響するものであり、輻輳度とは、交通環境の困難度とも言える。

しかし、航行船舶の速度分布および船種構成が一定であれば、平均的な空き水域、自船に対する遭遇頻度

等は統計的に航行密度によって定まるとは明らかである。従って、すべての実験における交通環境の困難さを同一とするためには、航行船舶の速度分布および船種構成を一定にして、同じ航行密度における航行の実験を各実験とも十分な時間実施すれば、統計的に同一の結果と見なせる。

そこで、本研究では、輻輳度として船種を一つ、速度分布を一定にした航行密度を採用することにした。航行密度をもって限界輻輳度とする場合、限界航行密度という語を用いることにする。

また、将来合理的な輻輳度の定義が明らかになれば、それを使用することになる。

### 3.1.3 限界輻輳度と対象海域の輻輳度との比較

限界輻輳度が、対象海域の現実の交通環境における輻輳度と比較して甚だしくかけ離れているならば、シミュレータ実験による運航体制の評価を行うことには実際的な意味がなくなる。例えば、限界輻輳度が実際より低過ぎる場合は、どのような運航体制によっても実際の海域で対象高速船が高速航行することは不可能と考えられるからである。したがって、シミュレータ実験で求められる限界輻輳度を実際の海域における輻輳度と比較して評価することが必要である。実際の海域として東京湾を対象海域<sup>9)</sup>、<sup>10)</sup>として選んだ。

### 3.1.4 シミュレータ実験による評価量の導出と操船者へのアンケート

得られた限界輻輳度で交通環境を作り、それらと運航体制の方法案とを組み合わせるシミュレータ実験条件(以下、シナリオと呼ぶ)を設定し、シミュレータ実験を行う。その後、実験により得られた避航データを評価基準量で基準化する。避航データとして避航開始距離を用い、評価基準量である一般船操船者が脅威を感じることもない大型高速船の避航開始の時点での一般船と大型高速船との距離で割ることにより基準化する。基準化された避航データを評価量と呼ぶことにする。

また、評価量による評価の他に、運航体制が大型高速船の操船者の心理面での効果すなわち心理的な余裕の増加を評価することも重要である。したがって、操船者への心理面での効果を評価するためには操船者の印象あるいは意見等を考慮することが良い方法と言えるので、各実験終了後、運航体制の有効性に関する操船者の主観的評価を聞くためのアンケートを実施した。

運航体制の評価実験では、対象海域の特徴をより明確に表現した交通環境における運航体制のそれぞれの要素(支援機器等)の有効性の検討を実施することが重要であるため、限界輻輳度を求める場合と異なり、同一船種のみではなく、実海域と同じ船種で構成される交通環境を作成した。



### 3.1.5 運航体制の有効性の評価

運航体制の違いにより評価量に違いが出てくることが予想される。それらの違いを定量的に評価するためには種々の統計的な手法を応用することが有効である。

本研究では、評価量に分散分析を施すことにより、運航体制の違いによる評価量の違いの検定を実施した。

また、アンケート結果の解析には、0と1のカテゴリーデータの解析に有効な数量化理論Ⅲ類(注2)で解析することにより、運航体制と心理的余裕との関連を評価し、有効と思われる運航体制および支援手段を見出すことにした。

もし、このような評価により、検討してきた運航体制の代替案の中に対象海域の輻輳度での安全運航を保証するものが存在しないことが判明すれば、新たな運航体制を作成し、シミュレータ実験および評価をやり直すことになる。この段階でそのような運航体制の作成が不可能である場合には、対象海域での対象高速船の高速航行は不可能であるということになり、高速船の設計変更に戻る。

ここでは、評価基準量として限界輻輳度を採用したが、評価基準量が複数ある場合には、それら各々に付き評価が行われることになり、それらの評価結果に基づき総合評価を実施し、最適な運航体制を求めることになる。

### 3.1.6 評価基準量(避航開始限界距離)の導出

評価基準量とした一般船操船者に脅威を与えないぎりぎりの避航開始距離を、今後、避航開始限界距離という。この距離は、昼間と夜間では異なると思われるが、昼間のシミュレータ実験で求めたものを、夜間の実験においても使用している。これを求める実験方法については、昼間、および夜間のシミュレータ実験の個所で説明する。

避航開始限界距離は、一般船に対して、高速船が種々の方向から衝突コースで接近するシミュレータ実験を行い、一般船を操船する被験者にこのあたりで避航してほしい避航開始期待距離とこれ以上は我慢できない避航開始限界距離を申告してもらう。その結果を基に、避航開始限界距離を定めるものとする。

## 3.2 昼間航行のシミュレータ実験と運航体制評価<sup>11)</sup>

### 3.2.1 シミュレータ実験の概要

限界航行密度における運航体制を求めるため、まず、作業効率を図るため、目安とする限界航行密度を求める実験を実施した。次に、その航行密度を基にした交通環境を数種類作り、幾つかの運航体制とともにシナリオを作成して、シミュレータ実験を実施し、その後、それらの実験から得られた避航データより評価基準量で基準化して求めた評価量と操船者に実施したアンケート結果を用いて、その航行密度における運航体制の評

価を実施する。なお、シミュレータ実験で使用した、運航体制の要素となるレーダは他船の真の位置を点で表示し、要素の一つであるARPAは、レーダ画面上の他船の点から真の速度ベクトルを表示出来るものである。用いた大型高速船の操縦性能は、T S L相当を想定した。

### 3.2.2 限界航行密度

昼間の限界航行密度は次の実験によって求めた。

#### 3.2.2.1 シナリオ

他船の航行密度を2隻/nm<sup>2</sup>、4隻/nm<sup>2</sup>、7.5隻/nm<sup>2</sup>とした交通環境を実現するシナリオを作成した。目安となる航行密度を得るためであるから、他船として小型船(船長50m)のみを発生させた。また、これらのシナリオにおける運航体制は、標準的な運航体制の要素として周期3秒のレーダ、ARPA、援助者1名による情報支援から構成される。なお、これらのシナリオによる実験の後、これらの実験結果を基に設定した限界航行密度6隻/nm<sup>2</sup>の妥当性を検証するため、6隻/nm<sup>2</sup>の航行密度でのシナリオを作成し実験を行った。

#### 3.2.2.2 実験方法

上記のシナリオをランダムな順番で選びシミュレータ実験を行った。

操船者は操船補助者の支援を受けながら、南北方向シミュレータ実験開始時点で、自船が向いている方向のブイの列に沿い、以下に示す避航開始限界距離以遠で避航開始するよう努力しながら、約10分間操船する。

対小型船前方：1000m

対小型船後方：600m

そして各実験が終了する毎に、アンケートへの回答と、その実験での避航した時点における自船中心、鉛直上方向での自船の進行方向と他船の相対船位図に、避航した他船を確認してその船に印をつける。

なお、本実験前には大型高速船の操船感覚、景観画像における他船の見え方等に慣熟してもらった。

#### 3.2.2.3 実験結果

図3-1に避航開始時点における避航された他船を中心にした自船(大型高速船)の相対位置を、航行密度毎にまとめて示す。それらの図で、鉛直上方は避航された時点における他船の進行方向である。また、避航を開始した地点を○で囲み、その後の航跡を描いている。

また、表3-1にアンケート結果を示す。表3-1でわかるように、アンケートでは、交通環境および操船における困難さについて操船者の主観的評価を尋ねている。

図3-1(a)~(c)より、航行密度2隻/nm<sup>2</sup>、4

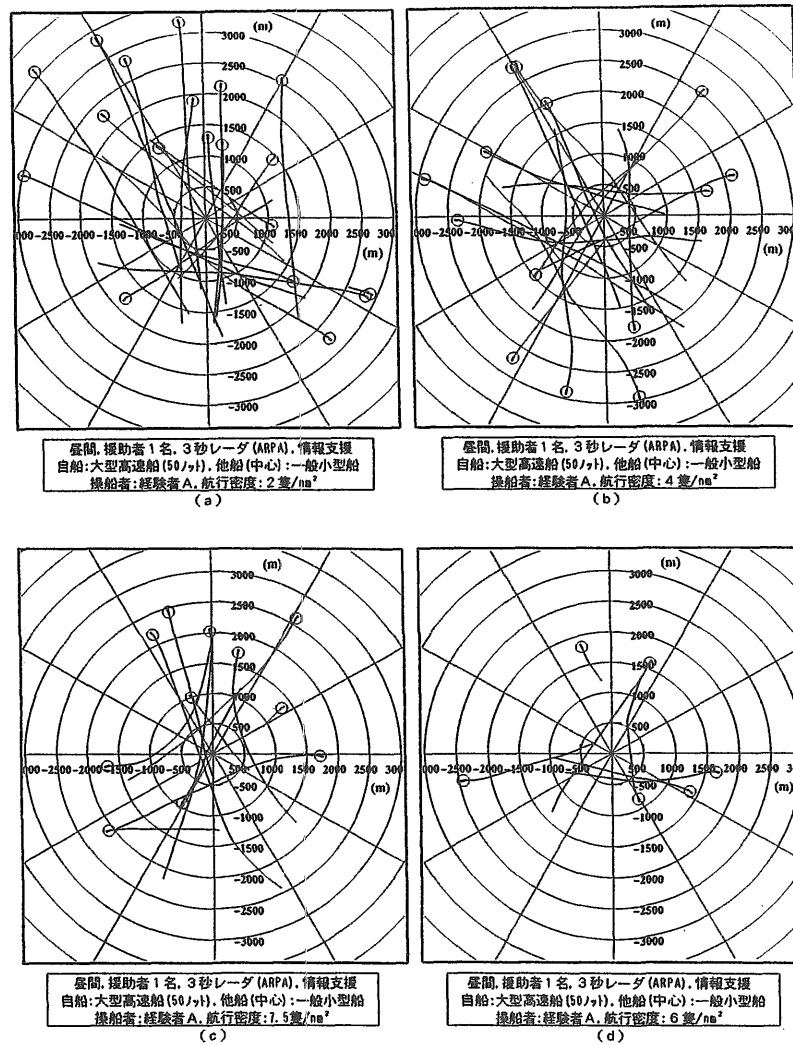


図3-1 避航開始時点における避航された他船を中心とした自船の相対位置

表3-1 アンケート結果のまとめ(昼間)

実験番号	自船	航行密度 隻/nm <sup>2</sup>	シナリオ中の 輻照度の差	編隊 場面の 連続性	東京湾 以上 に 連続 して いた	相手に 与えた 差	与えた 脅威の 種類	操船の 困難な 場面 の差	操船の 困難な 場面 の連続性	困難 な 場面 数	なぜ困難に感じたのか(回数)			一審 限界 の 遵守	どこまで 判断でき たか	それほどの 支援が立 った結果か	全体 中の 限界 遵守	この編隊 度は大型 高速船航 行可能か
											情報	判断・行動・船舶	環境					
①	大型高速船 50ノット	4	あまり 大きく なかつ た	かなり 連続し ていた	東京湾 以上 に 連続 して いた	少し 与えた	相手 船首に 自船を 向けた	大き かった	かなり 連続し ていた	3回	自視による収集困難(2) レーダによる収集困難(3)	避航判断が困難(1)	周りの避航スペース不足(1) 同時考慮の船が多い(2) 困難な出会いが連続(1)	質問 せず	質問 せず	質問 せず	質問 せず	質問 せず
②	大型高速船 50ノット	2	小さ かった	ほとん ど連続 してな かつた	それ以 下に非 常にす いてる	全く 与えな かつた	—	小さ かった	ほとん ど連続 してな かつた	0回	—	—	—	質問 せず	質問 せず	質問 せず	質問 せず	質問 せず
③	大型高速船 50ノット	2	大き かった	ほとん ど連続 してな かつた	東京湾 以下に 少しす いてる	かなり 与えた	自船 行動の 伝達が 不明確	大き かった	あまり 連続し てな かつた	1回	自視による収集困難(1)	避航判断が困難(1)	周りの避航スペース不足(1)	質問 せず	質問 せず	質問 せず	質問 せず	質問 せず
④	大型高速船 50ノット	7.5	小さ かった	かなり 連続し ていた	東京湾 以上に 連続し ていた	かなり 与えた	相手 船首に 自船を 向けた	小さ かった	かなり 連続し ていた	5回	自視による収集困難(4) レーダによる収集困難(3)	避航判断が困難(3) 判断時間の不足(2) 避航換船が困難(1) 自船の換艦性能不足(1)	周りの避航スペース不足(3) 同時考慮の船が多い(4) 困難な出会いが連続(3)	質問 せず	質問 せず	質問 せず	質問 せず	質問 せず
⑤	大型高速船 50ノット	2	あまり 大きく なかつ た	ほとん ど連続 してな かつた	それ以 下に非 常にす いてる	ほとん ど与え なかつ た	—	大き なかつ た	ほとん ど連続 してな かつた	0回	—	—	—	質問 せず	質問 せず	質問 せず	質問 せず	質問 せず
⑥	大型高速船 50ノット	4	あまり 大きく なかつ た	ほとん ど連続 してな かつた	東京湾 以上に 連続し ていた	ほとん ど与え なかつ た	—	小さ かった	ほとん ど連続 してな かつた	0回	—	—	—	質問 せず	質問 せず	質問 せず	質問 せず	質問 せず
⑦	大型高速船 50ノット	6	大き かった	かなり 連続し ていた	東京湾 以上に 連続し ていた	ほとん ど与え なかつ た	航路 距離が 短すぎ た	大き かった	あまり 連続し てな かつた	2回	—	—	周りの避航スペース不足(3) 同時考慮の船が多い(1)	どちら ともい えず	相手船へ の影響を 考慮した 避航判断	ARPAの使 用	でき た	条件付き で可能

隻/nm<sup>2</sup>、7.5隻/nm<sup>2</sup>において、避航開始限界距離を厳守できなかった例は存在しないことがわかる。しかし7.5隻/nm<sup>2</sup>の(c)において、避航開始限界距離すれすれで避航開始した例が存在することとアンケート結果より、それ以外の航行密度の場合に比べて7.5隻/nm<sup>2</sup>の場合は、操船者が感じる困難さがかなり大きいこと等より、限界航行密度を4隻/nm<sup>2</sup>と7.5隻/nm<sup>2</sup>のほぼ中間で切りのいい数である6隻/nm<sup>2</sup>とした。また、検証実験として、運航体制評価実験が終了してから実施した6隻/nm<sup>2</sup>の実験では、操船者は別であるが、避航開始限界距離が遵守されており、かつ心理的にも7.5隻/nm<sup>2</sup>の場合ほどの困難さを感じてはいないことがわかるため、限界航行密度を6隻/nm<sup>2</sup>としたことは妥当であったと思われる。

### 3.2.2.4 対象海域の航行密度との比較

この実験の海域は東京湾を対象としており、ここで得られた限界航行密度6隻/nm<sup>2</sup>は、東京湾の航行密度と比較すると、単純航行密度において浦賀水道の分離航路(北航)の最大航行密度(6.75隻/nm<sup>2</sup>)より少し低く、また、東京湾横断道路の西水路の最大航行密度(5.01隻/nm<sup>2</sup>)より少し高い。また、L換算係数(注3)で比較すると、この実験で使用した他船である小型船は船長50mの貨物船をモデルにしているため、浦賀水道の平均航行密度(6.72隻/nm<sup>2</sup>)より少し低く、東京湾横断道路の西水路の最大航行密度(4.25隻/nm<sup>2</sup>)よりかなり高いことがわかる。

以上より、ここで導出した限界航行密度(6隻/nm<sup>2</sup>)は、東京湾における最も輻輳している場合の平均的な値より高いが、最も輻輳している場合の最大値に比べると低いが、高速航行を考える場合は、この値で運航体制を評価することは、かなり厳しい評価となり意味があるといえる。

(注2)：数量化理論第Ⅲ類：サンプルがいくつかのカテゴリ分類されるとき、あるサンプルが属しているカテゴリと他のカテゴリ間やサンプル間の親近度を求める手法。

詳しくは、参考文献の14)参照のこと

(注3)：L換算係数：主に運航関係で用いる量、自船の船の長さをL1と遭遇した相手船の船の長さをL2とすると $L = (L_1^2 + L_2^2)^{1/2}$

## 3.2.3. 運航体制評価実験

### 3.2.3.1 シナリオ

高速船を自船とした運航体制として、レーダ(3秒周期、1秒周期)、ARPA(有、無)、操船援助者による支援(情報支援、判断支援)の組み合わせによるものを考え、それらによる支援が全くないものを含め5種類を検討した。

レーダ、ARPA、操船援助者による支援の他の支援

手段として、他の高速船情報の表示(レーダ画面上に一般船とは異なる色で表示)、また、高速船の航行レーンを示すブイを景観画像中に設置し、さらに電子海図を想定してそれらのブイの位置をレーダ画面上に表示した。

交通環境として、航行密度が6隻/nm<sup>2</sup>で、船種は、小型船が70%、中型船が20%、大型船が10%と設定した。また、他船高速船として、ジェットフォイル2隻、自船と同じ大型高速船1隻を発生させている。ジェットフォイルは東西方向のブイに沿って航行し、大型高速船は南北方向のブイに沿って南航し、自船に対して反航する。交通環境の1例を図3-2に示す。この図の▲はブイを表わしており、ブイの間隔は1nmである。

### 3.2.3.2 実験方法と実験結果

上記のシナリオをランダムな順番で選びシミュレータ実験を行った。

操船者は操船補助者の支援を受けながら、南北方向(シミュレータ実験開始時点で、自船が向いている方向)のブイの列に沿い、以下に示す避航開始限界距離より以遠で避航開始するよう努力しながら、約10分間操船する。

	前方	後方
対小型船：	1000m	600m
対中型船：	1250m	800m
対大型船：	1500m	1000m

実験結果として得られるものは、各実験が終了する毎に、実施したアンケートと避航開始時点での他船を中心とした自船の相対位置の図である。

## 3.2.4 運航体制の有効性評価

3.2.4.1 避航開始距離の分散分析<sup>12)、13)</sup>による評価  
分散分析(1元配置)で用いた数値は以下のものである。

### (1) 避航開始限界比

評価量として避航開始限界比(避航開始距離を船種、接近方向毎の避航開始限界距離で割った値)を用いた。ただし、0.8未満の数値は避航開始失敗として分散分析には用いなかった。避航開始の失敗は、避航方法がなかなか見出せない等の避航が非常に困難な状況に遭遇したことが原因とも考えられ、その値も分析で使用すれば運航体制のレベルによる違いを隠すことになりかねないからである。

### (2) 避航開始失敗率

これは、避航開始の失敗の数を避航を実施した回数で割った値である。避航開始の失敗は、交通環境の困難度の違いが主な原因と考えられる場合もあるが、運航体制のレベルの違いがその原因であることも考えられる。

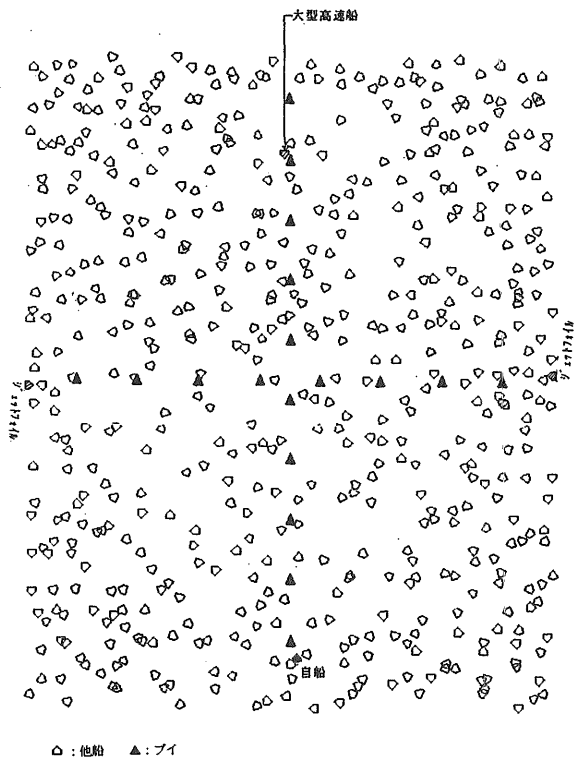


図3-2 交通環境の1例

表3-2 運航体制の支援項目

		レーダ				
		なし	周期 3秒		周期 1秒	
			ARPA あり	ARPA なし	ARPA あり	ARPA なし
援助者による支援方法	なし	運航体制A (4秒) ①, ⑤, ⑬, ⑯				
	情報支援	運航体制D (4秒) ⑥, ⑩, ⑭, ⑮	運航体制B (3秒) ②, ④, ⑦		運航体制C (3秒) ③, ⑧, ⑨	
	判断支援	運航体制E (3秒) ⑦, ⑧, ⑪				

ここでは、まず表3-2に示すAからEまでの5種類の運航体制の各々を組とした場合での分散分析を行い、その後、レーダ周期の違いを組にしたもの、ARPAの有無を組にしたもの、さらに援助者による支援方法の違いを組にしたものの分散分析を行った。

避航開始限界比による分散分析の結果、25%の危険率で、ARPAの有無、レーダ周期の違いによる避航開始限界比の平均値の違いがあると検定することができる。また、避航開始限界比の平均値はレーダ周期が高い方が、また、ARPAのある方が小さくなっている。このことはおそらく運航体制のレベルが上がれば、心理的に余裕が生まれ避航開始限界比を十分に意識して不必要に早く避航せず、航行の効率をも考えて操船するようになることを意味していると考えられる。運航体制のレベルが上がることによって生じる余裕時間を用いて、避航するタイミングを一定にするよう操船す

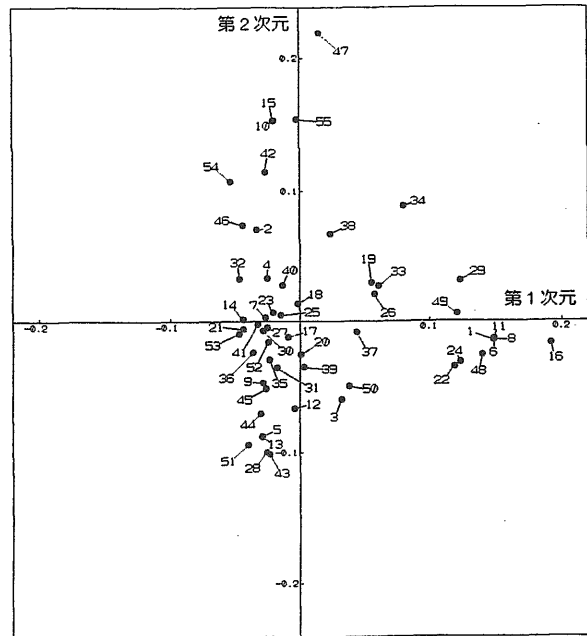


図3-3 数量化理論Ⅲ類による解析例 (昼間のアンケート結果)

ることが可能になり、安全であるとともに効率的な航行が可能になると言える。

また、まったく支援が無い場合でも支援のある場合と同様の良い結果を得ている例もある。これは、熟練した操船者が、判断の過程を適宜簡略化し、避航開始の時点が遅らせることのないようにして安全のレベルを一定に保つ能力があることを示しているとも考えられるが、支援がない場合の交通環境がたまたま支援がある場合の交通環境より簡単であることも原因の一つとも考えられ、このことはアンケート結果の解析からも伺える。

### 3.2.4.2 アンケート結果の数量化理論Ⅲ類による評価

図3-3に数量化理論Ⅲ類<sup>14)</sup>による解析を施した結果を示す。この図3-3の第1次元の軸は1以外で最大の固有値に対応する軸であり、第2次元の軸は、その次の大きさの固有値に対応する軸である。表3-3に、解析に使用したカテゴリーを列挙した。それらのカテゴリーは、実験条件、実験毎の被験者の意見等である。ある実験条件の時に、ある意見が生じる場合が多ければ、図3-3における実験条件とその意見の点が近くなる。アンケートでの回答パターンが似ているカテゴリー同士には近い数値を与え、似ていないカテゴリーには異なった数値を与える方法であるため、固有値毎に座標軸を設定し、固有値毎に与えられる数値を座標とする点を打つと、似ているカテゴリーは近くに固まり、似ていないカテゴリーは遠くに離れることになる。カテゴリーの分離が不十分であればさらにより小さい固有値に対応する座標軸を設定することに

表3-3 数量化理論Ⅲ類で用いたカテゴリーの例

カテゴリー			カテゴリー			
分類	No.	項目	分類	No.	項目	
運航体制および支援手段	1.	支援手段なし(運航体制A)	操船および判断評価	31.	避航開始限界距離の遵守：できた	
	2.	ARPAあり		32.	避航開始限界距離の遵守：どちらともいえない	
	3.	ARPAなし		33.	避航開始限界距離の遵守：できなかった	
	4.	3秒レーダあり		34.	周囲の船舶に与えた脅威の有無：ほとんど与えない	
	5.	1秒レーダあり		35.	周囲の船舶に与えた脅威の有無：少し与えた、かなり与えた	
	6.	レーダなし		36.	判断レベル：目先の避航判断のみ	
	7.	高速船情報あり		37.	判断レベル：相手船への影響を考慮した避航判断	
	8.	高速船情報なし		38.	判断レベル：航行海域内の主観的最適パスの考慮	
	9.	情報支援あり				
	10.	判断支援あり				
	11.	援助者による支援なし				
	12.	3秒レーダと情報支援(運航体制B)				
	13.	1秒レーダと情報支援(運航体制C)				
	14.	3秒レーダと情報支援とARPA(運航体制D)				
	15.	3秒レーダと判断支援とARPA(運航体制E)				
交通環境評価	16.	操船困難な場面間の困難度の違い：小さい	困難の理由	39.	情報収集が困難：目視の情報収集が困難 得られる情報が不十分 レーダの情報収集が困難	
	17.	操船困難な場面間の困難度の違い：あまり大きくない		40.	状況判断・行動計画・意思決定が困難：避航判断が困難 判断時間が不足	
	18.	操船困難な場面間の困難度の違い：大きい		41.	操船実行が困難：避航操船が困難 操縦性能が不十分	
	19.	操船困難な場面の連続性：ほとんど連続していない		42.	援助者との意思疎通困難	
	20.	操船困難な場面の連続性：あまり連続していない	役立った支援	43.	3秒のレーダが役立った	
	21.	操船困難な場面の連続性：かなり連続していた		44.	情報支援が役立った	
	22.	東京湾と比較した輻輳度：あまり輻輳していなかった		45.	高速船情報が役立った	
	23.	東京湾と比較した輻輳度：それ以上に少し輻輳していた		46.	ARPAが役立った	
	24.	見合関係の困難度：簡単		47.	判断支援が役立った	
	25.	見合関係の困難度：あまり難しくない		必要な支援	48.	レーダが必要
	26.	避航可能スペース：かなりあった			49.	情報支援が必要
	27.	避航可能スペース：あまりなかった	50.		ARPAが必要	
	28.	避航可能スペース：ほとんどなかった	51.		判断支援が必要	
	29.	同時に考慮すべき船舶数：あまり多くなかった	52.		意志疎通の改善が必要	
	30.	同時に考慮すべき船舶数：多かった、たいへん多かった	53.	他船との通信が必要		
			54.	判断支援の内容の高度化が必要		
			55.	この運航体制で十分		

なる。

例として、「ARPA有り」の категорияと「ARPAが役立った」の категорияが近く、このことは操船者がARPAの有効性を認めていることを示していると考えられる。これと表裏一体となるものとして、「ARPAなし」と「ARPAが必要」とが近く、この操船者はARPAの必要性を感じていることがわかる。等の分析結果が得られた。

3.2.5 結果のまとめ

以下のことが明らかになった。

- (1)シミュレータ実験により、この海域で大型高速船が避航開始限界距離を遵守可能な限界航行密度は6隻/nm<sup>2</sup>である。
- (2)運航体制のレベルが上がることによって生じる余裕時間を用いて、操船者は避航するタイミングを一定にするよう操船することが可能になり、安全であるとともに効率的な航行が可能になることを示していると考えられる。
- (3)ARPAおよび判断支援が操船者の判断に有効であ

ることが示された。

(4)大型高速船は東京湾の浦賀水道の分離航路および川崎沖の錨泊地を外して航行すれば、東京湾での高速航行(50kn)は可能と思われる。また、その際の運航体制は3秒周期レーダ、ARPA、判断支援によるものが最適と思われる。

3.3 夜間航行のシミュレータ実験と評価<sup>15)</sup>

3.3.1 シミュレータ実験の概要

大型高速船の昼間の運航と同様に、大型高速船(船長127m、50ノット)の夜間の運航を想定した運航体制の評価を実施した。検討対象となる運航体制を構成する主な要素は、レーダ、ARPA、援助者による支援、および暗視装置である。

運航評価手順は、昼間運航の場合と同様である。シミュレータ実験で使用したレーダ、ARPA模擬装置は、昼間の実験と同じであるが、夜間航行特有の機器として、暗視装置があり熱感応型を模擬したもので、船影が明瞭に見えるものである。

また、評価基準量は、昼間の値を使用した。

シミュレータ実験による大型高速船の運航体制評価 (その2: 夜間の航行)

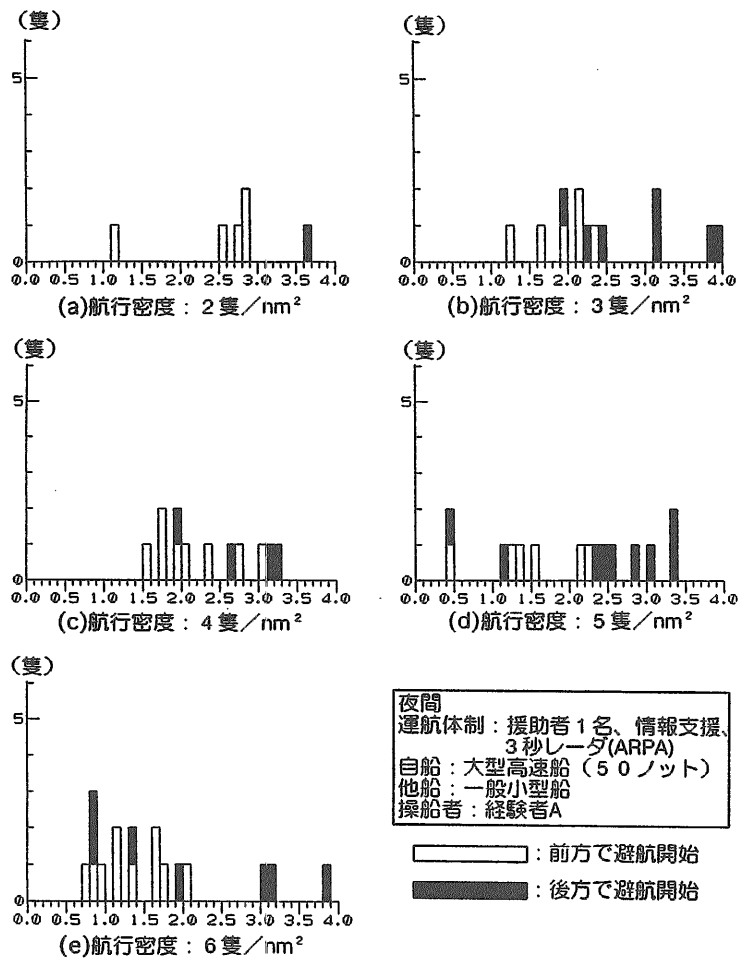


図3-4 各航行密度における避航開始限界比のヒストグラム

表3-4 アンケート結果のまとめ(夜間)

実験 順	自船	航行 密度 隻/nm <sup>2</sup>	シナリ オ中の 輻輳度 の差	輻輳 場面の 連続性	夜間東 京湾と 比較し た連続 性	相手に 脅威を 与えた か	与えた 脅威の 種類	操船の 困難な 場面	操船の 困難な 場面 の連続 性	困難 な 場面 数	なぜ困難に感じたのか(回数)			いちばん 限界の 厳守 できた か	困難な ところで はそれ はどの 支援が 役に立 った 結果か
											情報	判断・行動・船舶	環境		
①	大型高速船 50ノット	4	あまり 大きく なかつ た	かなり 連続し ていた	少し輻 輳して いた	殆ど 与えな かつた	相手船 首に自 船を向 けた	あまり 大きく なかつ た	かなり 連続し ていた	2回	目視による収集が困難(3) レーダによる収集が困難(2) 夜間であること	避航判断が困難(1)	同時考慮の船が多い(1)	できた	相手船へ の影響を 考慮した 避航判断 ARPAの使用 情報+判断支援
②	大型高速船 50ノット	2	小さ かつた	ほとん ど連続 してな かつた	それ以 下に非 常にす いてる	殆ど 与えな かつた	避航開始 が遅れた 航路距離 不足	小さ かつた	ほとん ど連続 してな かつた	0回	—	—	—	どちら ともい えず できた	航行海域 の主観的 避航パス の考慮 ARPAの使用 3秒レーダの使用
③	大型高速船 50ノット	3	小さ かつた	ほとん ど連続 してな かつた	東京湾 以上に 少しい ている	殆ど 与えな かつた	航路距離 不足	小さ かつた	殆ど 連続 してな かつた	0回	—	—	—	できた	相手船へ の影響を 考慮した 避航判断 ARPAの使用 情報+判断支援
④	大型高速船 50ノット	6	大き かつた	かなり 連続し ていた	東京湾 以上に かなり 輻輳	かなり 与えな かつた	相手に自 船に向けた 航路距離 不足	大き かつた	かなり 連続し ていた	2回	目視による収集が困難(1) レーダによる収集が困難(1) 得られる情報が不十分(1) 夜間であること	避航判断が困難(1) 判断時間の不足(1)	同時考慮の船が多い(1) 困難な出会いが連続(1)	できな かつた	目先の避 航判断の み 情報+判断支援
⑤	大型高速船 50ノット	5	大き かつた	かなり 連続し ていた	東京湾 以上に かなり 輻輳	かなり 与えな かつた	相手に自 船に向けた 航路距離 不足	大き かつた	かなり 連続し ていた	3回	目視による収集が困難(1) レーダによる収集が困難(1) 夜間であること	避航判断が困難(1) 判断時間の不足(1) 避航換船が困難(1)	同時考慮の船が多い(1) 困難な出会いが連続(1)	できな かつた	目先の避 航判断の み ARPAの使用 情報+判断支援
⑥	大型高速船 50ノット	4	あまり 大きく なかつ た	あまり 連続し ていた	東京湾 と同程 度に 連続	ほとん ど与え なかつ た	—	小さ かつた	ほとん ど連続 してな かつた	0回	—	—	—	できた	相手船へ の影響を 考慮した 避航判断 ARPAの使用 情報+判断支援
⑦	大型高速船 50ノット	2	あまり 大きく なかつ た	ほとん ど連続 してな かつた	それ以 下に非 常にす いてる	全く 与えな かつた	—	小さ かつた	ほとん ど連続 してな かつた	0回	—	—	—	できた	相手船へ の影響を 考慮した 避航判断 ARPAの使用 情報+判断支援
⑧	大型高速船 50ノット	6	大き かつた	かなり 連続し ていた	東京湾 以上に かなり 輻輳	少し 与えな かつた	相手に自 船に向けた 航路距離 不足	大き かつた	かなり 連続し ていた	1回	目視による収集が困難(1) 夜間であること	避航判断が困難(1)	避航可能パスがない(1)	できな かつた	目先の避 航判断の み 3秒レーダの使用 情報+判断支援
⑨	大型高速船 50ノット	3	小さ かつた	ほとん ど連続 してな かつた	それ以 下に非 常にす いてる	全く 与えな かつた	—	小さ かつた	ほとん ど連続 してな かつた	0回	—	—	—	できた	相手船へ の影響を 考慮した 避航判断 ARPAの使用 情報+判断支援
⑩	大型高速船 50ノット	5	あまり 大きく なかつ た	あまり 連続し てな かつた	東京湾 と同程 度に 連続	ほとん ど与え なかつ た	—	あまり 大きく なかつ た	ほとん ど連続 してな かつた	1回	目視による収集が困難(1)	避航判断が困難(1)	同時考慮の船が多い(1)	どちら ともい えず できた	相手船へ の影響を 考慮した 避航判断 3秒レーダの使用 情報+判断支援

3.3.2 限界航行密度

3.3.2.1 シナリオ

他船の航行密度を2隻/nm<sup>2</sup>、3隻/nm<sup>2</sup>、4隻/nm<sup>2</sup>、5隻/nm<sup>2</sup>、6隻/nm<sup>2</sup>、とした交通環境を実現するシナリオを航行密度毎に2通りずつ作成した。他船として小型船(船長50m)のみを発生させた。シナリオの運航体制の要素としては、周期3秒のレーダ、ARPA、援助者1名による情報支援である。

3.3.2.2 実験方法

上記のシナリオをランダムな順番で選ビシミュレータ実験を行った。各実験における実験方法は昼間での実験と同様である。

3.3.2.3 実験結果

図3-4に各航行密度における避航開始限界比のヒストグラムを示す。図3-4の横軸は避航開始限界比であり、縦軸は0.1毎の避航開始限界比で避航された他船の隻数である。また、表3-4に実験毎のアンケート結果を示す。アンケートでは、各実験における交通環境の主観的評価、操船者が感じた避航の困難さ等を質問している。

結果として、航行密度2~4隻/nm<sup>2</sup>において避航開始限界距離を厳守できなかった例は存在しない。しかし5および6隻/nm<sup>2</sup>においては、避航開始限界距離を遵守できない例が存在しており、また、アンケー

ト結果からも、4隻/nm<sup>2</sup>以下の航行密度の場合に比べて操船者が感じる困難さがかなり大きい。以上より、夜間の限界航行密度を4隻/nm<sup>2</sup>とした。

3.3.2.4 対象海域の航行密度との比較

対象海域とした東京湾の航行密度と、ここで得られた限界航行密度4隻/nm<sup>2</sup>は、単純航行密度において浦賀水道の分離航路(南航)の最大航行密度(8.84隻/nm<sup>2</sup>)よりかなり低く、また、同水道(北航)の平均航行密度(2.21隻/nm<sup>2</sup>)、さらに、東京湾横断道路の西水路の最大航行密度(1.21隻/nm<sup>2</sup>)よりかなり高い。東京湾でも最も輻輳度の高い水域の一部である浦賀水道と平均的な海域である東京湾横断道路の西水路近傍の2つの領域での比較であるが、限界航行密度(4隻/nm<sup>2</sup>)は、東京湾の平均的な夜間の航行密度より高く、最も輻輳している海域の平均的な航行密度より若干低いと言えよう。したがって、東京湾の夜間航行を想定して運航体制評価実験を行うことには意味がある。

3.3.3 運航体制評価実験

3.3.3.1 シナリオ

ここでは、運航体制として、レーダ(3秒周期、1秒周期)、ARPA(有、無)、操船援助者による支援(情報支援、判断支援)、暗視装置(有、無)、識別灯(有、無)の組み合わせによるものを考える。ここでは運航

表 3-5 操船支援の調査パラメータ

操船支援	パラメータ
レーダ	なし、表示周期3秒、表示周期1秒
ARPA	なし、あり
高速船情報表示	なし、あり
援助者による支援	なし、情報支援のみ、情報と判断支援
暗視装置（夜間航行時）	なし、あり
高速船識別灯（夜間航行時）	なし、あり

体制として実現可能性のある6種類の運航体制を検討した(表3-5)。

レーダ、ARPA、操船援助者による支援、暗視装置以外に提供される、共通した支援手段としては、高速船情報の表示(レーダ画面上に一般船とは異なる色で表示)、高速船の航行レーンを示すブイ(景観画像中に設置)、および電子海図(ブイの位置をレーダ画面上に船とは異なる色で表示)等がある。

交通環境として、航行密度4隻/で、船種は、小型船が70%、中型船が20%、大型船が10%である。この船種構成は、昼間、夜間を通しての平均的な値である。また、他船高速船として、ジェットフォイル2隻、自船と同じ大型高速船1隻を発生させている。用意したシナリオ1~15をランダムな順番で選びシミュレータ実験を行った。

3.3.3.2 実験方法と実験結果

実験はシナリオをランダムに選び、実験を行った。結果は、アンケート結果と避航開始限界比のヒストグラムを運航体制毎にまとめたものである。

3.3.4 運航体制の有効性評価

3.3.4.1 避航開始距離の分散分析による評価

分散分析(1元配置)で用いた数値は以下のものである。

- 避航開始限界比
- 避航開始失敗率

ここでは、6種類の運航体制の各々を組にしたもの、レーダ周期の違いを組にしたもの、ARPAの有無を組にしたもの、援助者による支援方法の違いを組にしたもの、暗視装置の有無を組にしたものについてそれぞれ分散分析を行った。

ここで用いた交通環境のもとでの夜間航行においては、ARPAがなければ、レーダがあっても他船の動向を認識することが困難で情報収集および状況判断が遅れ、したがって、行動計画および避航操船の実行が遅れて避航開始限界距離を遵守することは困難であると思われる。また、ARPAがあれば、ARPAがない場合に比べると状況判断までの時間が短縮されて生じた余裕時間を用いて行動計画をより十分に行えるが、行動計画に当てられた時間が長くなり結果として全体的に

避航開始がARPAなしの場合に比べて遅れ、避航開始限界比は小さくなったと考えられる。しかし、避航開始限界距離を下回らないで避航開始するために必要な余裕はあり、避航開始の失敗は減少したと思われる。

また、ARPAに判断支援が加わることにより、情報のみの支援の場合に比べて行動計画に要する時間が短縮され、避航開始限界比が大きくなったと思われる。また、避航開始限界比が大きくなったため、避航開始限界比の取り得る値の範囲が広くなり、結果として避航開始限界比の標準偏差は情報支援のみの場合より大きくなっている。この場合の避航開始限界比、避航開始失敗率の平均値は、同じ運航体制のもとでの昼間の航行の結果とほぼ一致している。

アンケート結果から、暗視装置は有効との回答が多く、暗視装置があればさらに余裕が大きくなると思われる。しかし、暗視装置が加わっても避航開始限界比は統計的に有意なほど大きくなってはいない。このことは余裕があっても必ずしも避航開始限界比の増加に結びつくことにはならず、次節のアンケート結果の解析にあるように、暗視装置が加わりそれとともに援助者の数が増すことによりかえって意思の疎通の困難が生じ、操船者の判断過程に遅れが生じたためと考えられる。

3.3.4.2 アンケート結果の数量化理論Ⅲ類による評価

アンケート結果に数量化理論Ⅲ類による解析を施した結果を示す。図3-5より、「2.ARPAあり」

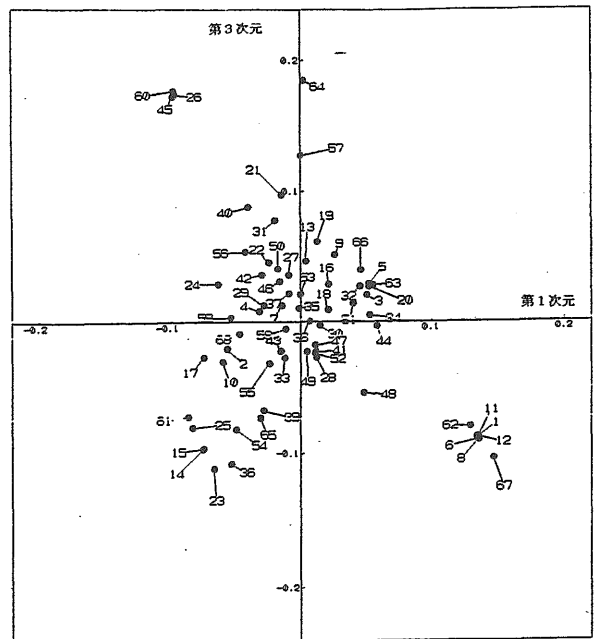


図 3-5 数量化理論Ⅲ類による解析例 (夜間のアンケート結果)



の категорияと「59. ARPAが役立つ」の категорияが近く、このことは操船者はARPAの有効性を認めていることを示していると考えられる。以下、categoryを「」で示す。これと表裏一体となることとして、「3. ARPAなし」と「63. ARPAが必要」とが近く、この操船者はARPAの必要性を感じていることがわかる。

また、「1. 支援手段なし」と「62. レーダ必要」および「67. 高速船識別灯」が近く、支援が何もない場合はまずレーダ、高速船識別灯を必要と考えることを示していると思われる。

さらに、「10. 判断支援あり」、「2. ARPAあり」と「68. この運航体制で十分」とが近く、ARPA、判断支援からなる運航体制はこの操船者にとって、夜間において、シミュレータ実験で用いた交通環境で航行するのに十分との印象を与えていると思われる。「15. 暗視装置あり」と「61. 暗視装置役立つ」が近く、この操船者は暗視装置の有効性を認めていることを示していると考えられる。また、「15. 暗視装置あり」と「68. この運航体制で十分」との距離は、「10. 判断支援あり」、「2. ARPAあり」と「68. この運航体制で十分」との距離よりかなり長い、このことは、この操船者はARPAおよび判断支援があれば暗視装置がなくとも夜間での航行には既に十分と考えているからと思われる。しかし、「15. 暗視装置あり」と「54. 援助者との意思疎通困難」が近く、支援機器が増えることによる援助者の増加に伴い、意思疎通の問題が表面化することが見受けられる。こうした意思疎通の問題は、操船チームの訓練、あるいはどの機器の情報であるかという識別のための特殊なことばの使用等により改善可能と思われる。

アンケートでは高速船の識別灯の有効性を回答した例は存在しなかった。おそらく、レーダ画面上に高速船の情報が表示されているのでレーダがあれば高速船の識別灯の必要を感じないと思われる。しかし、高速船の情報が無い場合は、上述のように高速船の識別灯の必要を回答している。

### 3.3.5 結果のまとめ

以下のことが明らかになった。

- (1)シミュレータ実験により、夜間においてここで考慮した大型高速船が避航開始限界距離を遵守可能な限界航行密度は4隻/nm<sup>2</sup>である。
- (2)シミュレータ実験結果より求めた評価量を分散分析した結果、運航体制の違いにより避航開始限界比および避航開始失敗率の分散に違いが生じ、ARPAがない場合はそれ以外の運航体制の場合より避航開始失敗率が高い。また、ARPAに判断支援が加わることにより余裕は大きくなり、避航開始限界比、避航開始失敗率ともこれと同じ運航体制で、限界航行密度(6隻/nm<sup>2</sup>)で同じ船種構成の交通環境における昼間の航行の場合とほぼ同じ値になる。

nm<sup>2</sup>)で同じ船種構成の交通環境における昼間の航行の場合とほぼ同じ値になる。

(3)避航開始距離の分散分析、およびアンケート結果の数量化理論Ⅲ類による解析から、夜間航行における運航体制の要素として、ARPA、判断支援、暗視装置が操船者の判断に有効であることが示された。しかし、支援機器が増えることによる援助者の増加に伴い表面化する意思疎通の問題の改善が必要である。

(4)評価基準を避航開始限界距離のみにし、アンケート結果を加味して評価した場合、ここで用いた操縦性能を持つ大型高速船は4隻/nm<sup>2</sup>以下の航行密度の海域における夜間の高速航行(50kn)は可能と思われる。また、その際の運航体制は3秒周期レーダ、ARPA、判断支援によるものが最適と思われる。

## 3.4 主成分分析による解析<sup>16)</sup>

### 3.4.1 主成分分析について

前述した昼間、夜間のシミュレータ実験で用いたシナリオでは、操船者が優れた技量、能力によって航行の困難さを吸収してしまい、想定した以上に、客観的な余裕時間や距離としての支援効果の現われ方が少ない結果となった。一方、操船者へのアンケートおよびインタビューでは、各種の支援の効果に対する主観的な意見が述べられている。このため、熟練した操船者の主観的な意見は、高速航行の安全性を評価する上で非常に貴重である。そうした意見を汲み上げるため、このアンケート結果を対象として、操船支援の効果に対する操船者の主観的な評価の解析を、変数が多岐にわたり、かつ、それぞれ複雑に関連しているデータの解析に有用な主成分分析法を用いて行った。主成分分析は、変数がたくさんある複雑なデータをより少ない主成分という直交した変数に整理する手法である<sup>17)</sup>。

### 3.4.2 シミュレータ実験

昼間、夜間のシミュレータ実験におけるアンケートの部分を少し詳細に述べる。

#### 3.4.2.1 シミュレータ実験のアンケートの取り方

シミュレータ実験において、操船者には、1回の実験が終了する度に、その実験に関するアンケート用紙に回答を記入してもらった。アンケートの回答は、言葉による選択肢を用意し、回答しやすいように配慮した。また、実験を行なう前に、アンケートについての説明を一通り行ない、疑問点は明らかにし、アンケート回答中の不明な点については、その都度説明した。シミュレータ実験は昼間と夜間の航行を対象にして、昼間を17回、夜間を24回行った。

#### 3.4.2.2 調査した操船支援

本シミュレータ実験にて調査した操船支援を表3-

表3-6 夜間航行のアンケート項目と回答

1. 暗視装置 ある 1 ない 0	17. 避航操船が困難 はい 1 いいえ 0	前項の判断レベル達成に役立った支援は
2. 高遠船識別灯 ある 1 ない 0	18. 自船操縦性能が不十分 はい 1 いいえ 0	
3. ARPA ある 1 ない 0	19. 高遠船との遭遇を意識 はい 1 いいえ 0	26. ARPAが役立った はい 1 いいえ 0
4. 表示周期1秒のレーダ ある 1 ない 0	一番操船が困難な所では	27. 情報支援が役立った はい 1 いいえ 0
5. 表示周期3秒のレーダ ある 1 ない 0		28. 高遠船情報が役立った はい 1 いいえ 0
6. 援助者からの情報支援 ある 1 ない 0	20. 東京湾と比べて幅狭していた 東京湾以上に幅狭 2 同程度に幅狭 1 あまりしていない 0	29. 判断支援が役立った はい 1 いいえ 0
7. 援助者からの情報と判断支援 ある 1 ない 0	21. 困難な見合関係だった 難しい見合関係 2 あまり難しくない 1 簡単な見合関係 0	30. 暗視装置が役立った はい 1 いいえ 0
8. 操船困難な場面とやさしい場面の差 大きかった 2 あまり大きくない 1 小さかった 0	22. 避航可能スペースは かなりあった 2 あまりなかった 1 ほとんどなかった 0	操船判断レベル向上に必要な支援
9. 避航開始限界距離の厳守 できた 1 どちらともいえず 0 できなかった -1	23. 同時に考慮すべき船舶は 多かった 3 たいへん多かった 3 多かった 2 あまり多くなかった 1 少なかった 0	
前項の厳守が困難だった理由	24. 周囲の船舶に脅威を与えた かなり与えた 3 少し与えた 2 ほとんど与えない 1 全く与えなかった 0	31. 今のままで十分 はい 1 いいえ 0
10. 自視の情報収集が困難 はい 1 いいえ 0	25. 操船判断のレベル 海域内の主観的 最適パスを考慮した 3 相手への影響を 考慮した避航判断 2 目先の判断のみ 1	32. ARPAが必要 はい 1 いいえ 0
11. 情報収集時の援助者との意志疎通困難 はい 1 いいえ 0		33. レーダが必要 はい 1 いいえ 0
12. 援助者からの情報不適切 はい 1 いいえ 0		34. 判断支援が必要 はい 1 いいえ 0
13. 得られる情報が不十分 はい 1 いいえ 0		35. 援助者との意志疎通の改善が必要 はい 1 いいえ 0
14. 避航判断が困難 はい 1 いいえ 0		36. 暗視装置が必要 はい 1 いいえ 0
15. 避航判断の時間が不足 はい 1 いいえ 0		37. 高遠船識別灯が必要 はい 1 いいえ 0
16. 判断時の援助者との意志疎通困難 はい 1 いいえ 0		38. 情報支援が必要 はい 1 いいえ 0
		39. 操船困難な場面は連続していた 連続していた 2 あまりしていない 1 ほとんどしていない 0
		40. 困難な場面の数 場面数をそのまま数量化した 2回 2 1回 1 0回 0

表3-7 昼間航行のアンケート項目と回答

1. ARPA ある 1 ない 0	一番操船が困難な所では	24. 情報支援が役立った はい 1 いいえ 0
2. 表示周期1秒のレーダ ある 1 ない 0	16. 東京湾と比べて幅狭していた 東京湾以上に幅狭 2 同程度に幅狭 1 あまりしていない 0	25. 高遠船情報が役立った はい 1 いいえ 0
3. 表示周期3秒のレーダ ある 1 ない 0	17. 困難な見合関係だった 難しい見合関係 2 あまり難しくない 1 簡単な見合関係 0	26. 判断支援が役立った はい 1 いいえ 0
4. 援助者からの情報支援 ある 1 ない 0		18. 避航可能スペースは かなりあった 2 あまりなかった 1 ほとんどなかった 0
5. 援助者からの情報と判断支援 ある 1 ない 0	19. 同時に考慮すべき船舶は 多かった 3 たいへん多かった 3 多かった 2 あまり多くなかった 1 少なかった 0	
6. 操船困難な場面とやさしい場面の差 大きかった 2 あまり大きくない 1 小さかった 0	20. 周囲の船舶に脅威を与えた かなり与えた 3 少し与えた 2 ほとんど与えない 1 全く与えなかった 0	27. 今のままで十分 はい 1 いいえ 0
7. 避航開始限界距離の厳守 できた 1 どちらともいえず 0 できなかった -1	21. 操船判断のレベル 海域内の主観的 最適パスを考慮した 3 相手への影響を 考慮した避航判断 2 目先の判断のみ 1	28. ARPAが必要 はい 1 いいえ 0
前項の厳守が困難だった理由		29. レーダが必要 はい 1 いいえ 0
8. 自視の情報収集が困難 はい 1 いいえ 0	前項の判断レベル達成に役立った支援は	30. 判断支援の内容の高度化が必要 はい 1 いいえ 0
9. レーダの情報収集が困難 はい 1 いいえ 0		31. 判断支援が必要 はい 1 いいえ 0
10. 得られる情報が不十分 はい 1 いいえ 0	22. ARPAが役立った はい 1 いいえ 0	32. 援助者との意志疎通の改善が必要 はい 1 いいえ 0
11. 避航判断が困難 はい 1 いいえ 0	23. 表示周期3秒のレーダが役立った はい 1 いいえ 0	33. 高遠船情報が必要 はい 1 いいえ 0
12. 避航判断の時間が不足 はい 1 いいえ 0		34. 情報支援が必要 はい 1 いいえ 0
13. 情報収集時の援助者との意志疎通困難 はい 1 いいえ 0		35. 他船との交信が必要 はい 1 いいえ 0
14. 避航操船が困難 はい 1 いいえ 0		36. 操船困難な場面は連続していた 連続していた 2 あまりしていない 1 ほとんどしていない 0
15. 自船操縦性能が不十分 はい 1 いいえ 0		37. 困難な場面の数 場面数をそのまま数量化した 2回 2 1回 1 0回 0

5に示す。

レーダは「レーダ表示がない」、「表示周期3秒レーダ」、「表示周期1秒レーダ」の3種類を調べた。両レーダとも、1秒ごとに正しい値を得ることができるが、その表示を3秒ごとに行なうのか1秒ごとに行なうのかが相違点である。ARPAは「なし」、「あり」の2種類を調査した。援助者による支援は、操船者の隣に「援助者がいない」、「援助者が情報のみの支援をする」、「情報だけでなく判断の支援まで行う」の3種類である。以上は、昼間と夜間に共通している操船支援である。

夜間の航行にはさらに、暗視装置が「なし」の場合と「あり」の場合の2種類、大型高速船、ジェットフォイルとも高速船の識別灯が「なし」、「あり」の2種類を調べた。

昼間の航行は、援助者もレーダもない組み合わせ、援助者が情報支援のみ行ない表示周期3秒のレーダだけが使用できる場合、高速船情報がある場合、ARPAが使用できる場合、援助者が判断支援を行なう場合、援助者が情報支援のみ行ない、表示周期1秒のレーダだけが使用でき、高速船情報がある場合等の昼間の組み合わせは、17ケースである。

夜間の航行では、援助者もレーダもない場合、援助者が情報支援のみ行ない、表示周期3秒のレーダだけが使用できる場合、高速船情報がある場合、ARPAが使用できる場合、援助者が判断支援を行なう場合、援助者が情報支援のみ行ない、表示周期1秒のレーダだけが使用でき、高速船情報がある場合等の組み合わせ、および暗視装置と高速船識別灯を加えて、夜間は合計24ケースである。

### 3.4.3 主成分分析による操船支援の主観的評価

#### 3.4.3.1 主成分分析とアンケート回答の数量化

表3-6に夜間の航行、表3-7に昼間の航行の分析対象となるアンケート項目とアンケートの回答をどのように数量化しているかを示す。アンケート項目は、操船結果として現われにくい、情報収集時、判断時、操船行動時における操船者の心理的な困難さや操船支援の効果の主観的な評価について尋ねることを主眼として選んでいる。また、昼間と夜間の航行でそれぞれ航行密度は一定であるが、シナリオごとに他船の船舶発生が違うので、シナリオの揺らぎを同定するために、シナリオそのものへの主観的評価を尋ねる項目も盛り込んでいる。回答の数量化は、基本的には、ある、ないで答えている項目は、それぞれ1、0を当てはめ、かなりあり、少しあり、ほとんどない、まったくないのように数段階で回答するような項目は、0から3のように整数を当てはめ数量化した。

#### 3.4.3.2 夜間の航行実験の主成分分析

操船支援の種類がすべて入っており、それだけ支援効果が顕著であると考えられる夜間の実験、24ケースについて分析を行なった。

夜間の分析対象となる項目は、表3-6が示すように、アンケート項目数が40である。この40のアンケート項目から、昼間の場合も同様にしたが、相関表を作成し、この固有値を求めた結果、有為な主成分が12であった。非常に項目間の関係が複雑であることがわかる。しかし、第一から第三主成分までで全体の情報の約44パーセントまで集約することができた。この主成分と、因子であるアンケート項目との相関係数は因子負荷量と呼ばれる。

図3-6は夜間の実験の第一、第二主成分平面にアンケート項目の因子負荷量をプロットしたものである。この図の絶対値の大きい項目から意味を抽出し、第一、第二主成分の軸の意味づけを行なう。

第一主成分の軸の意味を抽出する。絶対値の大きい項目として、プラス側に「ARPAあり」、「判断レベル達成にARPAが役立った」、「援助者による情報と判断支援あり」、「表示周期3秒レーダあり」、「高速船識別灯あり」、「暗視装置あり」が位置し、マイナス側に、「得られる情報不十分」、「判断レベル向上にARPAが必要」、「表示周期1秒レーダあり」、というようになっており、支援の軸であることがわかる。またプラス側には支援が高く評価されているもの、マイナス側には、低く評価されているものがきている。

以上のことから、操船者は、ARPA、判断支援、表示周期3秒レーダが操船支援として有効であると評価している。高速船識別灯、暗視装置、情報支援がこれらに次いで有効と評価していることが明らかになった。

表示周期1秒レーダは有効な支援ではないと評価されているが、データの正確さとしては、表示周期3秒レーダと同じであるが、表示の更新が速すぎると有効に使うことができないことを表している。

第二主成分の軸も同様に、プラス側に、「東京湾と比べて輻輳していた」、「困難な見合関係だった」が位置し、マイナス側に、「周りに避航スペースがあった」、「避航開始限界距離の厳守」というようになっており、海域の評価を表す軸である。プラス側は海域の困難さを、マイナス側は、海域の容易さをあらわすようになっている。第三主成分の軸は意味づけが困難であった。

夜間航行の主成分分析では、第一主成分として支援の効果が出てきており、夜間は、海域状況よりも操船支援が操船者に強く影響していることがわかる。

次に、項目(因子)同士の関係について検討する。

判断レベルは操船に余裕がある場合は高く、余裕がない場合は低くなると考えられる。「ARPAあり」と「判断レベル達成にARPAが役立った」は第三主成分もマイナス同士であり、第一、第二、第三主成分軸の

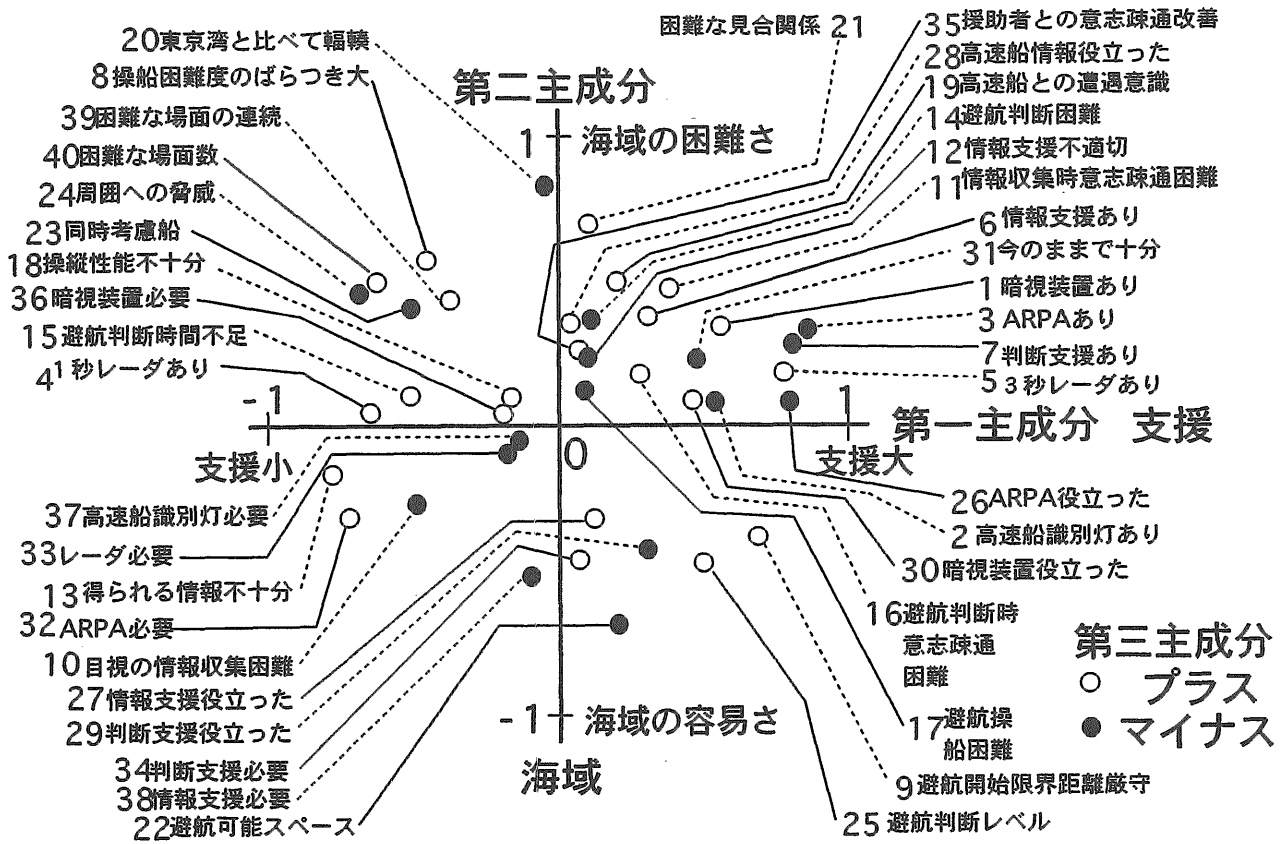


図 3-6 夜間航行主成分分析結果

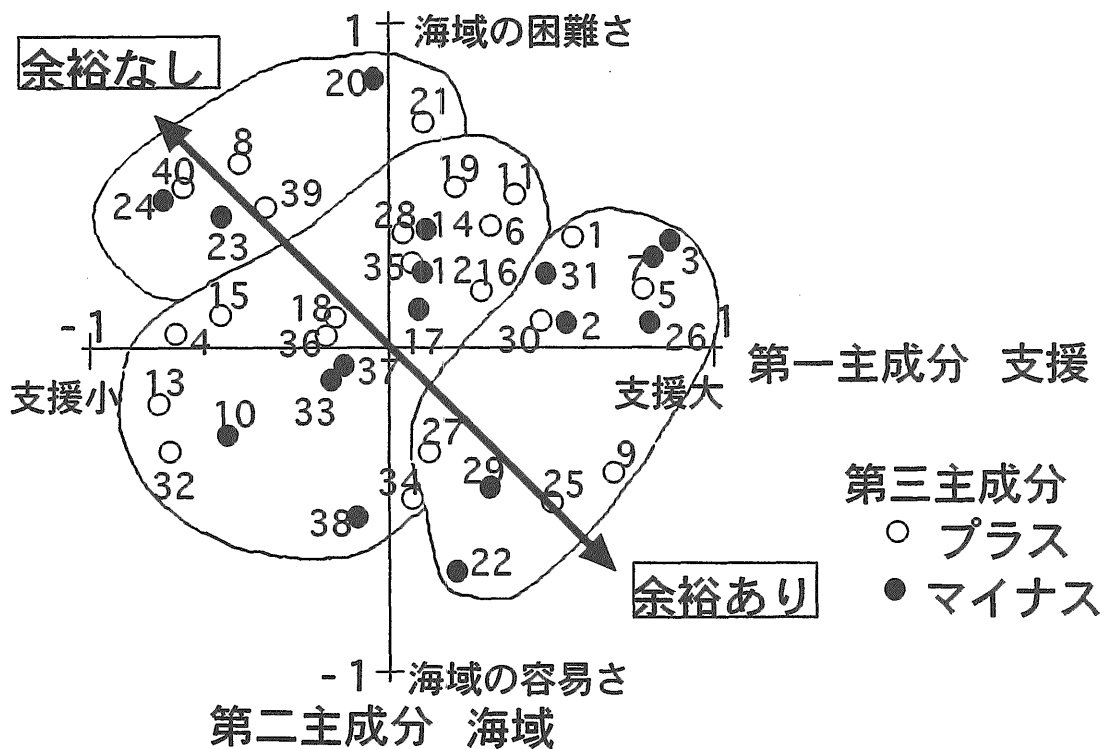


図 3-7 夜間航行主成分分析の因子のグループ化

空間における距離は0.31と近く、相関係数は0.70である。また暗視装置についても、「暗視装置あり」と「判断レベル達成に暗視装置が役立った」は第三主成分がプラス同士で、距離は0.30と近く、相関係数は0.66である。これにより、ARPA、暗視装置は、余裕を生みだして判断レベルを達成させ、効果的に高速航行の安全に寄与していることがわかる。しかし、援助者による情報支援、判断支援は、それが「ある」と、「判断レベル達成に役立った」という項目が離れている。距離はそれぞれ、0.88と0.82と遠く、相関係数はそれぞれ0.10、0.22であり、相関が低い。よって、判断レベルの達成については、効果的には役立っていないことがわかる。

一方、「援助者との意志疎通の改善が必要」という項目が「情報支援時の意志疎通困難」、「判断支援時の意志疎通困難」、「援助者からの情報支援不適切」の近くに位置して、相関が強い。また、これらが「判断レベル達成に情報支援が役立った」、「判断レベル達成に判断支援が役立った」という項目の原点に対して対の位置にあることから援助者との意志疎通の改善が必要であることがわかる。

さらに第一、第二主成分軸から、第四象限に余裕があることを第二象限に余裕がないことを示していることが読み取れる。第四象限から第二象限にななめに余裕を表す方向が考えられる。そこで図3-7に示すよう

に項目を分類すると、第四象限を中心に支援があって役立っているグループ、原点の周りと第一、第三象限には支援を必要としているグループが存在し、第二象限には海域の余裕のなさを評価している因子が集まっている。

### 3.4.3.3 昼間の航行実験の主成分分析

次に、昼間の航行実験の17ケースについて分析を行う。

昼間の航行の分析対象となる項目は、表3-7が示すように、アンケート項目数の37である。この37のアンケート項目から、項目同士がどのくらい関係しているかという相関表を作成し、この固有値を求めた結果、有為な主成分が11であった。こちらも非常に項目間の関係が複雑であることがわかる。しかし、第一から第三主成分までで全体の情報の約43パーセントまで集約することができた。

図3-8は昼間の実験の第一、第二主成分平面にアンケート項目の因子負荷量をプロットしたものである。夜間と同様に第一、第二主成分の軸の意味づけを行なう。

第一主成分の軸において、プラス側の絶対値の大きな項目は、「同時に考慮すべき船舶が多い」、「自船操縦性能不十分」、「援助者からの情報支援あり」、「東京湾と比べて輻輳」、「操船困難な場面の連続」、

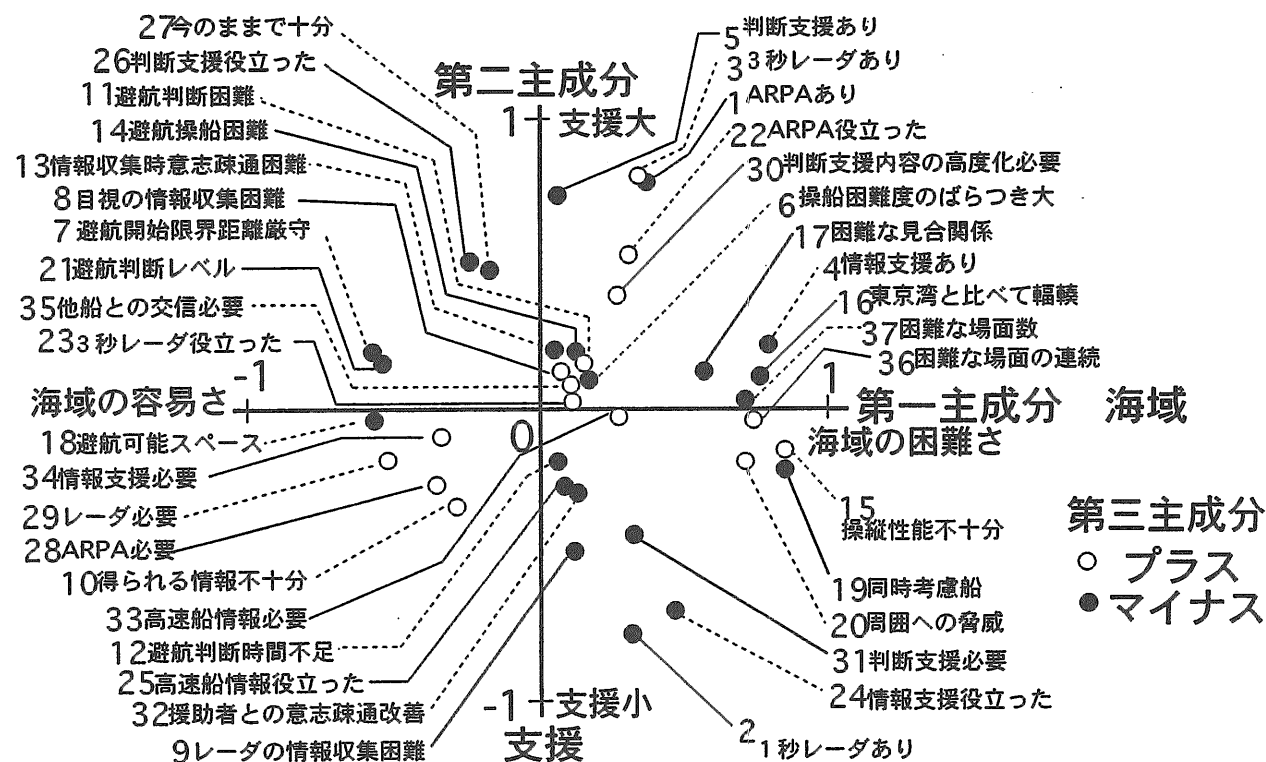


図3-8 昼間航行主成分分析結果

「操船困難な場面数」、「周囲の船舶への脅威」、「困難な見合関係」となっている。マイナス側には、「避航開始限界距離の厳守」、「周りに避航可能スペースあった」、「操船判断のレベル」といった項目がきており、第一主成分は海域の評価を表す軸と意味づけられる。プラス側が海域の困難さを示し、マイナス側が海域の容易さを示している。

一方、第二主成分の軸では、プラス側で、「表示周期3秒レーダあり」、「ARPAあり」、「援助者からの情報と判断支援あり」、「判断レベル達成にARPAが役立った」といった項目が絶対値が大きい。マイナス側には、「表示周期1秒レーダあり」、「判断レベル達成に援助者からの情報支援役立った」、「レーダの情報収集困難」、「判断レベル向上に援助者からの判断支援必要」、「得られる情報不十分」という項目があり、第二主成分は支援の軸となる。プラス側が支援が高く評価されている項目、マイナス側が支援が必要とされる項目がきている。

以上のことから、表示周期3秒レーダ、ARPA、援助者からの判断支援が操船支援効果が高いと、操船者に評価されていることがわかる。表示周期1秒レーダは有効な支援ではないと評価されたのは、夜間と同様、昼間の航行においても、表示の更新が速すぎると有効に使うことができないことを示している。

次に、項目(因子)同士の関係について検討する。

「ARPAあり」と「判断レベル達成にARPA役立った」は第三主成分もマイナス同士であり、第一、第二、第三主成分軸の空間における距離は0.35と近く、相関係数は0.56と高い。また判断支援も、「援助者からの判断支援あり」と「判断レベル達成に援助者からの判断支援役立った」が第三主成分もプラス同士で、距離は0.47とARPAに次いで近く、相関係数は0.59である。これにより、ARPA、援助者による判断支援は、余裕を生みだし判断レベルを達成して効果的に高速航行の安全に寄与していることがわかる。しかし、表示周期3秒レーダは「あり」と「役立った」は、距離が0.84と離れており、相関係数も0.16と低く、判断レベルの達成には効果的には役立っていない。

しかし、昼間の航行では、第一主成分として、海域の評価が強く出ており、昼間は、支援の効果よりも海域の状態の方が操船者にとって、影響が強いことがわかった。

第三主成分については軸の意味づけが困難であった。

### 3.4.4 結果のまとめ

主成分分析から求められた操船支援の効果の主観的な評価の分析結果は、操船者へのインタビューから得られた答えともよく一致している。操船支援の効果という操船者の主観的な評価を客観的に整理する手法として主成分分析は有効であることが判明した。

## 3.5 結論

シミュレータ実験を用いた運航体制評価法を提案した。その手法により限界航行密度を指標として、輻輳海域においてどの程度の輻輳度まで大型高速船が運航できるかを評価した。その結果、最も輻輳している部分をのぞけば、東京湾内のほぼ全域で高速航行が可能であることが見いだされた。

また、実験結果の解析として、避航開始距離の分散分析の結果やアンケートの数量化理論Ⅲ類で行った支援要素の有効性の分析結果とやはり、アンケートをもとにした主成分分析による支援要素の有効性の結果は、同じ結論を示している。従って、ここで検討した支援要素は、高速航行に有効な支援装置であることが明らかになった。

## 4. 安全性評価法について

### 4.1 余裕による安全性評価法

安全な航行とは、衝突も座礁もしないで航行できるということだけではない。航行中に隠れていた潜在的危険が外乱によって表に現れたとき(顕在化)に、これを見つけて処理したり回避したり出来る余裕を持っていて初めて安全な航行といえる。ここで外乱とは、同じ海域を航行する他の船舶との遭遇や、浅瀬への接近、気象海象の急変、エンジンや航海計器の故障、運転員の急病などが考えられる。運転員は、外乱によって現れた危険を見つけだし(検出)、それを避けたり処理したりする方法を決めて(判断)、実行に移す(操作)という一連の作業をつづける事によって、操船している。

この危険回避のための作業を「危険が顕在化して(危険顕在化時刻)から危険が避けられなくなる限界の時刻(危険回避限界時刻)までの時間」に余裕をもってすることができれば、安全といえる。この余裕の大きさを安全を評価する<sup>8)</sup>。実際の操船では、危険を避けた後の残りの時間に、より大きな余裕を生み出すための作業をする。例えば、高速船の操船では、時間の余裕があれば相手の船に衝突しないように避けて行くだけではなく、避けられる船や周りの船が高速船に脅威を感じないように、航行環境に配慮したコースを考えて航行している。目前の衝突の危険を避ける行動をレベル1の安全な行動とするならば、航行環境を配慮した行動は、レベル2の安全といえる。さらにレベル2の行動でも余裕があれば、より広い海域を考慮した大局的な判断をしながら操船をする。これをレベル3の安全な行動といえる。

このレベルの達成度をまとめると、

- |       |                                  |
|-------|----------------------------------|
| レベル 0 | 余裕がほとんど無い場合には、至近の衝突を回避できない。      |
| レベル 1 | 至近の衝突が避けられる場合でも、相手船の感じる脅威等に配慮する余 |

裕がなく、衝突を回避するのが精一杯である。

- レベル 2 相手船が脅威を感じないよう配慮した衝突回避とかつ周りの船への影響を考慮した操船を行えるが、大局的に最適な航路を選択する余裕はない。
- レベル 3 十分余裕があって、大局的に最適な航路を選択して、潜在的衝突の危険性を事前に回避した操船ができる。

この様に作業に余裕が生まれたときは、より大きな余裕を生むよう行動のレベルを高めることができる。この行動のレベルの高さによって安全性を評価するものである。こうして提案した安全性評価法の考え方をいろいろな状況下での評価の例をいくつか以下に示す。

#### 4.2 操船シミュレータによる狭水道航行の安全性評価例<sup>18)</sup>

狭水道においては、水道の狭さ、航路の屈曲、見通しの悪さ、交通量の多さなどから、その航行の安全の評価は重要な検討課題となっている。

ここでは、音戸ノ瀬戸を対象とした。音戸ノ瀬戸は、広島県呉市近くに位置し、最狭部80m、長さ720mの南北に通じる狭い海峡である。対象船として、699トンのフェリー(船長60m)および曳船(船長24m)とそれに引かれる台船(船長32m)について、狭水道での航行の安全評価を行った。図4-1に音戸ノ瀬戸の概略地図を示す。使用した操舵装置は、指令舵角、実舵角、エンジンレグラフポジションが付いている。また、船速や針路等船の状態量を表示するモニターがついており、随時、船の状態の確認ができる。装備されているARPA模擬装置は、簡易電子海図およびARPAを重畳して表示するようになっており、3秒に1回画面を更新する。

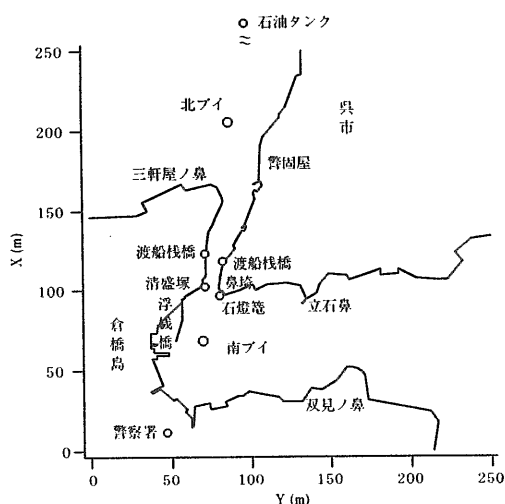


図4-1 音戸ノ瀬戸の地形

簡易電子海図の表示内容は、海岸線、航路パイ等の情報を自船の位置を中心に表示する。表示方法は、距離レンジ(0.75NM/1.5NM/3NM/6NM/12NM)、表示座標系(North-up/Head-up)の変更が可能となっている。

ARPAに関しては、ターゲットとなる船の速度ベクトル(絶対表示/相対表示)、速度ベクトル長(3min./6min./12min.)の表示が可能である。なお、本実験では海域の航行船舶の状況に関する情報支援がある場合を想定して、ARPAにおいては、山陰に隠れて通常のレーダでは得ることのできない船舶の情報も重畳して表示している。

実験は、フェリーおよび曳船とそれに引かれる台船(以下曳船と呼ぶ。)それぞれについて、単船のみでの通航実験および交通流中でのシミュレータ実験を行い、通航時の余裕、航路内に反航船がいる等通航困難な場合の対応、支援情報がある場合情報の有無が操船に及ぼす効果を中心に、評価を行った。

交通流シミュレーションは、実態調査に基づいた交通流をもとに最狭部に反航船の確認なしに進入する船等を加えて、交通流を作成した。また、船種については、漁船、貨物船、台船、フェリー、曳船を設定した。安全を評価する手順としては、対象となる船舶の航行シミュレーションの結果および対象海域の交通流シミュレーション結果等から航行安全に関する問題箇所を抽出し、その問題箇所への対応を操船シミュレータ実験により評価を行った。

また、航行全体を通して、問題となる箇所およびそれに対する対策案を、余裕の観点から、どのような外乱や不測の事態を想定し、これにどのように対処するか等を各実験終了後に被験者へのインタビューおよびアンケート調査を通じて調べた。シミュレータ実験の例として図4-2に、フェリーの北航時の航跡図を示す。

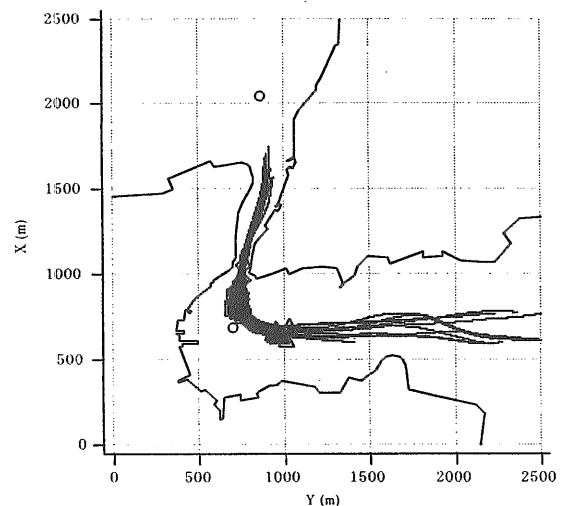


図4-2 フェリーの北航時の航跡図

音戸ノ瀬戸の場合、操船者はできるだけ早い時期に航路内を確認し、船を航路の軸線上に乗せることが最も優位な余裕と考えており、これを実現するために最大舵角を取ることは、適切と評価していると考えられる。

また、最大舵角を取って得られる最狭部から航路軸線上に乗せることのできた位置までの距離は余裕があると評価しており、最大舵角での旋回性能も十分であったと評価できる。余裕については、特に狭水道で潮流等の影響がある場合、対応の遅れが事態を悪くするため、最大舵角をとって対応している。つまり、この場合は操作機の余裕よりも事態への対応の早さ、すなわち時間的な余裕を優先しており、時間的余裕を持つことが適切な操船と評価している。

操船者は、単船での南航の操船は、南ブイの南海面に余裕があり、不測の事態があった時にはすぐに舵を戻せることも余裕と考えており、35度の操舵角を適切な操舵量と判断していた。

また、曳船の単船での通航実験を実施した。その最適な操船方法は、南ブイまでは南ブイを目指して航行し、ブイまで200mの位置に達した時に最微速(5kn)程度の船速になるように減速する。この際反航船がない場合には、南ブイのさらに南を狙い、できるだけブイに近づいて航行する。ブイまで200mの位置に達した時、10から15度の舵角を取る。旋回の途中で航路内を確認し、反航船がない場合には、音戸ノ瀬戸の手前200m付近で曳船および台船が航路軸線上に乗せるよう当て舵を利かせ、台船の旋回を止める。また反航船がいる場合には、Uターンを行い再度進入をやり直す。航路内に入る際は橋まで最微速(5kn)で行き、狭水道通航後は、石油タンク、北ブイと目標を変えながら航行する。図4-3に曳船の交通流中の航跡図を示す。

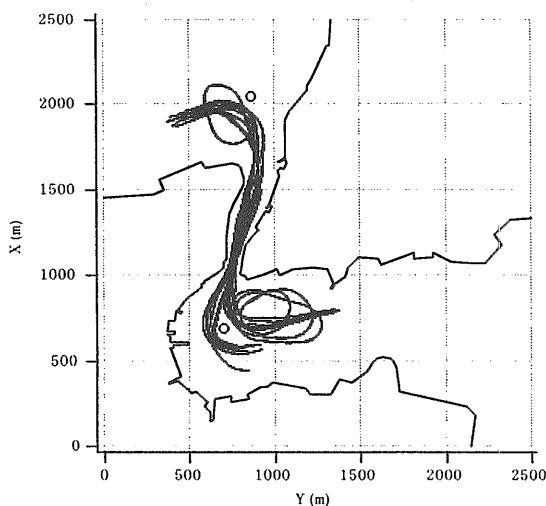


図4-3 曳き船の航跡図

得られた結果から、航行の安全評価をまとめた。実験結果および航行の安全についてのインタビュー結果を整理すると、4.1で述べたように、第1レベルは、対象とする狭水道を物理的に通航することができるということであり、第2レベルは、対象とする狭水道を通航する他の船舶を考慮した操船法を採用することである。第3レベルとして、広範囲の航行船舶の情報や潮流などの情報を考慮することであり、危険な見合い関係を生じないような航行計画に基づいた操船が可能となる。

実験結果から得られたフェリーおよび曳船の現在のレベルは、第2レベルの状況と評価できる。但し、曳船の南航時等反航船が進入してくると処置できない状況がありうるため、最狭部付近に船がいることを知らせる何らかの方法が必要と考える。また、安全のレベルを向上するには、海域全体の他船の通航状況や詳細な潮流の情報等が必要と考えられる。

#### 4.3 操船シミュレータによる長時間高速航行の安全性評価例<sup>19)</sup>

長時間高速航行の安全性を航行シミュレータ<sup>2)</sup>、<sup>20)</sup>を用いて評価し、長時間高速航行の安全を担保するための方策について考察をした例を示す。

##### 4.3.1 長時間航行の安全性評価法

他船と遭遇する頻度の少ない通常海域の長時間航行の安全性評価は、パラメトリックな実験を実施するのは、困難であるため、次のような評価法で行った。

- ①航行の安全を担保する機能が、当直体制と航海機器とでできたシステムに備わっている。
- ②一当直の間に①の機能が維持されている。
- ③航行中に②の機能が低下した時、それが検出でき、機能の回復や代替等の手段を講じることができる。

長時間高速航行の安全に影響を及ぼす要因として、疲労要因と時間要因が考えられるが、このシミュレータ実験は、交通量の少ない海域での長時間高速航行の安全評価であるため、疲労要因についてのみ評価した。

このシミュレータ実験では、操船者が避航対象船を十分な余裕を持って見つけられることとその能力が長時間保持できることを確認することで、①の機能が保たれているとして長時間高速航行の安全性を評価する。

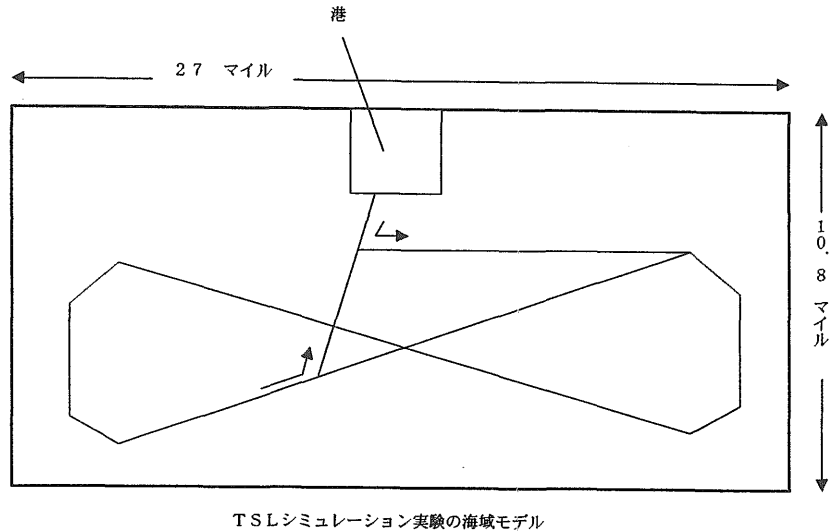
この確認と評価は、被験者の主観的評価、実験者の主観的評価、実験結果による客観的評価、高速航行の安全余裕の考え方による評価を総合して行った。

##### 4.3.1.1 長時間高速航行の安全性評価の実験

###### 1) 実験海域の表現

航行シミュレータのメモリー容量とCPU負荷、画像更新速度等の制約から、20km×50km(10.8マイル×27マイル)の海域に8の字航路を設定して、航行環





●: 燈台      △: ブイ (緑)      ▲: ブイ (赤)

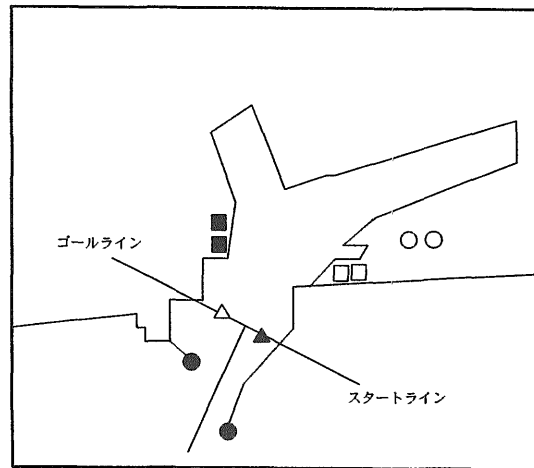


図4-4 航路と港のモデル

境データ(海面データ、地形データおよび著目標)と港のデータを作成した。図4-4に実験海域と設定された航路、港のモデルを示す。

## 2) 実験の概要

昼と夜の環境で、通常の海域における高速航行による実験を行った。当直は1人で4時間とし、前半の被験者は出港から次の当直引継までを、後半の被験者は当直引継から入港までを行った。航行の安全を阻害する外乱として、通常航行をする他船(貨物船)を発生させた。

### 4.3.1.2 長時間高速航行の安全性評価の実験結果

#### 1) 被験者の主観的な評価

主観的評価として、目、肩、首の疲労を訴えているが、4時間の高速航行の間に、「情報収集-判断-操舵」の一連の作業が安全に影響するほど鈍くなることはなかったと、被験者は判断している。当直の疲労の程度は、夜間高速航行2.5時間が昼間高速航行4時間に相当する疲労と評価している。

総合して、通常速度の当直よりも高速航行は疲労するが、通常の海域の高速航行で、かつ、緊急時に当直応援要員が待機している体制があるならば、昼間高速航行の当直は1人で、夜間高速航行も1人で可能ではあるが安全を保障するには2人が良いと、被験者は主観的に評価している。

#### 2) 実験者の主観的評価

テレビカメラを通しての観察や、アンケートやインタビューの回答等に対する被験者の感想等から、被験者は、疲労はあるものの4時間の当直を通して、十分な信頼性のある操船を行っていたと評価する。

#### 3) 実験結果による客観的評価

図4-5に示すフリッカーテストと、図4-6に示す航跡図のように、避航を行った際の行動、航跡とから客観的評価を行った。それぞれの4時間の当直時間内に、疲労による視覚への大きな影響はなく、速度を落とす操船行動及び急激な大角度変針の操船行動は観測されず、4時間当直の間に避航行動等に影響を及ぼす疲労はなかったと考えられる。

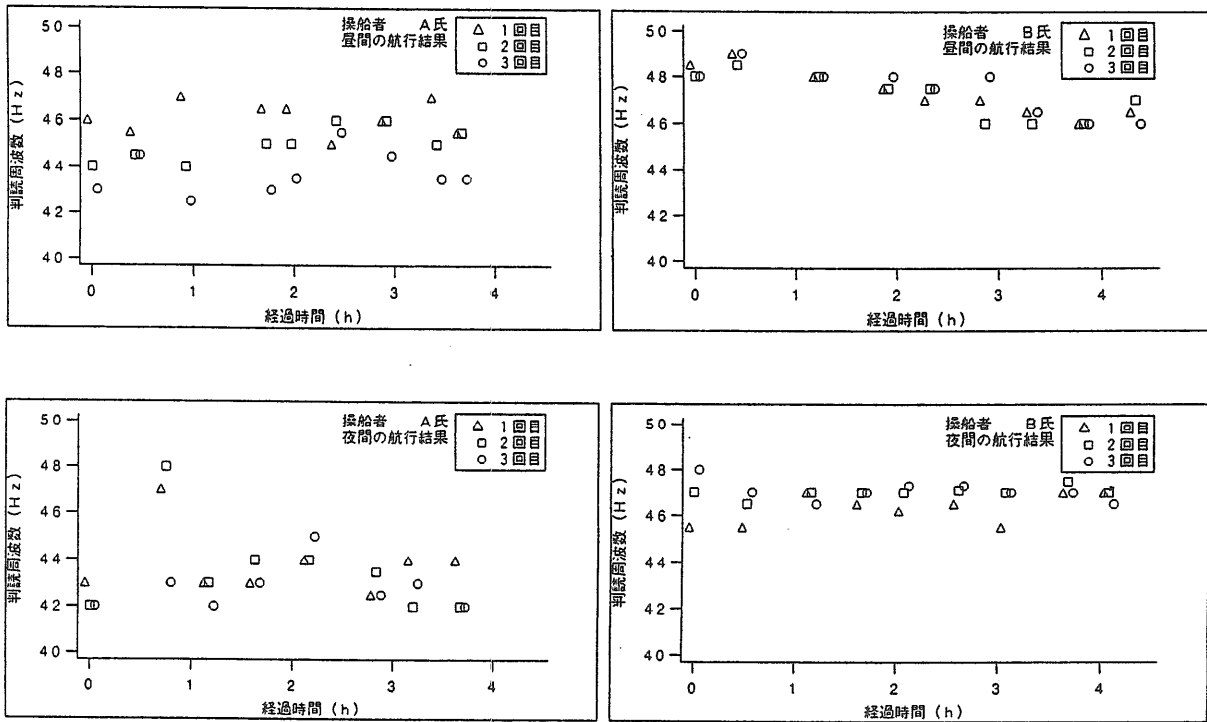


図4-5 フリッカテストの結果

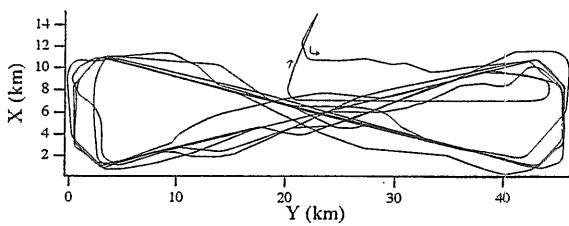


図4-6 高速航行実験の実際の航跡図例(夜間)

4) 高速航行の安全余裕による評価

高速航行の安全性評価は、ゆとりをもって作業ができたかと言うことである。高速航行の安全が一般船航行の安全と大きく異なる点は、一連の作業に必要な時間が、高速航行の安全を左右することである。

この実験では、通常海域での実験のため「安全の持ち時間」が長く、一連の操船作業の所要時間が疲労要因によって長くなることによって、持ち時間が安全を阻害するまでに少なくなるということは観測されなかった。また、疲労要因が一連の操船作業を誤らせることもなかった。しかし、高速船の速度を考えた場合、一人当直時の当直員の急病等のダウンに対処した体制を取ることは必要である。

5) 総合評価

今回は疲労要因の効果をみることを主とした長時間高速航行シミュレータ実験であったため、1人当直で

も安全な高速航行が可能と判断できるような評価が得られた。しかし、高速航行の安全モデルによる評価からは、疲労要因の影響を減らす支援の手段を講じることが要求されている。

4.3.2 長時間高速航行の安全性向上の方策

高速航行の安全を確保する支援システムのあり方は、疲労要因の低減、時間要因の低減と、操船における「検出-判断-操作」の一連の各作業の負担の低減を行うことに加えて、緊急時作業支援の処理マニュアルの整備が必要である。

4.3.2.1 疲労要因低減

高速航行における疲労要因のほとんどが、視覚情報の密度が高いことである。これらを低減するための方策は、次の通りである。

- レーダーやARPAの性能の向上をはかり、浮遊物に対する視覚情報の必要性を低減させる。
- 海上監視において、視覚情報の有無の第1次情報処理を行う装置の開発を行い、情報の最終判断だけを人間が行う。
- 長時間監視作業による疲労蓄積と休憩時の疲労回復のバランスがとれる当直時間を求める。
- 航路保持の機能は、オートパイロットやルートトラッキング機能を持つ機械にまかせ、人間の機能の余裕を作る。

#### 4.3.2.2 時間要因低減

緊急事態発生時の時間要因低減は、安全の持ち時間を増やすことである。これを低減するための方策は、次の通りである。

- 潜在的危険の顕在化を早期に的確に予知し、当直者に報知する。
- 危険回避の限界を広げるために、操縦性能等を向上する。
- 推力喪失や操舵不能といった緊急事態発生の可能性を常に考慮した操船を行う。
- 緊急事態発生時の対応処置作業を迅速に行うために、緊急時応援要員の出勤を速やかにできる体制をとる。

#### 4.3.2.3 操船支援作業

操作作業の支援も、操船性能の向上や操作機器の改良で達せられると考え、判断支援についての方策のみを述べる。

- 誤判断を避ける支援を最良とする。
- 選択可能ないくつかの戦術について結果を予測表示し、操船者に選択させる。
- 判断に時間がかけられない切迫した緊急時には、機械側が判断を選択し実行する。  
人間側が機械側の選択に対して優先介入する道は残す。
- 緊急時の操作支援の一つとして、マクロ命令の自動実行機能があれば有効と考える。

#### 4.3.2.4 緊急時処理作業支援

緊急時の処理マニュアルの整備が最重要であるが、考慮していなかった緊急事態の発生時に、どのように対処すべきかも明記すべきである。

- どのような種類と程度の緊急事態発生かを操船者に報知する。  
処理マニュアルにある処理のシーケンスを自動表示したり、音声で指示する。
- 事前に緊急時の処理の体験と学習をシミュレータで経験することは有効である。

#### 4.3.3 結果のまとめ

高速航行の長時間当直の安全性を評価するために、問題点を特に疲労の面に焦点をあててシミュレータ実験を行った。

長時間高速航行における結論は、以下のようである。

- 静穏時の通常海域の昼間、夜間の長時間航行は、適当な支援があれば、高速船は、一名当直で航行できるが、疲労は複数当直よりも大きい。
- 高速船の当直作業では、航行環境情報取得作業に多くの時間をかけている。

- 高速船用のARPAは、相手船の位置等、航行環境を正しく短時間で把握できるように支援すべきである。
- 一名当直の場合、高速船では当直員がダウンしている時には、外乱発生警報で控えの当直員がブリッジにきて処理をする時間的余裕は十分とは言えないので考慮する必要がある。

### 5. 内航タンカー近代化船を例とした適切な航行支援について

日本の産業を支える内航海運において、より高い安全性、効率性および労働環境の改善を目指した近代化船の開発が求められている中で、船橋における当直についても、適切な支援装置の導入によって操船者の負担を軽減し、安全性を高める必要がある。

#### 5.1 内航タンカー近代化船の狭水道航行における運航支援<sup>21)</sup>

狭水道航行における適切な支援のあり方を明らかにするために、潮流の強さ及び特殊な航行方法で有名な来島海峡を対象とした操船シミュレータ実験を行って、適切な支援装置の機能仕様を求めた。さらに、船長、操舵士、レーダー監視者からなる3人当直の役割分担をモデル化し、1人当直を、支援装置が船長以外の操舵士およびレーダー監視者の役割を分担するものとしてモデル化し、これを基に、狭水道航行における適切な支援の機能仕様を明らかにした。

##### 5.1.1 操船シミュレータ実験

狭水道航行における適切な運航支援のあり方を明らかにするために、適当なレベルの支援装置を備えたシミュレータ実験を実施し、実験結果を踏まえて、その支援機能に適宜改良を加えた。

##### 5.1.1.1 実験の概要

シミュレータ実験の海域として、強潮流、屈曲航路、航路の交差および横切り船等を考慮して、来島海峡を選定した。海岸線や島影等の船橋からの景観は、海図を基にビデオ等の取材結果を含めて、昼間および夜間の両方について作成した。潮流<sup>22)</sup>は、参考文献(22)の流況図から、タブレットを使って読み込んだ値を基に連続補間の方法で与えた。船舶交通流<sup>23)</sup>は、参考文献(23)の実態調査結果を基に、船種および大きさから、フェリー、貨物船、漁船等に割り振って、シミュレータ実験のシナリオに盛り込んだ。実験に使用した操舵スタンドでは、ジャイロリピータが船首方位を示し、レバー操作による手動・自動の切り替えによって、舵輪による舵操作とジャイロリピータ上の指示による針路保持が可能である。RADAR/ARPA装置として、ワークステーション上に、海岸線、法定航路、プイ、

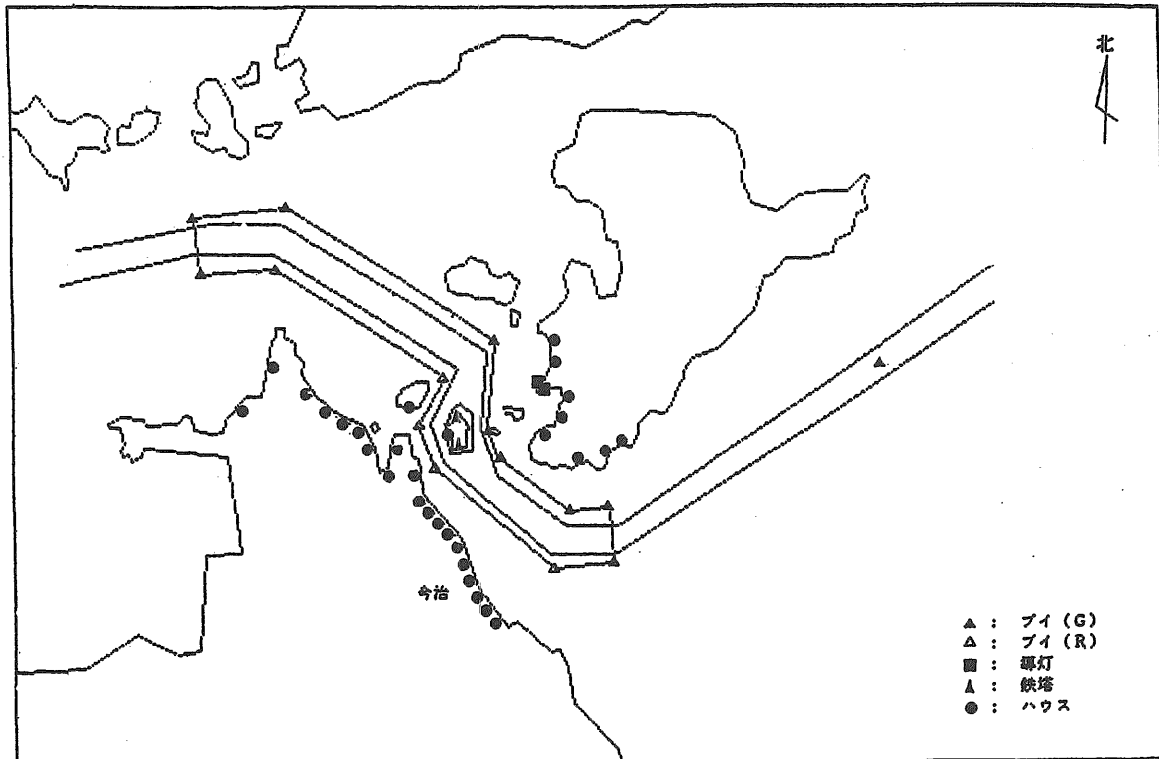


図5-1 来島海峡の海岸線および著目標と北流時の北航および南航の目標航路

潮流信号所等の海図上の著目標および自船の目標航路、船速、船首方位、他の通航船の位置と速度ベクトルを情報として表示した。なお、同装置の操作は、単純化のためにマウスおよびスペースバーだけとした。

通常の右側通行の北流および航路が交差する南流のそれぞれについて、北航および南航、昼間および夜間のそれぞれについて実験シナリオを設定した。

図5-1に、シミュレータに表現した海岸線、ブイ、導灯、鉄塔等の位置と北流時の北航および南航の目標航路を併せて示す。北航時のシナリオに従って操船された実験結果として、図5-2(a)に、実際の航跡図、図5-2(b)に舵角、旋回速度、針路および船速の時系列データを示す。

#### 5.1.1.2 実験の方法

上記のシナリオを、来島航路の通航経験が十分にある熟練した船長2人に交互に被験者となっていただき、3000GT相当のタンカーを単独で操船し、運航支援装置の操作性や提供情報のあり方について、シミュレータ実験の各局面に応じた意見をもらった。これらの意見は、適宜、支援装置の仕様に組み込むとともに、実験期間中に実現が難しい仕様については、補助者がその機能を代行することとした。このように、実験と支援装置の改良を繰り返し、最終的に、狭水道航行における運航支援のあり方を明らかにした。以下に、その

主な検討過程と改良点を示す。

- (1) 操作入力：当初キーボード入力であったが、希望する機能を得るためのキーをキーボード上で探す必要があったので、これを画面上のボタンをマウスで選択する方式に改良した。しかし、ワンタッチで操作できるためには、ボタンの位置、大きさ表示形式等にさらに配慮する必要があり、実験の最終段階では、補助者を介した音声入力とし、その有用性を確認した。
- (2) 情報の表示法：ARPA表示と海岸線および海図上の著目標を重畳した表示について、当初は、相手船、海図情報および目標航路を重ねて表示していたが、基本的には相手船の情報を優先することが重要であり、必要なときに海岸線、目標航路等の表示を重ねる仕様にする必要が指摘された。実験においては、相手船以外の表示の輝度を下げるとともに、変針点での目標方位等の数値情報は必要な場合のみ表示することで対応した。
- (3) 表示情報の内容：強潮流時においては、自船の対地船速ベクターの表示が有用であるとの指摘があり、ARPA表示の自船ベクターとして明に表示し、船首方位は輝度を下げて表示した。その他の高度な支援として、目標航路に沿って変針することを想定した変針後の情報を得るためのセンタシフトやシミュレーション機能が必要であること等が指

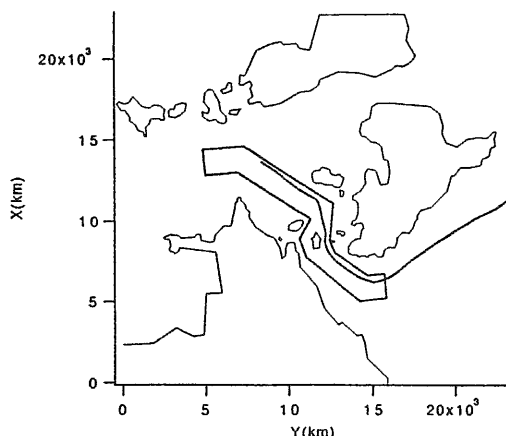


図5-2(a) 北流北航シナリオでの実際の航跡図

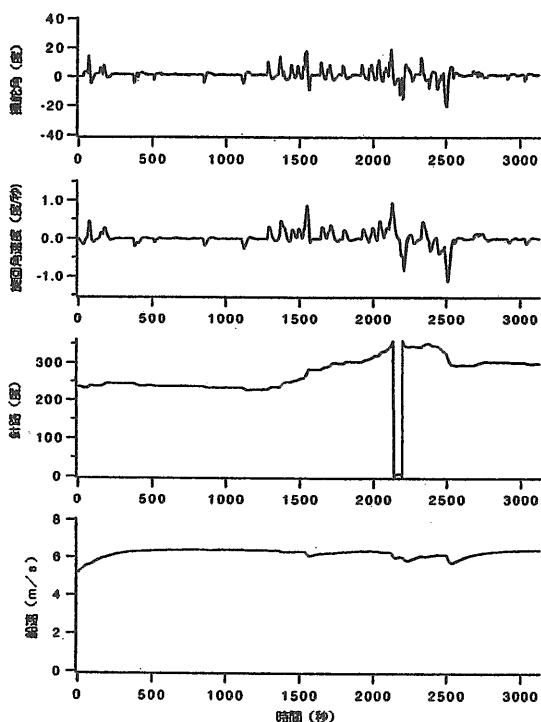


図5-2(b) 北流北航シナリオでの実験結果例  
— 一時系列データ

摘された。また、予定航路上の通過点で適時、適切な運航支援情報を提供するだけでなく、熟練者の知識に基づいたその点での注意すべき事項等を操船者に通報することも経験の伝承という意味で有用であるとの指摘があり、本実験期間中の確認はできなかったが、これらは今後実現すべき重要な機能として採用した。

### 5.1.2 狭水道航行における支援装置の機能仕様

シミュレータ実験の結果から得られた狭水道航行における支援装置の機能や操作性等に対する意見をまとめると次のようになる。

#### (1) 操作性

狭水道における見張りに専念するために、機能や表

示の選択の操作を音声によるノータッチ、または、ワンタッチで実現できることが必要。多数のキーから操作に必要なボタンを選択することは望ましくない。

#### (2) 情報表示

航行の各局面毎に、必要最小限の情報を表示する。多くの情報の中に必要な情報が埋もれないようにする必要がある。付加的な表示を要求する際にも、(1)の操作性の要件を満たすことが必要である。

#### (3) 支援機能

予定航路上での自船の状況、現在の状況および将来の予定や予測情報の表示、衝突危険船の報知と避航操船の提示、座礁危険の報知と避航操船の提示、予定航路上の通過点に応じた情報表示形態の自動選択等の支援があれば、さらに余裕のある航行が可能となる。

具体的な意見として、強潮流下でのオートパイロットの有効性、ARPA上でのシミュレーション機能の充実、ARPA表示におけるレンジとベクトル長さの連動、予定航路上の各時点における適切な支援情報、例えば変針点前での変針後の他船との見合い関係に関する情報の提供の必要性が述べられた。また、自動航路保持については、狭水道に特有なものとして、強潮流による針路の大きな振れを自動的に補償できれば有効な支援であるが、それでも横からの強潮流下で航路を保持する際には、船首方位が航路の外側を向いたり、反航船の前方に向いたりする場合があります、これらを防ぐ機能を自動航路保持に組み込む必要性が述べられた。

これらの、意見を基にすると、狭水道航行を単独で行う場合に必要な支援の主機能は次のようになる。

- (1) 操舵支援：潮流の影響を考慮した針路保持および航路保持、
- (2) 危険船情報支援：衝突の危険のある船舶について、方位、距離および最適避航手段等の提供、
- (3) 座礁防止支援：法定航路または推奨航路からの逸脱、予定航路からの偏差等の報知、さらに、
- (4) 見張りに専念させるための支援：目視による見張りを中断することなく上記の支援が得られることが必要である。

これらの機能仕様が現時点ですべて満足されることは非常に難しいが、現実には、これらの支援機能の達成度に応じた当直体制をとることによって、狭水道航行における安全余裕が確保できると考える。

### 5.1.3 適切な支援装置を備えた一人当直のモデル

実験結果から得られた狭水道航行における支援装置の機能仕様を基に、狭水道航行を船長、操舵士およびレーダー監視者の3人当直を基本とした役割分担を想定し、船長以外の2人の役割を支援装置が分担することとして、1人当直をモデル化した。このときに支援装置が受け持つ役割は次のようになる。

- (1) 操舵士の役割は、船長の指令に基づく針路保持、航路保持、避航操船の実施であり、これに船長との意思の疎通および誤り訂正機能が加わる。
- (2) レーダー監視者の役割は、他船の航跡をプロットし、衝突危険船を判断し、船長に伝える。また、海岸線、可航域、法定航路および自船の予定航路等と自船との位置関係から座礁危険等を判断し、船長に伝える。船長の要請に応じて詳細な情報を提示するとともに、重点的な監視項目を変更する。さらに、船長との意思の疎通および誤り訂正機能が加わる。
- さらに、
- (3) 船長の判断や操作を支援するために、予定航路上の各局面に応じた情報表示モードの自動選択や、目標航路からの偏差の表示等の機能が必要である。これらの機能は、当直者が見張りに専念できるように音声入出力によるノータッチ操作と状況に適合した情報の提供を基本とする。また、単独で当直を行うことによって生じる誤判断や誤操作等を防止する手段を講じる必要がある。

#### 5.1.4 結果のまとめ

1人当直を仮定した支援のあり方の検討を基に、狭水道航行を対象とした運航支援装置の仕様を明らかにした。これは、1人当直に限らず、2人以上の当直体制においても有効な支援が余裕をもたらすことによって安全が確保できるという考えに基づいたものである。現在、ワンマンブリッジオペレーションについて検討がなされているところであるが、支援装置の機能は単にこれを構成する要素機能の検討だけではなく、複数人の当直体制で行われている作業のモデル化を基に実際の当直者の余裕を確保するという観点から検討する必要があると考える。さらに、近代化船のように現行システムより高度の安全性や労働環境を実現する必要がある場合には、現在より優れた安全性や労働環境として作業をモデル化し、これに対応した支援装置の機能仕様を実現する必要がある。

しかし、これらの機能仕様は、必要条件から求めたものにすぎず、実船での運用を通じて実用システムとして十分なものに作り上げられなければならない。今回のようなシミュレータ実験を用いた手法は、第1段階としての機能仕様を明らかにすることに有効であるとともに、改良段階における実船での経験の補完にも有効であると考えられる。

## 5.2 内航タンカー近代化船の長時間航行の安全確保支援<sup>19)</sup>

乗組員の高齢化と人手不足の対策としてワンマンブリッジと改良された支援機器を搭載する内航近代化船においても、長時間航行のための安全性を確立する必

要があるが、長時間航行における当直体制、備えるべき支援機器の機能等ははまだ詳細に議論されていない。長時間航行の安全性を航行シミュレータを用いて評価し、長時間航行の安全を担保するための方策について考察する。

### 5.2.1 シミュレータ実験

実験は、3000トンの内航タンカー近代化船が、通常海域を一人当直で長時間航行する場合の安全を評価するデータを収集するために実施した。実験海域は、4.1の高速航行の実験で述べた同じ8の字の海域である。以下に実験の概要、手順について述べる。

#### 5.2.1.1 実験の概要

長時間航行における当直者の機能、必要な作業、作業分担、問題点の抽出、および、安全評価法、支援システムの評価法が明確になるように、実験は1人当直で行い、安全性評価の結果から長時間航行に必要な支援システム及び妥当な当直体制を検討する。

#### 5.2.1.2 実験の手順

長時間航行のシミュレータ実験は、次の手順で行った。

- シミュレータ実験は、1日目が慣熟運転、2日目は昼間の景観、3日目は夜間の景観で行った。
- 当直は1人で3時間とし、前半の被験者は出港から次の当直引継までを、後半の被験者は当直引継から入港までを行った。
- 航行の安全を阻害する外乱として、実験者側が別室から任意に発生、操船できる通常航行をする他船(貨物船)を発生させて、任意の見合い関係を生じさせ、必要に応じて避航せざるを得ない状況を作った。
- 実験で用いた航行支援装置は、ARPA機能(簡易電子海図の模擬として、航路、港の海岸線をあわせて表示する。)を備えている。
- 自船の操縦性能は、3000トンのタンカーである。

#### 5.2.1.3 実験の進め方

前述のように、実験の進め方は、重い作業負担(一人当直、他船との難しい遭遇、使い勝手や機能が不十分な支援機器など)を課した一種の過負荷実験である。

安全評価に用いたデータは、実験結果や被験者であるベテランの船長からアンケートやインタビューを通して抽出した、航海に関する知識、近代化船が備えるべき機能の要求、航行の評価など、および実験者側からみた主観的な評価である。

通常海域の長時間航行の安全評価は、4.3.1で述べた①、②、③、の項目を確認できたときに、安全に航行できるとする相互補完の考え方で次の項目を検討す

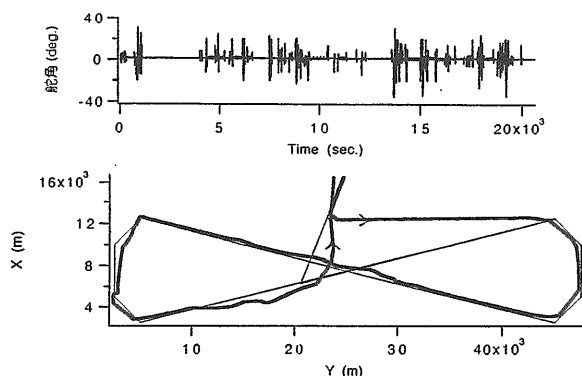


図5-3 近代化船航行実験の実際の航跡図例

る。

- (1) 一連の避航動作等の当直作業を、一当直時間の間を通して、安全を確保する余裕を持ってできる操船機能を維持するための、支援のあり方を求める。
- (2) 求められた支援機能を組み込んだ支援機器と当直体制とで、安全に航行できることを確認する。

この実験で得られた実際の航跡図の例を図5-3に示す。これを見ると、出港後3時間55分ぐらいの時間が経過した時に、直前に邪魔船を発生させたため、 $35^\circ$ の大角度変針をしたときを除いて、邪魔船に遭遇したとき、十分に余裕を持って避航している。また、大角度変針の時も含めて避航変針後は、速やかにコースに戻る操船を行っていることがわかる。

### 5.2.2 実験インタビューの結果

被験者へのインタビューやアンケートの結果を基に、相互補完のモデルに従い以下の①、②、③に示す項目について検討し、安全性を評価した。

#### 5.2.2.1 ①の実験インタビュー

- ① 航行の安全を担保する機能が当直体制と航海計器に備わっているか。

##### ①-1 人間側の特性把握

- ・必要な作業の種類、作業量の把握  
通常海域を航行する際の当直の作業は、直接に操船する作業の他に、海図整備や通信等による航海の全体像把握や、個々の知識・情報の確認作業等の間接に航行の安全を保つ作業がある。雑作業に気を取られたがために必要な操船作業を誤ることがあれば省略、廃止等が必要となる。
- ・作業能力(≡作業量/時間)の評価  
通常海域を航行する際に必要な作業量は、一連の避航作業中といえども当直者の作業能力に比べてはるかに少ないものである。

##### ①-2 機械側の特性把握

- ・コース保持機能等の自動制御機能

実験で使用した航海機器のオートパイロット機能とルートトラッキング機能は十分にコース保持機能を発揮した。

ルートトラッキングの変針点接近警報は、航海機器に組み込んであり、十分に機能した。

#### ①-3 人間・機械系の特性把握

##### ・航海機器の使い勝手

ARPAは、海岸線とともに、他船の位置と針路、速度を正確に図形表示している。予定航路の表示も選択することができる。

ルートトラッキング、オートパイロットともに針路保持機能は良好で、検出、判断作業に当直者の能力を振り向けることができ、余裕を増すことに有効であった。

##### ・情報の入出力速度

自船が低速船であるため、高速船と比較して情報の入力出力で時間が不足することはなかった。

##### ・航行モードの表示

自動航行のモードの表示は、CRT上だけでなく、ブリッジ内のどこからでも見える所に大きく表示することが必要である。

#### 5.2.2.2 ①の実験インタビューの考察

以上の結果、①をまとめると、

通常海域の航行ならば、主とした検出作業を航海機器に頼り、十分な避航判断支援機能が備わり、ゆっくりした表示更新速度の航海機器で、当直員不在の対策が組み込まれている操作支援(オートパイロット)ならば、疲労も少なく、長時間の一人当直が可能と考える。

#### 5.2.2.3 ②の実験インタビュー

- ② 一当直の間に航行の安全を担保する機能が維持されるか。

##### ②-1 人間側の機能低下

##### ・長時間の疲労程度

両被験者とも、1時間ほどで「目が痛くなった」と申告している。アンケートでは、両者とも、4時間の一人当直中に、情報収集、判断、操舵の各機能が鈍くなってきたとは感じていないと申告している。実験者側からの観察でも、疲労はあるが判断機能は落ちていないと判定している。

##### ・機能維持程度評価および影響把握

海上では、通常の判断レベルが、陸上勤務の半分程度の能力になると、両被験者は考えているが、これらの影響は大きくないと考える。

##### ②-2 機械側の機能低下

故障率評価は、今回の実験に直接関連しないので、今回は実施しなかった。

#### ・故障の影響評価

航海機器の故障の影響は、後述の③-2で検討する。

#### ②-3 人間・機械系の機能低下

慣れや思い込みによる過誤（うっかり）や強い現象による注意の乗り取り、短絡的行動等は実験においてはみられなかった。

#### 5.2.2.4 ②の実験インタビューの考察

以上の結果、②のまとめは、

この実験では、人間側の機能維持に注目し、機械側の機能維持については検討していないが、航海機器が通常の信頼性を有しているならば、故障時の対策（例えば、航海機器故障時には複数当直に切り替える）を合理的にたてることで、航行の安全は保てよう。

#### 5.2.2.5 ③の実験インタビュー

航行中に①の機能が低下した時、それが検出でき、機能の回復や代替等の手段を講じることができるか。

#### ③-1 人間側機能低下時の保障

人間側機能の低下の検出は、次の三つの場合を考えねばならない。

- 1) 各作業の機能の低下
- 2) 当直者の不在
- 3) 各作業での誤り

- 1)の機能の低下は、作業時間の余裕や支援機器でカバーできる種類であり、特に問題はないと考えている。
- 2)の当直者不在は、既に検討してきた通り、警報無視で検出でき、対策が講じられるならば、大きな問題はない。
- 3)の誤作業の問題は、一人当直だけの問題ではなく、これから検討を進めなければならない大きな問題である。

#### ③-2 機械側機能低下時の保障

##### ・機械側の異常の検知

機械側とは航海機器と限れば、両被験者は経験と訓練を積み、人間側は検知できると考えている。

##### ・対策がとれるか

臨時に複数当直体制をとることで対策がとれることがたてまえであり、当然の条件であろう。

#### ③-3 インターフェース機能低下時の保障

##### ・インターフェースの異常に気づくか。

##### ・対策がとれるか。

この2点も③-2と同様に考えて大差はないと考える。

#### 5.2.2.6 ③の実験インタビューの考察

以上の結果、③のまとめは、

②で述べたような機能の維持を保証するためには、③の考え方は不可欠で重要である。上述の方法をシステム設計時に考慮し、対策を講じるならば、この面からの通常海域の一人当直の評価は良しとすべきであろう。

#### 5.2.3 内航近代化船の総合評価

通常海域の一人当直の評価を、シミュレータ実験を通してベテランの経験者の知識等の抽出という形で進めたが、実験結果は、次のように評価できる。

- ・長時間航行の安全評価法について、手法を提案した。
- ・航行の安全を確保するために有効な支援のあり方が具体的に明らかになった。  
それと同時に問題点も明らかとなった。
- ・人間の誤作業の問題は、更に整理し、解決策を講じる必要がある。
- ・実験の結果、明らかとなった支援の方策等を実現するならば、通常海域の一人当直による航行は、複数当直と同様に安全である。

### 6. 操船シミュレータを用いた関門海峡の灯火の表現方法<sup>24)、25)</sup>

#### 6.1 関門海峡について

関門海峡は、図6-1に示すように長さ約28キロメートルに及ぶS字型に湾曲した海峡で、可航幅が狭くかつ強潮流である。このような条件下にあって、航行船舶が輻輳する海域であるため、日本有数の航海の難所とされ、きわめて海難発生の高蓋率が高い海域である。この海域には、船舶の航行安全を図るために、数多い航行援助施設が整備されている。

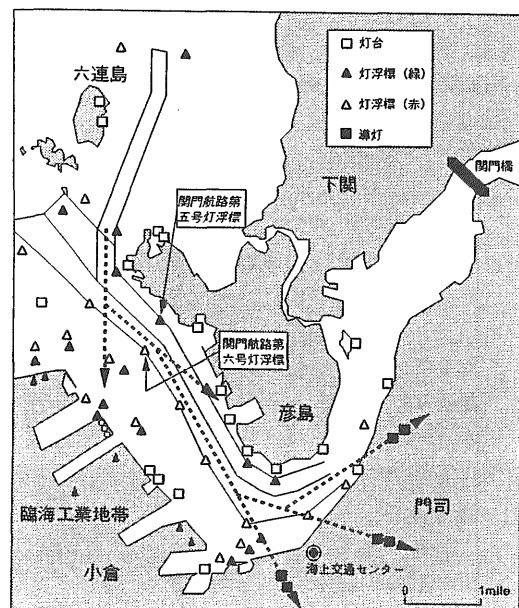


図6-1 関門海峡現航路



しかしながら、近年、船舶の大型化、高速化、多数の分岐航路の存在、周辺の街、臨海工業地帯による背景光の増加等、航行援助施設を取りまく環境が大きく変化している。

このため、この海域における、最適かつ経済的な航行援助施設の整備を行うべく、航路の形態、海象、背景光等、変化する諸条件の中での、適切な施設の機能、配置について代替案等の比較評価が行われ、新航路が提案された。新航路設定工事の前に、新航路が航路帯を示すブイ等の認識の容易さについてシミュレータを用いて確認する作業を行った。

## 6.2 関門航路の現状と改良点<sup>26)</sup>

### 6.2.1 現航路の問題点

関門海峡における夜間航行では、航路帯を示すブイがその背景である陸上の光(背景光)に紛れてしまい、操船者が航路を把握することが困難になっている。また、水深が十分でないため、現在の航路帯は屈曲している。そのため、次のような問題点がある。

- ・六連島東水路から航路に進入するさい、90度近い大変針の必要があり、西航路との行き合い関係もあって、オーバーランの傾向がある。
- ・背景光、輻輳する航行船舶の灯火等にブイの灯火が埋没し、見にくい。
- ・航路法線が屈曲しているため、東行の場合、主航路に入り第一導灯に乗る前に、まず背景光がある工業地帯に向かいその後明かりの少ない彦島に向かうことになる。
- ・強潮流である。
- ・多数の分岐航路が存在する。

### 6.2.2 新航路の概要

新航路は、以下に示すような改良がなされている。

- ・航路幅の拡張。
- ・出来るだけ航路を直線航路とする。
- ・一部ブイの灯火を同期させる。

## 6.3 航路標識の灯火表現

航路標識として、特に夜標として、灯台、灯浮標(ブイ)、導灯の3種類を扱った。導灯とは、狭水道、狭い湾口を航行する場合に、船舶に航路を示すためのもので、ある航路の延長線上に、高さの異なる2ケの灯火を設置したもので、その航路に乗れば、上下2ケの灯火は、上下同一線上に視認される。

灯火の評価項目として、灯質、灯色、灯高、光度等<sup>26)、27)、28)</sup>が上げられるが、ここでは、光度、灯色、光の大きさ、灯質を用いた。導灯の評価項目として、側感度を用いた。さらに、背景光の評価項目として、密度分布を用いた。

## 6.4 シミュレータ実験

### 6.4.1 実験概要

シミュレータ実験では、現航路については、灯火、導灯および背景光と、実際の海上における標準的な視認条件での灯火、導灯および背景光との比較、検討を行い、さらに、現航路の問題点を確認し、また、新航路については、改良点を確認するとともに、航路標識の設置位置、機能について検討を行った。シミュレーションにおける対象海域を、六連島北端から真東に引いた線から、関門海峡海上交通センターと山底の鼻灯台を結んだ線までとした。シミュレータ実験では、この航路を往復して、実験を行った。今回は、航路標識の灯火の評価を主目的としたため、他船は数隻程度とした。また、ブイ等の見え方に潮流はあまり関係がないのでなしとした。操船は関門海峡を航行した経験をもつ航海訓練所の船長が行った。実験中に聞き取り調査、および実験後にアンケート調査を行った。評価は、船長をはじめとして、海上保安庁灯台部および第七管区海上保安本部灯台部の関係者を交えて実施した。

### 6.4.2 評価

#### 1) 現航路

ここでは、ブイ、導灯および背景光が、現実に近いレベルで表現することができることを目的とした。これによって、航行シミュレーションの信頼性が高く評価でき、現航路の問題点の再現、確認が可能となった。

#### 2) 新航路

新航路では、航路幅が拡張され、また航路が直線となり、しかも、ブイが同期点減するため、ブイを視認しやすく、操船が容易となったことが確認できた。

これはその後実施した、関門航路実態調査においても同様の結果がえられた。

また、変更後の関門航路に関して、関門水先人会事務所で聞き取り調査を行った結果、関門航路の航行のしやすさは向上したとの評価を得た。

## 6.5 関門航路における灯浮標の新設等整備計画

この関門航路における灯浮標の視認性をさらに高め、さらなる航行の安全を図るためにこの計画で指摘されているいくつかの問題点、およびその対策案について、シミュレータ実験を通して再度検討を行った。

検討した項目は、以下のような点である。

- 浮標を新設する。
- 同期点減化する。
- 浮標の光力を増大する。
- 灯質を変更する。

シミュレータ実験は、各検討項目に対応したシナリオを作成し、実験後にアンケート調査を行って、評価を行い、良好な成果を得た。

7. 輻輳海域を航行する高速船の航法の提案

7.1 高速船と一般船による見合い実船実験<sup>30)</sup>

輻輳海域における高速船の安全な航行方法を求めることを目的として、実海域においてT S L飛翔と一般船の見合い実験を行った。

実船実験に先立って、当所の操船シミュレータを用いて、T S L飛翔と一般船との見合いシミュレータ実験を行い、実船実験のためのシナリオ作成および安全な航行方法の検討等を行った。見合い実船実験では、T S L飛翔の避航開始距離、航過距離等の実測と一般船の操船者の感じる脅威が、その接近方向と避航開始距離によって、どのように変化するかをアンケートにより調査し、避航開始距離との関係を求めた。また、T S L飛翔の避航操船行動に対する一般船からの視認性を調べるための実験も行った。

実船実験に参加した一般船としては、航海訓練所の北斗丸と銀河丸、東京商船大学の汐路丸、神戸商船大学の深江丸の4隻で、その操船者の人々は、実船実験とシミュレータ実験の両方に参加した。

アンケート調査票の設問は、次の3つである。

- ①各遭遇における、一般船の操船者が感じる脅威を求める
- ②一般船の操船者が、衝突の危険が発生したかどうかを判定する

③衝突の危険の程度が減少したと判定する

7.1.1 シミュレータ実験

7.1.1.1 シミュレータ実験の概要

実海域における実船実験は数が限られるので、有効に活かすことができるように、前もって、操船シミュレータを用いて、シミュレータ実験を行った。シミュレータ実験の目的は、以下のようである。

- (1) 実船実験の見合い状況の理解とその慣熟
- (2) 実船実験のシナリオの検討と修正および決定
- (3) 数の限られた実船実験で網羅できないシナリオの実行
- (4) 実船実験との比較
- (5) 安全な航行方法の検討

評価者である操船者は、T S L飛翔および一般船の船長を含む2人である。

シミュレータ実験の実験条件と結果を表7-1に示す。測定された避航開始距離と変針角度および航過距離が示されている。

各実験中と終了後にインタビューとアンケートを実施して、シナリオの検討と安全な航行方法の検討を進めた。

7.1.1.2 シミュレータ実験結果と考察

表7-1 シミュレータ実験の条件と結果

日付	通し番号	遭遇パターン	T S L飛翔の船速(ノット)	避航開始距離(海里)	変針角度(度)	航過距離(海里)	備考
7月6日	北斗丸実験1	0	40~45	1.00	20	船首左0.38	
	北斗丸実験2	-90	40~45	1.00	20	船尾左0.40	
	北斗丸実験3	-30	40~45	1.00	20	左0.31	
9月5日	汐路丸実験1	-49	40~45	2.50	15	左0.54	
	汐路丸実験2	-42	40~45	2.30	12	左0.38	
	汐路丸実験3	-47	40~45	1.80	20	左0.44	
	汐路丸実験4	-49	40~45	1.50	15	左0.29	
	汐路丸実験5	-49	40~45	2.00	18	左0.25	
	汐路丸実験6	-45	40~45	2.00	-15	船首0.54	
	汐路丸実験7	-47	40~45	1.30	30	左0.46	
	汐路丸実験8	-43	40~45	2.00	-30	船首0.89	
9月6日	汐路丸実験9	-40	40~45	2.20	7	左0.36	
	汐路丸実験10	-46	40~45	2.40	18	左0.54	
	汐路丸実験11	-50	40~45	1.50	10	左0.15	
	汐路丸実験12	-49	40~45	1.00	18	左0.20	
	汐路丸実験13	-60	45 → 30	2.00	0	左0.16	減速して避航
	汐路丸実験14	-40 → -40 → -45	40~45	1.50	10 → 5もどす	左0.10	
	汐路丸実験15	-56	40~45	1.50	30	左0.20	
	汐路丸実験16	-45	40~45	1.00	20	左0.22	
	汐路丸実験17	-45	40~45	2.00	5	左0.16	
	汐路丸実験18	-46	40~45	1.50	10	左0.22	
	汐路丸実験19	-49 → -32 → -42	40~45	2.00, 1.00	17 → 18もどす	左0.31	
	汐路丸実験20	-51	40~45	なし	なし	左0.08 船尾0.11	衝突しない関係で接近
	汐路丸実験21	-44	40~45	2.50	8	左0.30	
	汐路丸実験22	-47 → -17 → -47	40~45	2.50, 1.00	30 → もどす	左0.69	
	汐路丸実験23	-74	40~45	1.00	20	船尾0.16	
10月4日	銀河丸実験1	45	40~45	1.80		左0.20	銀河丸が避航
	銀河丸実験2	-55	40~45	2.50, 2.00, 1.50		左0.60	視認実験
	銀河丸実験3	-50	40~45	2.00	22	左0.50	
	銀河丸実験4	-45	40~45	0.90	35	左0.40	
	銀河丸実験5	46	40~45	0.90	32	船首0.40	
	銀河丸実験6	97	40~45	0.60	41	船首右0.30	
	銀河丸実験7	-56	40~45	0.80	25	左0.40	
9月22日	茶江丸実験1	-48	40~45	1.00	30	左0.32	
	茶江丸実験2	-46	40~45	0.75	40	左0.19	
	茶江丸実験3	54	40~45	2.00	25	船首0.67	
	茶江丸実験4	-49	40~45	1.00	30	左0.27	船尾を遡る
	茶江丸実験5	-50	40~45	1.50	10	船尾左0.16	
	茶江丸実験6	-46	40~45	0.50	40	左0.20	
7月13日	飛翔実験1	-5	40~45	0.30	45	左0.20	
	飛翔実験2	-102	40~45	0.20	48	船尾左0.10	
	飛翔実験3	42	40~45	0.20	-63	右0.10	
	飛翔実験4	-33	40~45	0.30	29	左0.10	
	飛翔実験5	46	40~45	0.20	41	船首0.10	
	飛翔実験6	106	40~45	0.40	39	船首右0.20	

- (1) 実船実験の見合い状況の理解とその慣熟
- (2) 実船実験のシナリオの検討と修正および決定  
シナリオに修正を加えていき、最終的に、実船実験にふさわしいシナリオとした。
- (3) 数の限られた実船実験で網羅できないシナリオの実行  
シミュレータ実験では、実船実験よりも多くのシナリオを実行した。それにより、操船者の感じる脅威の変化やT S L飛翔の避航操船行動の認識のし易さについて検討した。
- (4) 実船実験との比較
- (5) 安全な航行方法の検討

各実験終了後に操船者に対して行ったアンケートの結果、全体の傾向としては、T S L飛翔の避航開始距離が小さいほど、当然のことながら、その遭遇で感じた最大脅威のランクが高い結果となっている。同じ避航開始距離であれば、変針角度が大きいほど最大脅威のランクが低くなる傾向にある。こうしたことから、一般船に対して、自船(高速船)の避航意志を、大きな動作等で明確に示すことが重要であることがわかる。

操船者は、衝突の危険減少判定に用いた項目としては、相手船の方位角(ベアリング)とその変化および相手船の姿勢(アスペクト)とその変化を最も重要視している。次に、相手船との距離に関する項目と相手船の意志を重要視し、次いで相手船の速度に関して注意を払っている。

衝突の危険減少判定に用いた項目については、どの操船者も、相手船の方位角(ベアリング)の変化、および相手船の姿勢(アスペクト)の変化を最も重要視している。

一般船からみたT S L飛翔の避航動作の視認性についてのシミュレータ実験も行った。一般船に対して、T S L飛翔が右からと左からそれぞれ近づいて、変針角度を変えて、避航操船動作を行った。その際、一般船が、T S L飛翔の避航動作を視認できたかどうかを調べた。T S L飛翔が、一般船に接近する場合、左の方向から接近し、右に変針して一般船の船尾を航過する避航の方法は、一般船側から見て非常に早く高速船の避航の確認ができることがわかった。しかし、一般船の右舷の方向から接近し、右転して船首を航過する場合には、一般船からは、T S L飛翔が転針したことを確認しにくいことが明らかになった。

### 7.1.1.3 実船実験

#### 1) 実船実験の概要

実海域における、T S L飛翔と一般船による見合い実験を表7-2に示す。運輸省航海訓練所の5,000トンの大型船(北斗丸、銀河丸)および東京、神戸の両商船大学の500トンの中型船である練習船(汐路丸、深江丸)を用い、他の船舶の航行の少な

表7-2 実船実験の概要

一般船船名と大きさ	実験の日付	実験場所	実験のケース数
航海訓練所北斗丸 5,877ト、125m	7月29日	足摺岬160度 30海里沖	2
東京商船大学汐路丸 425ト、50m	9月27日、28日	伊豆大島東側 海域	12
航海訓練所銀河丸 4,888ト、115m	10月27日	紀伊水道 和歌山寄り沖	6
神戸商船大学深江丸 449ト、50m	11月1日	室戸岬北東沖	11

い伊豆大島の東海域、および、紀伊水道を抜けた海域と四国沖海上で実施した。

表7-3は、実船実験の全実験ケースの実験条件と当日の気象・海象条件、測定された避航開始距離と航過距離の一覧表である。

#### 2) 実船実験結果と考察

シミュレータ実験と同様、全体の傾向としては、避航開始距離が小さいほど、最大脅威のランクは高いことがわかる。2海里より接近した避航では、多くの評価者が、輻輳海域での遭遇と同じ脅威の程度以上を感じており、低く評価しているのは、T S L飛翔側と一般船側では操船責任を負っていない評価者である。一般船の操船責任者の評価は、5,000トンクラスと同様、避航開始距離1海里前後が、許容の境の所としている。

操船者は、衝突の危険判定に用いた項目としては、相手船の方位角(ベアリング)とその変化および相手船の姿勢(アスペクト)とその変化を最も重要視している。次に、相手船との距離に関する項目と相手船の意志を重要視し、次いで相手船の速度に関して注意を払っている。

衝突の危険減少判定に用いた項目については、どの操船者も、相手船の方位角(ベアリング)の変化および相手船の姿勢(アスペクト)の変化を最も重要視している。次に重要視する項目としては、相手船の意志、次いで、相手船との距離に関する項目となっている。

シミュレーション実験と実船実験を結果の比較すると、必ずしも同じ遭遇条件ではないが、全体の傾向としては、大きな違いは見受けられなかった。しかし、多少、シミュレータ実験の方が、最大脅威のランクを低く評価している。

#### 3) T S L飛翔の避航動作に対する一般船からの視認実験

一般船からみたT S L飛翔の避航動作の視認実験を実施した。左舷または、右舷正横から接近し、途中で10度、20度、30度の角度で変針をする。これらの一連の動作を一般船から見る視認性について調査した。

T S L飛翔が、一般船の左舷方向から接近して右転変針する場合、すなわち、一般船の船尾方向を航過する避航の方法は、一般船側からのT S L飛翔の避航の

表7-3 実船実験の条件と結果

日付	通し番号	通過パターン	T S L 飛翔の船速(ノット)	避航開始距離(海里)	航過距離(海里)	海象	視程	備考
7月29日	北斗丸実験1	-45	40~45	2.00	右0.8	良	良	
	北斗丸実験2	-90	40~45	1.50	船首0.5	良	良	
9月27日	汐路丸実験1	90	40~45	2.20	船首0.35	良	良	
9月28日	汐路丸実験2	-45	40~45	2.00	左1.01	良	悪	視程2海里
	汐路丸実験3	-45	40~45	1.01	左0.35	良	悪	視程2海里
	汐路丸実験4	-90	40~45	1.15	左0.59	良	悪	視程2海里
	汐路丸実験5	90	40~45	0.90	船首0.69	良	悪	視程2海里
	汐路丸実験6	90	30	0.71	右0.37	良	悪	視程2海里
	汐路丸実験7	-45	30	0.95	左0.33	良	悪	視程2海里
	汐路丸実験8	45	40~45	1.13	船首0.56	良	悪	視程2海里
	汐路丸実験9	0	40~45	1.20	左0.50	良	悪	視程2海里
	汐路丸実験10	90	40~45	1.40	左0.78	良	悪	視程2海里 汐路丸避航 飛翔協力動作
	10月27日	銀河丸実験1	-90	40~45	2.00	左0.6	悪	良
銀河丸実験2		-45	40~45	2.00	左0.38	悪	良	波高1.85m, 風速18m/s
銀河丸実験3		-90	40~45	0.65	左0.26	悪	良	波高1.85m, 風速18m/s
銀河丸実験4		90	40~45	0.80	右0.35	悪	良	波高1.85m, 風速18m/s
銀河丸実験5		45	40~45	2.47	右0.54	悪	良	波高1.85m, 風速18m/s 先行避航
11月1日	深江丸実験1	-90	40~45	2.50	船尾0.37	悪	良	波高1.84m, 風速30m/s
	深江丸実験2	-45	40~45	1.97	左0.45	悪	良	波高1.84m, 風速30m/s
	深江丸実験3	-45	40~45	0.96	左0.22	悪	良	波高1.84m, 風速30m/s
	深江丸実験4	-90	40~45	0.60	左0.1	悪	良	波高1.84m, 風速30m/s
	深江丸実験5	90	40~45	0.71	右0.21	悪	良	波高1.84m, 風速30m/s
	深江丸実験6	90	30	0.61	船首右0.33	悪	良	波高1.84m, 風速30m/s
	深江丸実験7	55	40~45	0.75	船首0.33	悪	良	波高1.84m, 風速30m/s
	深江丸実験8	0	40~45	0.75	左0.22	悪	良	波高1.84m, 風速30m/s
	深江丸実験9	90	40~45	2.97	船尾0.56	悪	良	波高1.84m, 風速30m/s 先行避航

注釈 波高：最大有義波高、 風速：最大瞬間風速

視認性が良い。しかし、一般船の右舷の方向から接近し、右転して船首を航過する場合には、一般船側から T S L 飛翔の変針を確認するのに時間を要しており、視認性が落ちていることがわかる。

その理由として、一般船から見たときに、T S L 飛翔の船首が自船の船尾を向いたときには、その変化がわかりやすいが、T S L 飛翔の当面する船側のみを見るとときには、向首変化が視認しにくいことがあげられる。

これらのことから、T S L 飛翔が一般船の船尾を航過する避航方法は、一般船から見た場合の視認性に非常に優れていることが明らかになった。

7.1.1.4 結果のまとめ

- (1) T S L 飛翔が一般船の船尾を航過するという避航動作が、一般船からの視認性には極めて優れていることが明らかになった。また、T S L 飛翔の避航操船動作に対する一般船からの視認に要する時間を測定できた。
- (2) 操船者が、衝突の危険判定に用いた項目としては、相手船の方位角（ベアリング）とその変化および相手船の姿勢（アスペクト）とその変化を最も重要視している。
- (3) 衝突の危険減少判定に用いた項目は、どの操船者も、相手船の方位角（ベアリング）の変化および相手船の姿勢（アスペクト）の変化を最も重要視している。

7.2 東京湾を例にした高速航行シミュレータ実験例<sup>31)</sup>

高速船の高速航行に関する例として、輻輳海域であ

る東京湾における高速航行シミュレータ実験を行った。

図7-1のように実験に用いた東京湾内の船舶交通流は、もっとも船舶数の多かった朝7時からの1時間のデータを基にした。輻輳海域での高速航行における船速の影響を明らかにするために、上記の交通流の中を、中ノ瀬出口から、東京灯標までの北航と、東京灯標付近から浦賀水道入り口までの南航について、それぞれ船速を、20ノット、35ノットおよび50ノットとして、シミュレータ実験を行った。船速は、それぞれ一

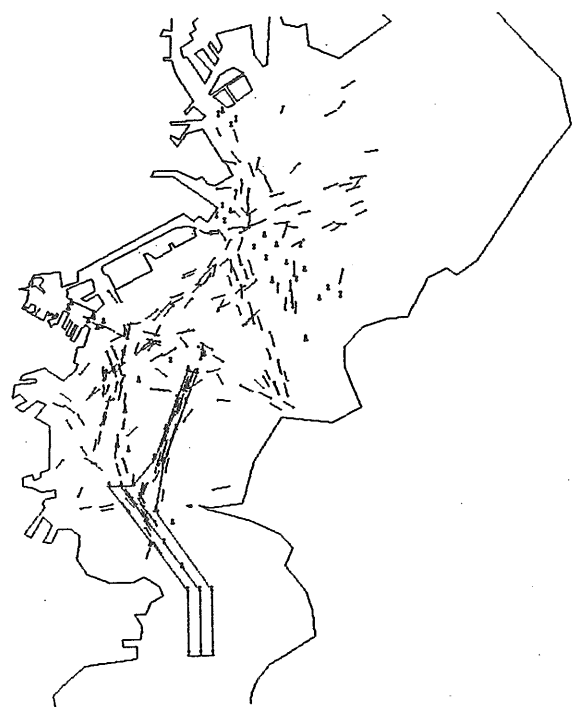


図7-1 東京湾の船舶交通流

定とするが、通常の航行と同様に必要に応じて減速してもよいものとしたが、何れの場合も結果的には、減速は行われなかった。被験者は、高速船の航行の熟練者として、T S L飛翔の船長および一等航海士の2名にお願いし、レーダー/ARPAの情報支援付きで操船していただいた。実験結果の解析例として、3分以内に0.2マイル以内に近づく可能性のある船舶を抽出し、それらの船舶について、最終的な航過状況を集計した。この中で最も接近した前方での航過距離は1,050mであった。シミュレータ実験結果についての被験者の自己評価は、すべてのケースに対して安全な航行が可能であるとの結論であった。以下の被験者の意見から以下のことが明らかになった。

- (1) 20ノットと50ノットでの航行を比較すると、低速では時間的な余裕は大きいが見合い関係となり得る船舶の数が多くなるため、判断のための負担はかえって大きくなる。また、危険な見合い関係が生じた場合、それが解消されるまでの時間が長いために、緊張が持続する傾向にある。
- (2) 50ノットでの航行に関して、今回の実験条件では、安全を担保するための作業について、時間的な余裕は十分であった。さらに高速での航行(50ノット以上)になると時間的な影響が効いてくると考えられる。
- (3) 整流されている場合は、他船の動向を推定しややすいが、非整流の場合は、他船の意志が判らないため、自船の行動決定の負担が大きかった。

被験者が、当実験において余裕があったと自己評価していることについて、実験時の操船作業の観測から、ARPA支援情報を基に、衝突危険船の同定と同時に、避航行動を決定する際に避航後に危険な見合い関係を生じないことを確認していることが明らかになっており、4.1で述べた、安全余裕の評価からは、大局的な判断が可能な第3レベルの安全余裕が実現されていたと考えられる。船速が50ノットの場合は、3分以内に0.2海里以内に接近する可能性のある船舶は多いが、実際に避航した船舶は少なく、避航開始距離はいずれも1000m以上となっている。これらの避航においては、一般船には脅威を与えていないとの被験者の主観的評価であることから、最接近点までの時間的余裕が40秒以上あれば相手船に脅威を与えないと考えていることがわかる。船速が20ノットの場合と比較しても避航開始距離は、あまり違いがなく、最接近点到達時間のみが大きくなっている。従って、この避航開始距離は、いずれも衝突コースのまま近づいてきてこの距離で避航を開始したのではなく、周囲の船舶の動向を考慮して最終的な行動をとった距離と考えられる。

### 7.3 輻輳海域における航法の提案<sup>22)</sup>

#### 7.3.1 輻輳海域における航法

一般船が既に形成している海上交通の世界に、高速船が参入し、受け入れてもらうためには、高速船が、これと遭遇する一般船に脅威を与えないような航行形態をとることが重要である。このため、高速船が一般船に与える危険感(脅威)の構造を考察し、モデル化した。その結果と実船実験結果とを照らし合わせ、同モデルの検証を行った。

また、衝突の危険感モデルの意味するところを考察することによって、実船実験で得られる主観的な数値から、より客観的な考え方を求め、実船実験ではできなかったケースや、対象船舶が異なってもその高速航行の評価が得られるように、一般化した手法とした。

#### 7.3.2 高速船が与える危険感の構造モデル

高速船の危険感の構造モデルは、次のように分類して考えることができる。すなわち、一般船のみに避航義務がある場合、一般船に針路保持義務がある場合、および双方ともに避航義務を負う場合である。

- ① 高速船が一般船からみて右側から接近し、一般船が避航義務船になる場合
  - ② 高速船が一般船からみて左側から接近し、一般船が針路保持義務船になる場合、このときには、主として高速船の操縦性能と、一般船の操縦性能とから定まる次の3段階で危険感が増していく。
    - I) 一般船において余裕を持って衝突コースから回避することができるときは、危険感を感じずが許容できる。
    - I') 同上で、余裕がないときは、危険感は大きく、許容できない。
    - II) 一般船が独自に衝突コースから回避することはできないが、高速船は独自に衝突コースから回避することができるか、または、高速船の避航の意思がわかるときは、危険感を感じずが、許容できる。
    - III) 同上で、高速船が衝突コースから回避することができるにもかかわらず、高速船に避航の意思があるかどうかかわからないときには、危険感は大きく、許容できない。
- さらに状況が緊迫すると、危険感の段階ではなく、衝突に至る。
- ③ 高速船と一般船とが、真向かい又はほとんど真向かいに接近し、双方が避航義務を負う場合、このときには、一般船は高速船の異常な接近速度に危険感を感じるが、余裕を持って衝突コースから回避できるときは許容できる。
- しかし、高速船において、先行避航等をするときには、前示②の、一般船が針路保持船の場合と同じような種類の危険感になる。

#### 7.3.3 許容できる危険感

ここで、高速船に対してのみ、常に先行避航や船員

の常務による諸動作を求めて、一般船には避航に関する動作を求めないものとする場合には、許容できる危険感の範囲にある高速船との見合い関係をまとめると次のようになる。

〔高速船との許容できる見合い関係〕＝  
〔一般船が独自に余裕を持って衝突コースから回避できる〕

または

〔高速船が独自に余裕を持って衝突コースから回避できる〕

ここでは、一般船や高速船が衝突回避に通常の手段の他にいくつかの手段を多重に持つことを余裕という言葉で表現する。これは、通常の避航手段がとれない場合でも、減速のような他の緊急避航手段がとれることを意味する。上記の各項目を次のように簡単化して船舶操縦性能で表すことができるとしよう。

〔一般船が独自に余裕を持って衝突コースから回避できる〕

一般船が、衝突予定地点を余裕を持って避けられる距離にいることである。安全側になるようにこれを言い換えれば、「一般船の最大縦距と操船作業に必要な時間及びその不確実さを吸収する時間に相当する距離との和が衝突予定地点までの距離より短いこと」が必要である。

〔高速船が独自に余裕を持って衝突コースから回避できる〕

一般船と同様に、次のように言い換えることができる。すなわち、「高速船の最大縦距と操船作業に必要な時間及びその不確実さを吸収する時間に相当する距離との和が衝突予定地点までの距離より短いこと」が必要である。ここで最大縦距を採用したのは、最大縦距は、船が相手船に接近しても衝突コースから外れた位置で最接近する距離である理由からである。

許容できる見合い関係とは、一般船または高速船のどちらかが、この条件を満足していればよい。

#### 7.3.4 通過(海上衝突予防法第8条)に対する考察

高速船に対するもう一つの危険感として評価しなければならぬものに「高速船の通過」がある。通過を表す指標として通過における距離(以下、航過距離という)があり、高速船が一般船を通過する場合、その速度差から専ら高速船側に航過距離を確保する操船が要求される。このため、安全な航過距離は、高速船が航過中に制御不能な針路の揺らぎや不測の事態が生じて、高速船の操船のみで衝突を回避できる距離とすべきであろう。

以上のことを考慮すると、具体的には、不測の事態や制御結果の揺らぎ等で高速船の針路が偏する角度と、高速船が余裕を持って緊急停止するまでに要する距離、または、許容できる距離のうち長い距離とによってで

表7-4 輻輳海域の危険感(ランク7)  
で見込んでいと推定される離隔

5,000トンクラス		500トンクラス	
銀河丸(左)	0.38(海里)	汐路丸(左)	1.3(海里)
銀河丸(右)	0.88(海里)	汐路丸(右)	1.4(海里)
北斗丸	0.18(海里)	深江丸(左)	1.8(海里)
		深江丸(右)	1.8(海里)
飛 翔	1.36(海里)		1.26(海里)
	5000トンの平均値		500トンの平均値

きる扇形に、一般船が触れないような航過距離を高速船は保つべきである。

#### 7.3.5 実験結果(避航開始距離)の考察

T S L 飛翔と一般船との見合い実船実験<sup>30)</sup>における一般船側の安全判定採点結果(衝突危険判定(脅威)の最大値のランク付け)をまとめると、500トンクラスの船舶も5,000トンクラスの船舶も、トン数の比ほど大きな差は見られなかったことと、高速船の接近方向による大きな差異もみられなかったことがわかった。

ここで、実験船各船の操縦性能から、操舵指令が発せられてから最大縦距に達するまでの距離と一般船と高速船の速度を、それぞれ12.5ノット、50ノットと仮定して、それぞれの船が最大縦距に達するまでの所要時間の間に、双方が航走する距離の和を計算し、それと輻輳海域での高速船の許容できる避航開始距離の値とから、今回の実験において各船が見込んでいた離隔距離は、表7-4の通りと推定できる。

5,000トンクラスの船の実験で得られた離隔距離は、飛翔の離隔距離よりも小さい。このことは、高速船との見合いにおいては、5,000トンクラスの船は、自力で避航するよりも飛翔側の避航を期待することを選択して、飛翔側の余裕を自船の余裕としていることを示している。500トンクラスの船の離隔距離は、いずれも1.3~1.8海里の余裕を見込んでいることがわかる。一般船と高速船の速度をそれぞれ12.5ノット、50ノットとすると、1.5海里の離隔距離は、正面からの見合いの場合では、衝突予定地点まで高速船は1.2海里、一般船は0.3海里の距離に相当し、それぞれ約86秒の時間に相当する。この値は、それぞれの一般船にとって、操船作業等に必要な時間とその不確実さを吸収するための時間に充てているものと思われる。これらの時間は、高速船との出会いを数多く経験し、高速船の航行方法に習熟すれば、操船作業に必要な時間は短縮されることが期待される。

この実験における飛翔側の離隔距離は、500トンクラスに対する値も5,000トンクラスに対する値もほぼ同じで、1.3海里近傍である。この値は約75秒の時間に相当する。これも前節の東京湾内の高速航行シミュレーション結果から明らかになった、相手船に脅威を

与えない時間40秒よりはるかに大きい。これから高速船にとっての操船作業等に必要時間とその不確実さを吸収するための時間としては十分に長いものと考えられる。これは、一般船が輻輳海域で通常遭遇する際に感じる危険感と同程度の危険感を感じているときでも、高速船側としてはまだ十分な時間的な余裕を残しているということを意味している。

7.3.6 実験結果(航過距離)の考察

一般船は高速船との航過距離は一般船同士と同様に考えて、評価しているようである。飛翔の緊急停止までに必要な距離を、操作に必要な時間も考慮してその間に航走する距離を、1.5海里と仮定する。自動にせよ手動にせよ針路の制御の揺らぎを最大±5度以内と考え、1.5海里先の偏差は0.13海里になる。実験におけるレベル7の許容できる最大の避航開始距離は2.5海里であるので、この値から、偏差は0.22海里となり、航過距離としては、この値にある程度以上の距離を持たせれば良い。これは、一般船同士とあまり変わらない値である。航過距離を保証するためには、高速船は停止距離が短いだけでなく、停止処置をとるまでの所要時間を短くすることも要件となる。

7.4 輻輳海域での許容できる避航開始距離の考察

今回の避航実験では、一般船の危険感、高速船が衝突コースから避航を開始する直前が最大であり、その後は比較的近距离を航過しても許容できる危険感に留まっている。従って、高速船は、先行避航に努めるとともに、一般船と長時間にわたって衝突コースにならないように配慮し、前述の航過距離を確保することに主として留意するならば、輻輳海域において、高速船は一般船に許容されると考えられる。

以上のことを勘案すると、輻輳海域においては、衝突コースで接近した場合の避航開始距離を求めるためには、通常の避航手段を取る所要時間に加えて、高速船の行動の確認を含めた操船判断のための時間とその不確実さを吸収する時間を考慮すれば良いと考える。銀河丸との視認性の実験では、変針角度が30度の場合には、飛翔が変針の指令を発してから銀河丸が飛翔の変針を視認するまでに、視認性の悪い船首側避航の場合でも、12~14秒で視認している。このことから、高速船との見合いにおいて、一般船が必要とする操船判断の時間は、高速船の避航意思を確認するための15秒程度の時間を含んだ操船のために必要な時間とその不確実さを吸収するための時間の和と考えられ、この時間余裕に相当する距離を余裕としてみる事ができよう。

もしも、この時間が短くなると、許容される避航開始距離がどのような値になるかを例として計算してみた。

なお、実験から得られた高速船の行動を確認するための時間15秒と、操船に必要な時間とその不確実さを吸収するために必要な時間を15秒と仮定した時の、輻輳海域における衝突の危険を避けるための距離を求めた例を表7-5に示す。高速船、一般船の速度は、それぞれ50ノット、12.5ノットとしている。

この「操船に必要な時間と不確実さを吸収するために必要な時間として仮定した15秒」について、パイロットを含むヴェテランの船長経験者(官・民の大型船)10人にインタビューを行い、その妥当性を検討した。それによると、ほぼ全員が15秒程度みればよいであろうとの見解であった。

5,000トンクラスの一般船が自力避航をする場合の必要距離の和は、高速船側が避航する場合の距離よりも大きいため、余裕としてみる時間の合計が30秒の場合の必要距離の和としては、高速船側の避航を期待した1.26海里をとるのが妥当である。

なお、表7-5の距離の和は、一般船、高速船の両者の必要距離の和を示しており、両者のコースが交叉している場合の2船間の直線距離としての避航開始距離は、さらに短くなる。一般船の必要距離をAとし、高速船の必要距離をBとし、両者の交叉角をαとするならば、両者間の距離(避航開始距離)は(A<sup>2</sup>

表7-5 輻輳海域における衝突の危険を避けるために必要な高速船と一般船のそれぞれの距離の和の例\*(高速船の行動視認時間15秒、操船意思決定等の時間15秒とした場合)

	一般船が走る距離 (A)	高速船が走る距離 (B)	両船の距離の和 (A+B)
5,000トンクラス 自力避航の場合 高速船の避航を期待する場合	0.42 (海里) 0.25 (海里)	1.72 (海里) 1.01 (海里)	2.14 (海里) 1.26 (海里)
500トンクラス 自力避航の場合	0.18 (海里)	0.74 (海里)	0.93 (海里)
高速船 自力避航の場合	0.25 (海里)	1.01 (海里)	1.26 (海里)

\* 正面から見合った場合には避航開始距離に相当

表7-6 輻輳海域における高速船の許容できる避航開始距離の一例(高速船の行動視認時間15秒、操船意思決定等の時間15秒の場合)

	一般船が走る距離 (A)	高速船が走る距離 (B)	避航開始距離* (S)
5,000 自力避航の場合 高速船の避航を期待する場合	0.42 (海里) 0.25 (海里)	1.72 (海里) 1.01 (海里)	1.76 (海里) 1.04 (海里)
500 自力避航の場合	0.18 (海里)	0.74 (海里)	0.77 (海里)
高速船 自力避航の場合	0.25 (海里)	1.01 (海里)	1.04 (海里)

\*  $S = (A^2 + B^2 - 2AB\cos\alpha)^{1/2}$  (交叉角度α = 90度の場合)

$+B2 - 2AB\cos \alpha) 1 / 2$  で与えられる。

両者の交叉角度が90度の場合の、表7-5に相当する避航開始距離の例を表7-6に示す。これらの値は、7.2の東京湾のシミュレーションによって得られた前方横切りにおける許容できる避航開始距離の値の最小の例1,050mに近く、高速船に対する一般船の操船意思決定等に必要時間として30秒程度を考慮することは妥当と思われる。このように、避航開始距離については実船実験からの表7-4を基本として輻輳海域の航行を考えることになるが、高速船が先行避航を徹底する航法が周知されれば、一般船の操船意思決定等に必要時間が例示したように短くなることが期待される。

### 7.5 高速船の安全な航行方法について

対象とする高速船の操縦性能、停止性能等が求められれば、操船作業等における必要時間という形で、一般に認められるような時間における余裕や、それに相当する距離における余裕を定めることができ、安全な高速航行をするために必要な最小避航開始距離や、航過距離を客観的に求め、高速航行の安全性を評価することができる。実船実験の結果からは、輻輳海域で一般船に許容されるためには、高速船は、一般船に衝突の危険を感じさせない航行方法をとればよいことがわかる。実船実験で得られた輻輳海域での遭遇で通常に感じられる程度の危険感を与える境界より外側に高速船がいる場合には、高速船は見合い関係を生じないように狭義の先行避航を行う。この境界を越えても、万が一、衝突の危険がある場合には、高速船は一般船に先んじて、専ら避航を行う。

さらに、操船等に必要なしかるべき余裕を持った距離を与える境界を越えた場合は、高速船は減速して避航を行う。ただし、トラブル等による万が一の衝突の危険に備えて緊急停止の領域は必ず確保しておく。このように、高速船が一般船との衝突を避ける手段をいくつも用意して、なおかつ、一般船に危険感を与えないように配慮して航行していることを、一般船から理解されることが輻輳海域の高速航行の要件となる。

実船実験では、一般船が許容できる高速船の航過距離が一般船同士と同程度であることがわかった。このことから、同行になるように交通流を整流することによって、出会い関係における横切りをなくすように努めれば、輻輳海域での高速航行をより安全に行うことができると考える。

これら航行方法を効果的かつ確実にを行うためには、高速船であるということを表示するフラッシングライト等の灯火の整備や、避航動作の視認が容易な前後部マストの整備とともに、さらに、避航動作の視認が容易な船尾側への変針の励行が望ましい。

また、一般船がこのような高速船の航行方法等を許容するために、次のような前提条件が望ましいものと

考える。

- 高速船側は、衝突防止の各動作を徹底して遵守する。そのために必要な運航体制を常に執ること。
- 前項の要件にもかかわらず、一般船は高速船を避航するための操船をすることがあることを高速船は考慮して、余裕のある操船をすること。

例えば、高速船が一般船の右側から接近し、一般船からの視認性の良い船尾側避航をする際にも、一般船が避航義務を感じて右転する可能性があることを考慮しながら、高速船が余裕のあるうちに、一般船の船尾側に変針すべきであろう。なお、高速船がどのように航行し、どのように一般船を避航するかということや、このような避航が可能な運航体制を常に執っていることを、一般船が周知することとなる場合は、より安全な航行が可能であろう。

高速船の設計に当たっては、一般船に衝突の危険を感じさせない航行方法を行うために重要な最小避航開始距離や、航過距離が高速船の性能等に大きく依存することから、当然のことではあるが、次のことに一層配慮することが望まれる。

- 変針性能、停止性能を高めること。
- 精度がよく信頼性が高い針路保持機能を持つこと。

さらに、これらの性能を十分に生かすために、運航者がこれらの操縦操作をすばやく間違いなく行えるようなインターフェイスを持つこと。

以上、通常 of 精神条項と同じ様な表現であるが、各項目に意味付けがなされた条項表現となり、具体的な設計要件として検討できる表現となった。

### 8. おわりに

シミュレータを用いた研究として、これまで述べたように多岐にわたり数多くの有用な成果が得られた。成果として、造船研究協会のRR関係における委員会の基礎資料の作成、高速船の安全性評価技術手法の確立と高速船の安全な運航方法の提案、内航タンカーの近代化船に搭載する航行支援機器の開発における設計要件の抽出と実機の製作および海上保安庁灯台部が関門海峡の航路幅拡張工事に伴い実施した、プイの移設の事前・事後の検討及び評価等が挙げられる。

特に、高速船の運航に関する安全性評価法の考え方として、当所が提案した余裕を指標とする評価の考え方は各方面に於いてかなり受け入れられつつある。また、これまであまり例がない実海域における、実船による見合い実験を基にして、一般船から受け入れやすい輻輳海域における大型の高速船の航行方法についての提案も行った。将来、大型高速船の運航が実現するとき、現実の航行方法とするためには、各方面に於いて更に検討を重ねる必要はある。しかし、基本的な問題については、成果が得られたものと考えている。

内航タンカー近代化船については、平成9年度には、



開発した航行支援機器類を搭載した実船が竣工した。現在、実船による評価・検討を実施し、人に優しい、より使いやすい航行支援システムとしての一層の育成を図ることとしている。

また、関門海峡のブイ移設の研究に於いて開発した灯火の表現技術をもとにした、シミュレータを用いた航行援助施設の設置に関する評価法は、海上保安庁灯台部から今後のブイの敷設、埠頭灯台の設置、航路策定等の事前及び事後の評価法として、大いに有効であるとの評価を受けた。今後も、シミュレータ装置の利用も含んだ、継続した協力を期待されている。

そうした例として、東京湾横断道路（アクアライン）の完成により、橋梁付近の水域に航路を設定する必要がある。この開発した評価システムを用いて、現在、ブイの設置について検討を実施しているところである。今後は、さらに汎用化したシステムとしてのブラッシュアップも計画している。

本シミュレータは、設置された平成3年度末の当時においては、一応、実用的にも、機能的にも日本におけるトップクラスのシステムであったが、研究が終了した平成7年度においては、世間の計算機のレベルからも、シミュレータの機能からも、かなり遅れたシステムとなっていた。計算機の進歩には目を見張るものがある。

今後のシミュレータを用いた研究を考えた場合、ハードとしてのシミュレータは、船研として保有すべき設備の一つであり、しかも最新のものであれば言うことはない。

しかも、こうした船研のシミュレータ設備は、シミュレータを持たない他の国立機関が実施する業務の受け皿としての位置づけも考える必要がある。

しかし、その設置費用は、まだまだ高価であり、設置後の保守に要する費用もかなりの額にのぼる。そのため、限られた予算の中で当所の研究の目的にあったシミュレータの整備を心がける必要がある。

こうした状況のもと、国の研究機関としての船研は、安全性の確保や安全性評価の研究を行う必要がある。特にその中で、最近の海難事故の90%以上を占めるヒューマンエラーによる事故の防止策の研究を一層、推し進めていく必要がある。そうした研究の例として、荒天時におけるヒューマンファクターに関する研究があるが、これまで、実船以外再現が不可能であったため、ほとんど研究がなされていない。この研究を、荒天の状態を模擬できるシミュレータが可能とする。

船の運航は、人間がシステムの要素の一部として組み込まれるシステムである。こうしたマン・マシン系におけるヒューマンファクターの研究には、シミュレータは不可欠な実験ツールであり、唯一のツールであると考えてもよい。船舶の航行の安全確保のために、当所にこうした荒天を模擬できるシミュレータの整備を

望むものである。

#### <参考文献>

- 1) 金湖他：船舶航行システムの安全性評価用シミュレータの開発、日本航海学会第85号（1991）
- 2) 田中他：船舶航行システムの安全性評価用シミュレーター、一リアリティーのある景観画像一、日本航海学会論文集、第88号（1993）
- 3) 金湖他：幅狭海域における大型高速船の運航体制評価手法について、日本造船学会論文集第174号（1993）
- 4) 例えば、飯山：人間—機械系設計の現状、人間工学第5巻、第6号（1969）
- 5) 宮崎他：海上交通の安全に及ぼす高速船航行の影響の評価、日本航海学会論文集87号（1992）
- 6) 例えば飯山：人間—機械系設計の評価法の現状、人間工学第5巻第6号（1969）
- 7) 今津他：避航限界と被避航限界の研究、日本航海学会論文集、第85号（1991）
- 8) 沼野他：船舶航行における潜在的危険の評価、日本航海学会論文集、第85号（1996）
- 9) 東京湾船舶航行調査研究会：平成3年度 東京湾船舶航行調査報告書、東京商船大学（1992）
- 10) 東京湾横断道路海上交通実態調査報告書、東京湾横断道路（株）（1991）
- 11) 金湖他：シミュレータ実験による大型高速船の運航体制評価（その1：昼間の航行）、日本造船学会論文集、第174号（1993）
- 12) 廣津：分散分析、教育出版（1976）
- 13) 林：統計学講義、第2版（1973）
- 14) 河口：多変量解析入門 森北出版（1978）
- 15) 金湖他：シミュレータ実験による大型高速船の運航体制評価（その2：夜間の航行）、日本造船学会論文集、第175号（1994）
- 16) 宮崎他：大型高速船支援効果の操船者による主観的評価、日本航海学会、第89号1992）
- 17) 寺野：システム工学入門— あいまい問題への挑戦—、共立出版（1985）
- 18) 福戸他：狭水道における操船時の余裕について、日本航海学会、第92号（1995）
- 19) 伊藤他：シミュレータを用いた長時間運航の安全性評価について、日本航海学会、93号（1994）
- 20) 福戸他：航行安全評価に用いる操船シミュレータ、日本航海学会誌、第118号（1993）
- 21) 沼野他：狭水道航行のための運航支援、日本航海学会、第92号（1995）
- 22) 平成5年度 本州四国連絡橋航行安全調査報告書：本州四国連絡橋公団、（社）瀬戸内海海上安全協会（平成6年3月）
- 23) 海峡部の通航船実態調査報告書（来島海峡）：

本州四国連絡橋公団第三建設局、(社)日本海難防止協会(平成4年3月)

- 24) 田中他：操船シミュレータを用いた関門海峡の灯火の表現方法：第66回船舶技術研究所講演会(1995)
- 25) 田中他：操船シミュレータ上の灯火の表現手法とその評価、日本航海学会、第95号(1996)
- 26) 杵名景義：海図の読み方、天然社
- 27) ライティングハンドブック：照明学会編、オーム社
- 28) 新編色彩科学ハンドブック：日本色彩学会編、東京大学出版会
- 29) 吉永弘編：応用分光学ハンドブック、朝倉書店
- 30) 宮崎他：高速船と一般船との見合い実験—実験実験とシミュレータ実験—、日本航海学会論文集第95号(1996)
- 31) 沼野他：東京湾を例とした輻輳海域の高速航行シミュレータ実験、日本航海学会論文集、第95号(1996)
- 32) 伊藤他：輻輳海域における高速船の安全な航行方法(高・低速2船間の見合い関係における衝突の危険回避モデル化)、日本航海学会論文集、第95号(1996)