

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評価	38
(4) 三菱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
(5) 川崎重工業フライトシミュレータ	27	3.3.5 結果のまとめ	39
2.2 景観画像表示システム用計算機の仕様と選定	28	3.4 主成分分析による解析 ¹⁶⁾	39
2.3 高速航行シミュレーションシステムの構築	28	3.4.1 主成分分析について	39
2.3.1 概要	28	3.4.2 シミュレータ実験	39
2.3.2 景観画像表示システム用計算機の仕様概要	28	3.4.2.1 シミュレータ実験のアンケートの取り方	39
3. 運航体制評価手法とシミュレータ実験 ³⁾	29	3.4.2.2 調査した操船支援	39
3.1 運航体制評価手法	29	3.4.3 主成分分析による操船支援の主観的評価	41
3.1.1 評価基準量の導出	29	3.4.3.1 主成分分析とアンケート回答の数量化	41
3.1.2 限界輻輳度の導出	30	3.4.3.2 夜間の航行実験の主成分分析	41
3.1.3 限界輻輳度と対象海域の輻輳度との比較	30	3.4.3.3 昼間の航行実験の主成分分析	43
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	3.4.4 結果のまとめ	44
3.1.5 運航体制の有効性の評価	31	3.5 結論	44
3.1.6 評価基準量(避航開始限界距離)の導出	31	4. 安全性評価法について	44
3.2 昼間航行のシミュレータ実験と運航体制評価 ¹¹⁾	31	4.1 余裕による安全性評価法	44
3.2.1 シミュレータ実験の概要	31	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 ¹⁸⁾	45
3.2.2 限界航行密度	31	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 ¹⁹⁾	46
3.2.2.1 シナリオ	31	4.3.1 長時間航行の安全性評価法	46
3.2.2.2 実験方法	31	4.3.1.1 長時間高速航行の安全性評価の実験	46
3.2.2.3 実験結果	31	4.3.1.2 長時間高速航行の安全性評価の実験結果	47
3.2.2.4 対象海域の航行密度との比較	33	4.3.2 長時間高速航行の安全性向上の方策	48
3.2.3 運航体制評価実験	33	4.3.2.1 疲労要因低減	48
3.2.3.1 シナリオ	33	4.3.2.2 時間要因低減	49
3.2.3.2 実験方法と実験結果	33	4.3.2.3 操船支援作業	49
3.2.4 運航体制の有効性評価	33	4.3.2.4 緊急時処理事業支援	49
3.2.4.1 避航開始距離の分散分析 ^{12)、13)} による評価	33	4.3.3 結果のまとめ	49
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	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
3.2.5 結果のまとめ	36	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 ²¹⁾	49
3.3 夜間航行のシミュレータ実験と評価 ¹⁵⁾	36	5.1.1 操船シミュレータ実験	49
3.3.1 シミュレータ実験の概要	36	5.1.1.1 実験の概要	49
3.3.2 限界航行密度	37	5.1.1.2 実験の方法	50
3.3.2.1 シナリオ	37		

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 ¹⁹⁾	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 ^{24)、25)}	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 ²⁶⁾	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 ²⁰⁾	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 ³¹⁾	58
7.3 輻輳海域における航法の提案 ³²⁾	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¹⁾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²⁾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)

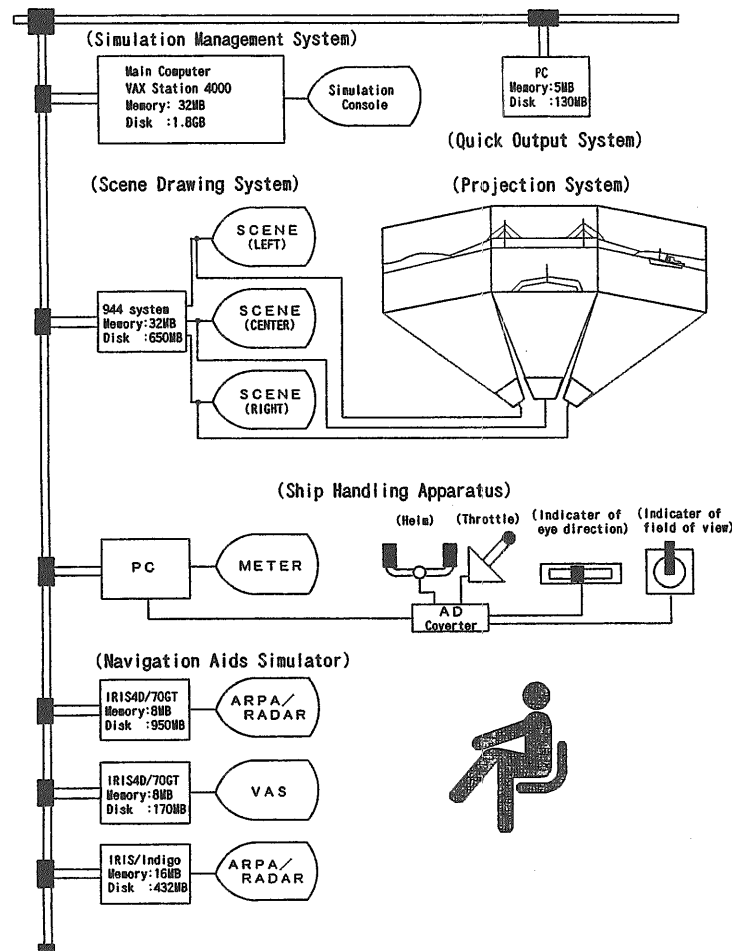


図2-1 航行シミュレーションシステムの構成

- 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³⁾

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⁴⁾。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⁵⁾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⁶⁾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⁷⁾。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⁸⁾。

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⁹⁾、¹⁰⁾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¹¹⁾

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/nm²、4隻/nm²、7.5隻/nm²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/nm²の妥当性を検証するため、6隻/nm²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/nm²、4

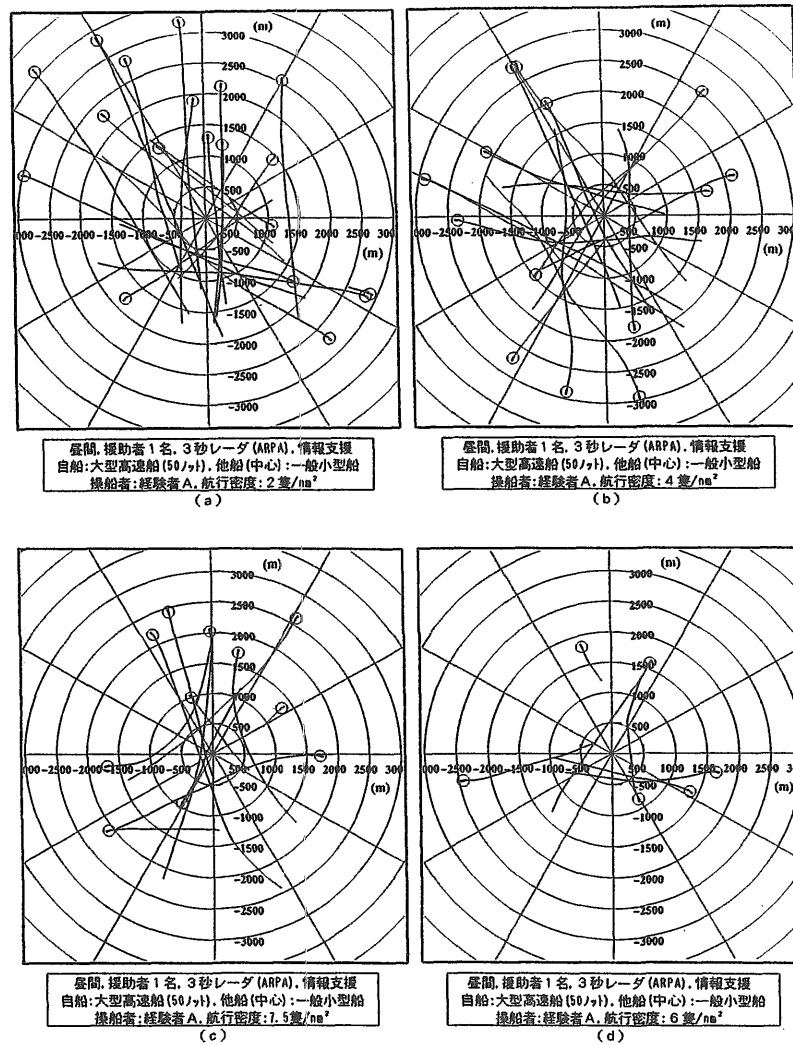


図3-1 避航開始時点における避航された他船を中心とした自船の相対位置

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 ²	シナリオ中の 輻雑度の差	輻雑 場面の 連続性	東京湾 以上に かなり 混雑 している	相手に 与えた 余裕が あった か	与えた 余裕の 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 番 換 船 が 困 難 な と こ ろ で は ど こ ま で 判 断 で き た か	全 体 中 の 限 界 守 り	この 輻 雑 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 かなり 混雑 している	少し 与 え た	相手 船首 に 自船 を 向 け た	大き か つ 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 つ た	ほとん ど連 続し てな か つ た	それ以 下に 非 常 に す ま 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	—	—	—	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 つ た	ほとん ど連 続し てな か つ た	東京湾 以下 に 少 し す ま い て る	かなり 与 え た	自船 行 動 の 伝 達 が 不 明 確	大き か つ 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 つ た	かなり 連続 して いた	東京湾 以上 に かなり 混雑 している	かなり 与 え た	相手 船首 に 自船 を 向 け た	小さ か つ 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) 自船の換船性能不足(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 ま い て る	ほとん ど与 え な か つ た	—	大き 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 少 し 混 雑 している	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	—	—	—	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 つ た	かなり 連続 して いた	東京湾 以上 に かなり 混雑 している	ほとん ど与 え な か つ た	航 過 距 離 が 短 すぎ た	大き か つ 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()	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