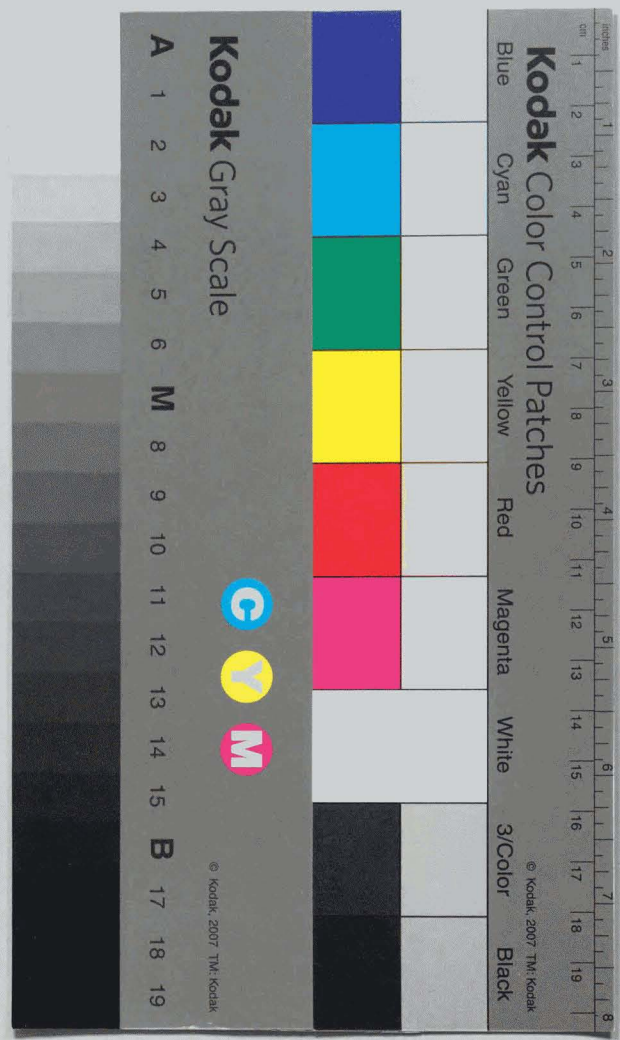


船舶の高速安全航行および航行援助施設に関する研究
—模船シミュレータによる評価—

平成11年12月

菅野 恵子



①
船舶の高速安全航行および航行援助施設に関する研究

—操船シミュレータによる評価—

平成 11 年 12 月

宮 崎 恵 子

目次

1 序論	5
1.1 船舶航行の現状の概観	7
1.1.1 船舶航行の現状と改善の必要性	7
1.1.2 モーダルシフト	7
1.1.3 安全性の向上の要請	8
1.1.4 航行援助施設の改善	9
1.2 船舶航行の現状における問題点とその対応	9
1.2.1 高速船参入および航行援助施設の改善における問題点	9
1.2.2 問題点への対応	10
1.3 船舶航行の評価と操船シミュレータ	10
1.3.1 船舶航行の評価におけるシミュレータ手法	10
1.3.2 航空分野におけるシミュレータ	11
1.3.3 船舶技術研究所の操船シミュレータの概要	13
1.3.3.1 シミュレーション管理システム	15
1.3.3.2 景観画像表示システム	17
1.3.3.3 操船操作システム	19
1.4 海上交通ルールと交通管制	22
1.4.1 海上交通ルールに関する現在の法規	22
1.4.2 現在の交通管制	23
1.4.3 海上交通ルールおよび交通管制の変化	23
2 高速船安全航行のための安全性評価	
2.1 緒言	25
2.2 船舶航行の安全	25
2.2.1 船舶航行の安全の考え方	25
2.2.2 想定される外乱	28
2.3 船舶航行の安全性評価手法	28
2.3.1 潜在的危険による評価	28
2.3.2 潜在的危険の排除による安全の確保	28
2.3.3 避航眼界との対応	29
2.3.4 高速船航行への適用	29

2.4	シミュレータ実験	30
2.4.1	シミュレータ実験の概要	30
2.4.2	シミュレータ実験の結果	31
2.5	評価の実施による考察	31
2.6	船舶航行の安全性評価指標	34
2.6.1	潜在的危険と操船者の感じる脅威	35
2.6.2	操船者の感じる脅威とその要因	37
2.7	シミュレータ実験	38
2.7.1	シミュレータ実験の概要	38
2.7.2	シミュレータ実験の結果	39
2.8	考察	40
2.8.1	反航および横切りの場合	40
2.8.1.1	非脅威限界点	40
2.8.1.2	許容限界点	43
2.8.2	同航の場合	43
2.8.3	脅威に影響を及ぼす要因についての考察	46
2.9	結言 -高速航行の安全性評価手法と評価指標-	46
3	高速船安全航行のための有効な操船支援	
3.1	緒言	48
3.2	操船支援の策定	48
3.3	アンケートによる意見集約方法	50
3.4	シミュレータ実験	50
3.5	操船支援の組み合わせ	51
3.6	アンケート結果の解析と考察	51
3.6.1	主成分分析とアンケート回答の数量化	51
3.6.2	夜間航行シミュレータ実験の主成分分析	55
3.6.3	昼間航行シミュレータ実験の主成分分析	60
3.7	高速船同士の遭遇について	65
3.8	結言 -高速船の有効な操船支援-	66
4	高速船安全航行のための航行方法-主としてTSL飛翔を対象として-	
4.1	緒言	68
4.2	航行方法モデル化の基本的考え	68

4.3	アンケートによる意見集約方法	69
4.4	シミュレータ実験	70
4.4.1	シミュレータ実験の概要	70
4.4.2	シミュレータ実験の結果と考察	72
4.4.3	シミュレータ実験の問題点	77
4.5	実船実験	77
4.5.1	実船実験の概要	77
4.5.2	実船実験の結果と考察	79
4.6	TSL飛翔の避航動作に対する一般船からの視認実験	84
4.7	実船およびシミュレータ実験のまとめ	86
4.8	実船実験における実験参与船員のクラス間解析	86
4.8.1	解析手順	86
4.8.2	最大脅威のランクのクラス間比較	88
4.8.3	危険判定項目と危険減少判定項目のクラス間比較	88
4.9	実船実験とシミュレータ実験間解析	96
4.9.1	最大脅威のランクの実船実験とシミュレータ実験間比較	96
4.9.2	危険判定項目と危険減少判定項目の実船実験とシミュレータ実験間比較	98
4.10	参与者クラス間解析および実船とシミュレータ実験間解析のまとめ	101
4.11	結言 -高速船の安全な航行方法-	102
5	航行援助施設の安全性向上	
5.1	緒言	103
5.2	関門航路の問題点と変更点	105
5.2.1	旧関門航路の問題点	105
5.2.2	変更後の関門航路の概要	105
5.3	操船シミュレータ上の灯火表現手法	108
5.3.1	灯浮標の光度表現	108
5.3.2	灯浮標のサイズ表現	109
5.3.3	背景光の表現	110
5.3.4	灯台の表現	112
5.3.5	灯質の表現	112
5.3.6	導灯の表現	113

5.4	操船シミュレータ上の灯火表現の評価	113
5.4.1	評価の概要	113
5.4.2	シミュレータ実験	115
5.4.3	評価の結果	115
5.5	変更後の関門航路の評価についてのまとめ	116
5.6	航路の視認性・識別性向上方策の策定	117
5.7	操船シミュレータ上の灯火表現手法の改良	118
5.7.1	同期点滅・カスケード点灯等の簡便な設定	118
5.7.2	灯浮標・灯台等の灯火表現の改良	120
5.7.3	大気透過率の反映	123
5.7.4	背景光の表現の改良	124
5.8	改良した操船シミュレータ上の灯火表現の評価	127
5.8.1	灯浮標・灯台等の灯火表現の改良	127
5.8.2	大気透過率の反映	127
5.8.3	背景光の表現の改良	128
5.9	航路の視認性・識別性向上方策の評価	128
5.9.1	シミュレータ実験の概要	128
5.9.2	シミュレータ実験の目的	128
5.9.3	シミュレータ実験の実験条件	128
5.9.4	シミュレータ実験の内容	129
5.9.5	シミュレータ実験の手順	129
5.9.6	シミュレータ実験の結果と考察	130
5.9.7	シミュレータ実験のまとめ	131
5.10	前手法(5.3節)の問題点の改善	133
5.11	結言	134
6	総括的結論と今後の課題	
6.1	総括的結論	135
6.2	今後の課題	137
	謝辞	138
	参考文献	139
	付録	143

1 序論

海上交通は、日本における経済活動の重要な位置を占めている。その海上交通の安全性を向上させることは、事故を防ぎ、人的および地球環境的にも貢献することとなる。一方、トラック輸送への偏りで弊害の出た国内物流を再編し、地球温暖化を防いで地球環境を守るために、運輸省によってモーダルシフト政策が推進されている⁽¹⁾⁽²⁾。この政策の一環として開発された大型高速船テクノスーパーライナーをはじめ、高速船の航行が、従来型の船舶交通に入り込みつつある。これまでである一定の安全を保っていた従来型の船舶交通の世界に、新たに高速船が参入する場合、その安全性を事前に評価することは、重要なことである。実船実験が不可能に近い事前評価には、近年、格段に進歩した操船シミュレータが、その有効な手法となることが考えられる。

また、高速船を含んだ海上交通において、航路を示す灯浮標や灯台等の航行援助施設は、船舶の安全航行の重要な役割を担っている。この航行援助施設は現在十分設置が行き渡っているが、安全性向上のために、より効果的な配置が求められている。また、設置・管理する側だけでなく、利用する操船者の視点を盛り込むことが、使いやすく、さらに安全な航行環境を提供するという点で必要とされてきている。ここでも、操船シミュレータは、実際に航行援助施設の設置工事をおこなう前に、操船者の視点をいれた評価を実施できるツールとして有効であることが考えられる。

以上のような操船シミュレータが海上交通の安全に果たす大きな可能性に基づき、本研究は進められた。本研究の流れを図 1.1 に示し、以下、本論文の構成について述べる。

このあと第 1 章では、高速船の安全航行に主眼をおいて船舶航行の現状と問題点を明らかにし、これを解決する手法として、操船シミュレータを用いた安全評価について述べる。さらに、実験に用いた操船シミュレータについて紹介し、海上交通ルールと管制について主な点をまとめている。

第 2 章においては、高速船の安全航行の評価手法として、潜在的危険を考慮した安全性評価手法について考案している。高速船側からの評価として、潜在的危険を回避するための安全余裕を基に評価する手法を、一般船側からの評価として、操船者の感じる脅威を基に評価する手法を考案し、シミュレータ実験により手法の有効性を示した。

第 3 章では、夜間および昼間の大型高速船の各種操船支援方法について、シミュレータ実験の際に実施した操船者へのアンケートを基に、主成分分析により各支援の有効性を明確にした。

さらに第 4 章では、新形式の高速船であるテクノスーパーライナー実海域実験船「飛翔」の安全な航行方法を求めるために実施したシミュレータ実験と実海域実験を通して、まず、高速船の避航動作の視認性および操船シミュレータの有効性について示した。さらに、主

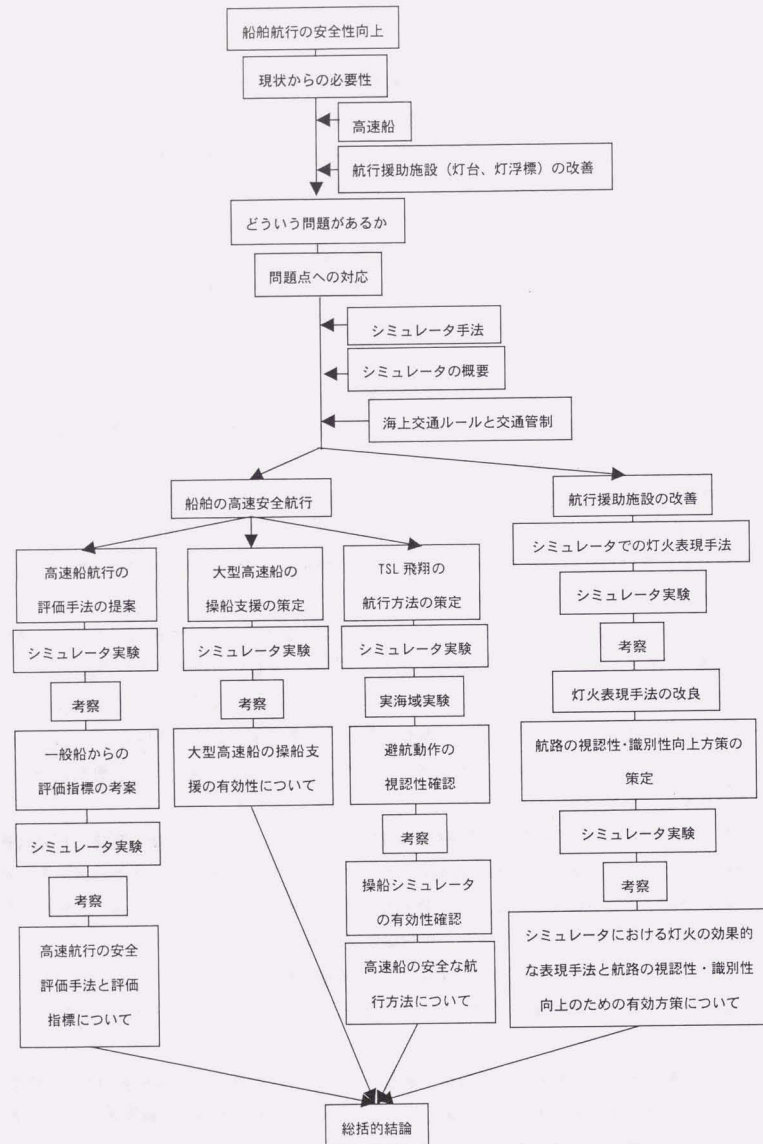


図 1.1 本研究のフローチャート

成分分析等により、操船者の高速安全航行に関する知識等について明らかにして、高速船の安全な航行方法についてまとめた。

そして第 5 章にて、高速船を含んだ海上交通の安全に欠かせない航行援助施設の視認性・識別性を向上させる有効な方策について、関門航路を対象として求めるとともに、その検討に有用な操船シミュレータにおける灯火の効果的な表現手法を開発した。

以上によって得られた結論を、第 6 章で総括している。

1.1 船舶航行の現状の概観

1.1.1 船舶航行の現状と改善の必要性

現在でも、船舶航行は、一定のレベルの安全性が保たれている。しかし、衝突、乗り揚げをはじめとする海難事故は後をたたず、年間の海難数は 8,000 件にも上る³⁾。海難事故は、人命を損ない、積荷や環境にも多大な被害を与える。海難事故を減らすことは、重要な課題である。一方、地球環境の保護は、世界的な関心事となっている。日本においても、特に地球温暖化防止の点から、二酸化炭素排出量を低減するために、運輸省の推進しているモーダルシフト政策の実現が望まれている。

船舶航行は、操船者と船舶から成る人間-機械系システム（ヒューマンマシンシステムともいう）であり、他船から成る交通流や灯浮標・灯台等が示す航路・港湾等の交通環境、および潮流・風・波等が影響する自然環境の中に存在するものである。よって、現状の海難事故を減らし、モーダルシフト政策にも関連して効率良い運航を目指して新規参入する高速船等の航行安全を図り、航行環境の中でも特に重要かつ行政の責任のある灯浮標等の航行援助施設を改善し、海上交通全体の安全を向上させるために、船舶の高速安全航行および航行援助施設の効果的な評価手法の開発や方策の策定が必要である。

1.1.2 モーダルシフト

運輸は、経済社会活動の基盤であり、豊かな暮らしを実現するために欠くことのできないものである。しかしその一方で、運輸においては、その移動体である自動車等の交通手段によりエネルギーが多量に消費され、その結果として地球温暖化の原因となる二酸化炭素や大気汚染の原因となる窒素酸化物等の環境に負荷を与える物質が排出されている。大都市を中心とした窒素酸化物等による大気汚染問題が、依然として厳しい状況にある中、特に、人間の諸活動に伴う二酸化炭素等の温室効果ガス排出量の増加に起因した地球温暖化問題が世界的にクローズアップされている。運輸部門における二酸化炭素排出量は年々増加しており、今後も需要の伸び等により更に増えるものと予想されている。

1994 年に発効した気候変動枠組条約では「気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすこととならない水準において大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させる」ことが究極的な

目的と定められている。この目的に向けて、今後見込まれる交通需要や利用者のニーズに適切に応えながら、輸送機器のエネルギー消費効率の向上、低公害車の普及、物流の効率化、公共交通機関の利用促進等の対策により、極力エネルギーの消費を抑え、二酸化炭素や窒素酸化物等による環境負荷を抑制し、地球環境にやさしい輸送交通システムを形成しなくてはならない。

具体的に見てみると、1995年度の部門別二酸化炭素排出量では、運輸部門は、20.4%を占め、輸送機関別では、自動車は、88.0%、内航海運は、5.5%である。また、貨物輸送機関の二酸化炭素排出原単位（1トンの荷物を1km運ぶ際の二酸化炭素排出量（炭素換算））を見ると、自家用小型トラックは、鉄道の100倍、内航海運の60倍である。

現在までに、交通機関ごとの省エネルギー対策として、船舶に関しては、推進抵抗の低減、船体の軽量化、エンジンの効率改善、船内エネルギーの有効活用等による推進効率の向上を目指した技術開発が進められ、その成果が、実船に活用されてきた。船舶はエネルギー消費効率がいよ運輸機関であるが、さらに推進効率を高め、エネルギー消費量を少なくすることで二酸化炭素排出量を削減できる。そのため、運輸省では、海上輸送部門における更なる推進効率の向上を目指した技術開発等が進められている。

物流の効率化のためには、エネルギー効率のよい交通体系を形成する必要がある。現状では、機動性に優れたトラック輸送が中心になっているが、エネルギー効率のよい交通体系を形成するためには、よりエネルギー効率が高く、二酸化炭素排出量の少ない輸送機関である鉄道、海運へ誘導することが必要である。このため、中長距離の雑貨輸送において、鉄道・海運が占める割合を現在の約40%から2010年に約50%に向上させることを目標にしてモーダルシフト推進のための取り組みが進められている。

以上述べてきたような、幹線物流効率化のための内航海運・鉄道へのモーダルシフトの推進の政策は、1996年度貨物流通政策推進計画に取り上げられており、具体的には、海運の輸送力の増強と円滑化があげられている。輸送時間短縮を目指した新形式船舶の技術開発、特に新形式超高速船テクノスーパーライナーの開発は、1994年4月のモーダルシフトを推進するための鉄道、海運の活用方策に関する提言の中に明記されている。1996年度貨物流通政策推進計画には、テクノスーパーライナーの事業化の支援もあげられている。

テクノスーパーライナーに限らず、また、国内のみならず、海上輸送の効率化を目指した高速船や新形式船の開発⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾は今後もおこなわれていくであろう。

1.1.3 安全性の向上の要請

世界的に地球環境保護の動きが高まる中で、人類共通の財産である海洋環境の保全を図り、それを次世代に引き継ぐことは我々の重要な使命である。国際海事機関IMOにおいて、海洋環境の保全に関する国際条約が検討され、これに関連した取り組みが各国でなされて

いる⁽⁷⁾。日本においても運輸省が中心となり、国際条約の検討に参加し、尽力している。

一方、1997年1月2日未明のロシア船籍タンカーナホトカ号（13,157トン）のC重油流出事故や、1997年7月2日午前に起こったパナマ船籍タンカーダイヤモンドグレース号（147,012トン）の原油流出事故は、社会的に大きな衝撃であった。

海洋に流出した原油類への対策についても、各国で研究されている⁽⁸⁾。しかし、事故を未然に防ぐことにより、人間の生命を保護し、地球環境を守ることはより重要であり、海上交通の安全性を向上させることは、時代のニーズである。環境保護の点では、モーダルシフトも重要な政策であり、この点でも、新たな形式の船舶の参入が見込まれているので、そのような新形式船の航行安全性評価は欠くことができない。

1.1.4 航行援助施設の改善

海上交通において、航路を示す灯浮標や灯台等の航行援助施設は重要な役割を担っている。この航行援助施設は十分設置が行き渡っているが、いまだに、灯浮標の見間違いによる航路の誤認等に起因する海難事故が起こっている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

灯浮標の誤認による海難事故は、主として乗り揚げ事故であるが、1997年11月11日には、関門海峡の関門橋近くで、パナマ船籍エイジアン・ハイビスカス号（7,170トン）と中国船籍楚海号（2,387トン）による貨物船同士の衝突事故が起こり、乗組員が1人死亡、楚海号は沈没し、1998年7月になって引き揚げられた。直接の原因としては、灯浮標の誤認によるものではないが、航行実態と航路および航路を示す灯浮標が合致しないために起こった事故という見方もある。

現航路の規則に則れば、この事故は、操船者の規則違反により起こった事故ではあるが、海上交通の安全性向上のためには、航路の整備と航行援助施設のさらなる効果的な配置が求められているのは明らかである。

1.2 船舶航行の現状における問題点とその対応

1.2.1 高速船参入および航行援助施設の改善における問題点

高速船をはじめとする新たな形式の船舶が、従来型の船舶航行に参入する場合、それまで保たれていたある一定の安全性を損なうおそれがある。それは、しばしば、新規参入の船舶が、従来型の船舶とは、速度を含む操縦性能において能力差があるからである。よって、船舶の高速航行の安全性を事前に評価することは不可欠である。

航行援助施設を設置し、航路を整備するにあたっては、設置・管理する側だけでなく、利用する操船者の視点を盛り込むことが必要である。さもないと、前述した関門海峡での貨物船同士の衝突事故のように、操船者の実状と合致した整備をおこなっていない状況とも取られてしまう。そこで、使いやすく、より安全な航行に配慮した航路と航

行援助施設を実現するためには、操船者の視点からの評価が不可欠である。また、航路および航行援助施設による、航路の視認性の向上方策は、複数考えられるので、方策の比較検討を効率よくおこなう必要もある。

1.2.2 問題点への対応

コンピュータシミュレーション技術およびコンピュータグラフィックスの発達により、操船シミュレータが格段に進歩している。操船訓練や海域評価等において、実船実験でおこなえないもの、もしくは費用等の点で困難なものが、操船シミュレータで実施されるようになってきている。船舶航行の安全性評価においても、実海域での実船実験が不可能な状況では、事前評価の有効な手法となることが考えられる。操船シミュレータは、実海域実験では危険が伴い実行できない状況を含め、様々な状況を作り出し、実験および安全性評価をおこなうことができ、再現性にも優れている。また、開発中の船舶についても評価対象として扱えるという利点がある。そこで、高速船・新形式船参入後の海上交通の安全を確保するために、操船シミュレータを用いた、船舶の高速航行の安全性評価手法を確立する必要がある。

航行援助施設の整備や航路の視認性向上方策の検討においても、操船シミュレータは、有効なツールとなる可能性を持っている。従来からの鳥瞰図的な視点だけでなく、不可欠である操船者の視点にたつて、航行環境を含む状況の構築と評価がおこなえる。また、航行援助施設の設置工事の前に評価できるので、有効な方策を、コストパフォーマンス良く、比較検討できる。そこで、操船シミュレータ上で、航行援助施設を評価するための灯火の表現手法を開発する必要がある。

1.3 船舶航行の評価と操船シミュレータ

1.3.1 船舶航行の評価におけるシミュレータ手法

近年のコンピュータシミュレーション技術およびコンピュータグラフィックスの発達により、操船シミュレータは優れたツールとなってきた。船舶技術研究所でも操船シミュレータを用いて、様々な研究を進めてきた。特に、高速船の安全航行に関しては、早くから着手してきた。

前述した通り、船舶航行は、人間と船舶との人間-機械系システムであり、他船や航行援助施設が形成する航行環境の中に存在する。このようなシステムでは、そのぞれ、人間、船舶、航行援助施設等の要素のみの検討では不十分で、システム全体に対して、システムの利用者（この場合は熟練操船者）によるダイナミックな状態での実験が必要である⁽¹¹⁾。シミュレータは、このような実験を可能にするツールである⁽¹²⁾。

一方、操船シミュレータの歴史は、点光源方式やスライド方式から始まり 1976 年に CGI

方式のものが開発された。1980 年半ばになるとコンピュータの発達とともに CGI 方式のシミュレータが各国に設置された。最近では、コンピュータの計算性能とコンピュータグラフィックスの発達、低価格化で、シミュレータを設置する施設が増加している。今後ますます増加するであろう。

また、操船シミュレータの利用方法についても、総合的に議論されるようになってきた⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。操船シミュレータは、訓練⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾、海域評価⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾、操船評価⁽¹⁹⁾、ヒューマンファクター解析⁽²⁰⁾等、様々な目的で利用されているが、まだ一般的な方法については確立されておらず、現在、研究会等で議論されているところである。

そこで、船舶技術研究所では、シミュレータを用いた船舶航行の安全評価方法について検討し、実験対象ごとに、シミュレータの模擬の種類と精度を検討して、研究を進めてきた。操船シミュレータは、実海域を完全に模擬するには至っていない。しかし、これは必ずしも実現すべきことではなく、実験目的に合った実験環境や船舶の要素について、操船者が現実世界から取っている情報を欠落なく与え、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が、操船シミュレータにおいて実現すべきことである。また、場合によっては不足する部分があっても、被験者と意見交換することにより、補えるところが大きい。さらに、本節に前述した通り、人間の要素を調べるには、適したツールとして使用できる。実海域では困難な状況の設定、再現性に優れ、被験者へのインタビューやアンケートですぐに意見、評価を収集することが可能である。船舶技術研究所では、このような考えに則って、操船シミュレータを使用している。

全般に予備実験として、シミュレータで実現できている要素を評価した上で、本実験をおこなっている。個々については、各章の中で述べているが、従来型船舶と比べて、高速で、状況によっては危険が大きい、高速船の航行を検討するためには、実験に適合した環境要素等を作り出せる操船シミュレータを用いることが最適である。特に、テクノスーパーライナーのような開発中の船舶に対しては、時間的にも有効に操船シミュレータで実験を進めることができる。また、航行援助施設に対しても、光の振る舞いをコンピュータグラフィックスで表現する手法を開発したことにより、実海域や机上の検討からさらに効率のかつ有効な操船シミュレータを用いた検討をおこなうことができる。そして、繰り返しになるが、以上の実験対象は、操船者を主とする人間が強く関与しており、この人間の要素が強く関係したヒューマンマシンシステムの検討には、操船シミュレータが適切である。

1.3.2 航空分野におけるシミュレータ⁽²¹⁾

他分野におけるシミュレータの開発や利用状況としては、航空機の分野が最も盛んであり、シミュレータ設備そのものの技術や利用形態についても研究が進んでいる。そこで、飛行シミュレータの技術の動向、設備、訓練内容等について紹介する。

飛行シミュレータは歴史的には操縦訓練に利用されたのが始まりで、現在は研究開発用にも多く利用されている。飛行シミュレータは、飛行環境の模擬が訓練あるいは試験に大きな影響を与えるのでいかに実際に近い状況を作り上げるかが重要である。

視界模擬装置は操船シミュレータと同様、重要な部分である。パイロットにとってクリティカルな飛行フェーズは離着陸時である。このとき不可欠なものは操縦席から見る外部視界であり、飛行計器の情報とともに窓からの視界情報により、自分の機体の状態を判断する。シミュレータにおいてもこの状況を忠実に模擬することが重要で、外部視界としては、実際の地形とそっくり同じ視界映像の発生が望まれ、かつその表示も、実視界を見ているのと同様に各窓から見ることが望まれる。ここに多くの労力がそそがれ、電子技術の発達とともに、急速に進歩している。

飛行シミュレータの視界情報における画質の特徴としては、陸地から離れての飛行訓練等では、決まったコースを飛ぶ場合等、写真をデータとして利用するフォトマッピングの手法等が用いられる。また、気象効果を表現できる画像発生装置が実現されている。このような手法は、他の分野のシミュレータでも、必要に応じて取り入れられている。

一方、表示装置の方では、パイロットは窓から、10数mから数km以上の景色を見ており、光学系の鏡を利用した無限遠表示装置が用いられている。また、小型高速機の単座広視野用には、パンケーキウィンドウ表示装置、操縦訓練には、2人のパイロット用にワイドビジュアルシステムが利用される。さらに広い視野が要求される戦闘機、ヘリコプター等にはドーム型スクリーンが用いられる。また、ヘルメットマウントディスプレイを用いる手法もある。

データ作成においては、アメリカでデータフォーマットの規格化が進められており、各社間装置での汎用性があがることが期待されている。

飛行シミュレータでは、加速度をパイロットに与えることも重要とされ、そのような目的のためには、重力を加減速の加速度としてパイロットに認識させることが可能な動揺装置が備えられている。

操縦席部の特徴としては、訓練用は、実機にできるだけ合わせている。研究開発用は、新しい機体の設計に必要な計器、操作レバーが用意され、目的に応じて、操縦装置や計器盤を自由に変更できることが要求される。音響も重要で、エンジン音、風切り音、ヘリコプターのローターの回転音を電子音で模擬することが臨場感をあげる。

飛行シミュレータで特に訓練される項目として、雲や灯火、重力等の影響から起こるパイロット・バーディゴ（パイロットが操縦している航空機の姿勢、位置、運動状態を正しく認識できなくなる状態）がある。これを再現する模擬視界装置と動揺装置を具備したシミュレータが開発され、訓練に用いられている⁽²²⁾。

一方、各国ごとに、エアラインパイロットの訓練、試験に使用する飛行シミュレータの

性能・機能について検査法的に認定するための認定基準を国際統一する International Standards for the Qualification of Airplane Flight Simulators（通称 IQTC）が、ICAO（International Civil Aviation Organization）から 1995 年に正式に発行された⁽²³⁾。

訓練技法についても、従来は訓練の仕上げに実機で実施していた訓練項目もすべてシミュレータで実施し、実機訓練をなくそうという流れまでである⁽²⁴⁾。

航空機分野では、以上のような飛行シミュレータすなわち飛行機側の操縦シミュレータとともに、飛行場側の管制シミュレータも開発されている。管制シミュレータは、管制室の管制卓と、その窓からの飛行場の景観を再現している。この管制シミュレータを用いて、運航効率化に向けた管制方式等の研究がなされている⁽²⁵⁾。

1.3.3 船舶技術研究所の操船シミュレータの概要

船舶技術研究所の操船シミュレータの概要について述べる。

船舶技術研究所の操船シミュレータは、1991年に、高速船航行の安全性評価をおこなう目的で構築された。操船シミュレータは、高速船の運航において想定される全ての状況にわたり、安全性を確保するための検討がおこなえるものでなければならない。船舶技術研究所の操船シミュレータを構築するにあたっては、1990年頃から、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のシミュレータを調査している。シミュレータ技術の現状と研究目的から、船舶技術研究所の操船シミュレータが具備すべき機能要件を明らかにした⁽²⁶⁾。以下に、これらをふまえて構築した、操船シミュレータについて紹介する。

船舶技術研究所の操船シミュレータの全体構成図を図 1.2 に示す。操船シミュレータは、シミュレーション管理システム、景観画像表示システム、操船操作システムから成り、システム間の通信は、TCP/IP でおこなわれている。シミュレーション管理システムは、シミュレーションを統括し、時間管理や自船および他船の位置、運動計算等をおこなう。景観画像表示システムは、シミュレーション管理システムからのデータを基に、指定された視点（通常、自船のブリッジ）からの景観画像を作成し、プロジェクターでスクリーンに表示する。操船者は、操船操作システムの、操船卓やレーダ等を用いて操船作業をおこなう。

操船者は、景観画像表示システムから自船（操船者自身が操船している船舶）の状態、周りにいる他船の動向等の情報を得て判断し、操船操作システムに対して操船をおこなう。操船者からの操作入力によって船舶および環境が変化し、その航行状況の変化は景観画像表示システムによって再び提示され、操船者は提示された画像から再びその変化を捉える。その際、操船者は、主に視覚から情報を得ているが、その他提示される情報があれば、聴覚や前庭感覚でも捉えることができる。

シミュレータ管理システム

景観画像表示システム

操船操作システム

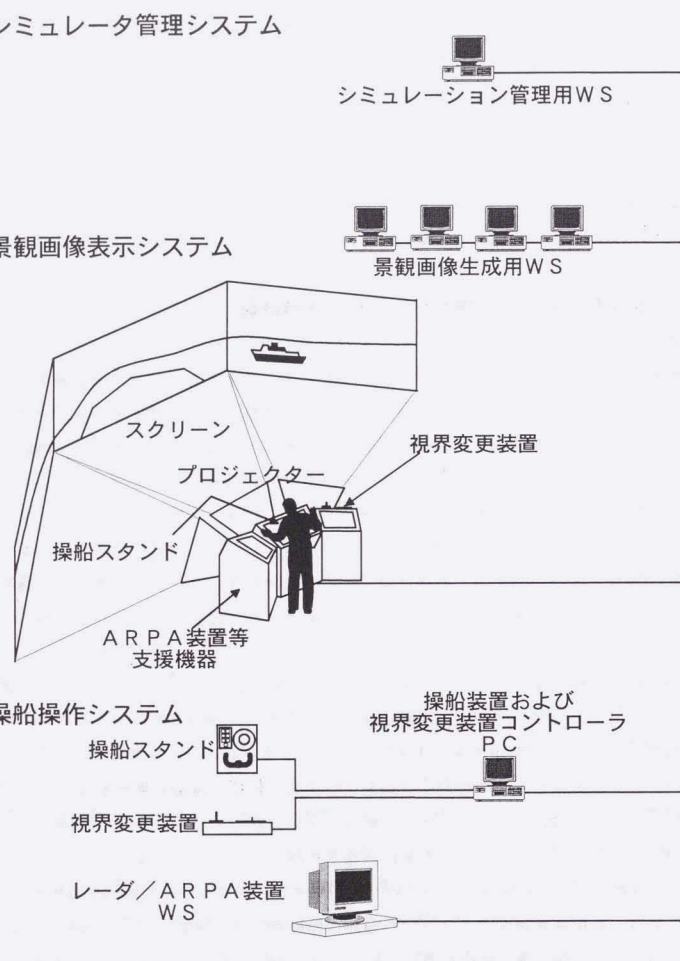


図1.2 操船シミュレータの構成図

1.3.3.1 シミュレーション管理システム

シミュレーション管理システムは、ワークステーション上で稼働しているが、これには第2章、第3章の実験時は、DEC社製VAX Station4000を、第4章、第5章の実験時はシリコングラフィックス社製Indyを使用している。あらかじめ作成したシナリオを基に、自船および他船を発生させ、シナリオまたは、操船者からの入力に基づいて、自船および他船の位置や運動計算をおこなう。

船体運動は、船種、船型の他、風、潮流といった自然環境、浅水、狭水といった地形環境によって大きく影響を受ける。そのため、船体運動を表現する数学モデルの研究が現在も盛んにおこなわれている。本操船シミュレータでは、船舶航行の安全評価シミュレーションの目的に応じた船体運動を表す数学モデルが使用可能でなくてはならない。表1.1に用意されている運動モデルを示す。操船シミュレータ以前にも知能化船のプロジェクトがおこなわれたため、高度知能化大型タンカーの港内航行シミュレーションを実施した際に用いた大型タンカーのMMGモデルが整備されている。しかし、本論文の一連の操船シミュレータ実験では、操縦運動モデルとして、応答モデルを用いている。その式を(1)式に示す。本論文では、ほとんどの場合、舵操作による避航操船のみが船体運動として着目される点であり、操船者が舵をきったときの旋回性能を実船と合わせる事が一番重要である。また、航過距離等のデータを用いて議論を展開しているが、それらの距離も、細かい数値が問題となるのではない(詳細は各章に譲る。)。よって、各実験では応答モデルを用い、実験前の慣熟運転の際に、被験者に意見を聞きながらモデルの修正をおこない、実船との整合性を取った。

$$T \cdot \frac{dr}{dt} + r = K \cdot \delta \quad \dots (1)$$

ここで、

K は操縦性指数 与えられた舵角に対する最終的な旋回角速度と舵角の比で旋回性の指数
 T は操縦性指数 慣性力と水抵抗の比で、操舵に対する追従性の指数
 r は旋回角速度、 δ は舵角を示す。

操縦性指数 K, T の値は、船舶の大きさ、排水状態、船型、舵角、速力、水深等により異なる。これらの値は、旋回・操縦性試験により船舶および条件ごとに求められる。 K, T の無次元化は、次の(2)式でおこなう。

$$\begin{aligned} \text{無次元値 } K &= K \cdot (L/V) \\ \text{無次元値 } T &= T \cdot (V/L) \quad \dots (2) \end{aligned}$$

ここで、 L は船長(m)、 V は船速(m/s)を示す。

一方、本論文で用いた、自船以外の交通流を形成している各船舶は、主として、船ごとに予め設定されたウェイポイントを航行するというモデルである。操船シミュレータ実験

に用いた、一般船の形成する交通流は、すべて、実態調査等に基づいた意味のあるものであり、一般船同士は衝突しないように、通過点・変針点および通過時刻については細かく設定している。また、交通流の中を航行する自船である高速船は、45ノットから50ノットであり、一般船は12ノットから13ノットと速度差が大きいため、一般船からの避航動作による自船である高速船への影響はごく少ないと判断した。よって、交通流としての本モデルは、本論文の実験に使用するにおいて問題ないと考えている。しかし、実験によっては、一般船、高速船を問わず、他船・自船双方の操船行動が相互に影響を受けるケースもあるので、他船を操船できる操船操作システムのみを別システムを整備し、実験に用いた実績がある。

船体運動に影響する自然環境も、必要な精度で表現できるモデルを持ち、シミュレーションの目的ごとに要求される精度に応じることが必要である。表1.1に示すように、環境モデルを基に実現している。交通環境である他船の交通流の生成もシミュレーション管理システムでおこなう。環境モデルについても、各実験ごとに考慮する項目や用いるモデルが違うので、あとの章でそのつど、各実験ごとに述べる。

表1.1 操船シミュレータの要目

船舶モデル	運動モデル	KTモデル、MMGモデル	
	船種	ジェットフォイル、カタマラン型高速船、自動車運搬船、タンカー、バルクキャリア、コンテナ船、漁船、タグボート	
	計算サイクル	0.2秒以下	
	操船装置	2台	
環境モデル	支援装置	レーダ/ARPA、ECDIS付きINS、音声入出力装置	
	交通	同時航行船舶最大数	VAXStation4000ホストコンピュータ時 100隻 Indyホストコンピュータ時 700隻(実績値)
		航行方法	一部: KTモデル、MMGモデル その他: 船毎に予め設定された航路上を航行
		海図著目標	灯浮標、灯台、導灯等
	自然	風	実測データに基づき対象海域を矩形に分割し設定等
		海流	実測データに基づき対象海域をメッシュに分割し設定等
		その他	昼夜の表現、霧の模擬(視程の制限)
対象海域		東京湾、来島海峡、関門海峡、音戸瀬戸	
景観画像	画像更新速度	最大30回/秒	
	表示船舶最大数	環境モデルで扱っている同時航行船舶数	
	表示船種	船舶モデルで扱っている船種	
	表示地形	環境モデルの対象海域	
	表示海図著目標	環境モデルの対象海図著目標	
	その他	バンクの表現、視点・視線・視野の変更	

1.3.3.2 景観画像表示システム

景観画像表示システムは、画像を生成するワークステーションと、画像を操船者に表示するプロジェクターとスクリーンから成る。画像生成用のワークステーションおよびアプリケーションは、シミュレータにおいて、最も特徴のある部分といえる。船舶においても、操船者は、景観から操船に必要な情報を得ているので、操船シミュレータでも、それに不可欠なものが操船者に提供される必要がある。この景観画像に、特に要求される機能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であり、また、連続した画像を得るために、1秒間に16画面以上のでき得るかぎり高速な描画速度が実現できることである。

景観画像表示システムは、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必要がある。

景観画像表示システムで表現すべき主な操船情報と、ミュレーションで実現する際の考慮点については、以下のように検討した。

①航行船舶の表現

操船者は、衝突回避等のため、他船の向き・船種・船速等を把握しようと努力している。シミュレーションでも、それらの情報を得るために操船者が使用している情報を実海域と同程度詳細に表現しなければならぬ。さらに、輻輳海域では、同時に考慮すべき船舶が多数あるため、シミュレーションで表現できる航行船舶の数はそれと同程度であるべきである。また、操船者は、遠くの船舶の情報を捉えるために、時折双眼鏡を用いるが、シミュレーションでも、これと同様のことを可能とすることが必要である。

②目に見える物体の動きのスムーズさ

調査したリアルタイムシミュレータの画像更新速度は、大半が毎秒30~60回であり、景観画像内の物体の位置変化は、実際と同様にスムーズに見えた。それらのうちドライビングシミュレータでは秒30回であったが、高速道路を走行する自動車と同程度の速度で航行する高速船のシミュレーションでは、この値を参考にできると思われる。

③視野

1.3.2節の航空分野におけるシミュレータのところでも、シミュレータに用いられている様々な表示装置についてふれた。船舶の分野でも、軍関連や潜水艦のシミュレータにおける表示装置で、ヘッドマウントディスプレイやバーチャルリアリティ技術を用いたシステムが検討されるようになった⁽²⁷⁾。しかし、通常の操船シミュレータにおいては、操船操作システム(ブリッジ)を囲むような形に大型スクリーンを円弧上に配置し、そこに画像を表示するシステムが一般的である。

操船シミュレータにおいて、景観画像の視野は広い程良く、現存する操船シミュレータでは、水平方向240度以上をカバーするものが大半である。高速航行用のシミュレータに

おいてもそれらと同程度の視野を確保することが望ましい。

④自船のスピード感

自船の近くに物体がない場合、自船のスピード感をもたらすのは、海面の動きである。実海面には、通常、波が立っていて波模様を形成しているため、自船の航行に伴うスピード感をもたらしている。シミュレーションでも波模様の模様がスピード感の現出に有効である。また、波模様は、現実の海面を航行しているという感覚を生じさせるにも有効である。

景観画像表示システムには、第2章の実験時には、シリコングラフィックス社製のIRIS40/GTを2台、3020を1台用いている。第3章から第5章の実験時には、アプリケーション込みで米国BALL社製の944システムを使用している。

IRIS40/GTでは、表示できる最大船舶数が100隻であるが、画像更新速度は最大でも秒5回であった。テキストチャマッピング、霧の設定はできない。

944システムは、幅狭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、また、臨場感を現出するためのテキストチャマッピング、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。また、100隻同時に航行している状態で、海面模様のテキストチャを貼り、かつ霧をかけて、平均30枚/秒の画像更新速度を達成できる。

944システムの画像の表現機能の概要を次に示す。

- ①画像データベースの総量 30,000ポリゴン以上
- ②画像描画速度：(テキストチャ付きポリゴン) 80,000/秒(可視ポリゴン 2,500で秒30枚以上)
- ③画像更新速度をある値以下にならないようにするための、オブジェクトに詳細度の定義(Level of Detail)が可能
- ④テキストチャによる海面模様の作成が可能
- ⑤霧の模様が可能
- ⑥夜間の光の模擬における1側面(大きさとして1ピクセル以上と、設定された明るさを維持)の実現が可能

また、944システムは、コンソール用のCRTと、画像出力用のCRTが別になっており、プログラムおよび画像データベースの作成、プログラムの実行時のモニター等がやりやすくなっている。

一方、スクリーンは、100インチスクリーンが3面で、水平方向の視野が90度、垂直方向の視野が24度である。広範囲の視野を確保するために、左右に視線を向ける機能(視線変更装置)と、180度の視野範囲を90度に圧縮して表現する機能(視野変更装置)、双眼鏡の代わりに、30度の視野範囲を90度に拡大して表示する機能(視野変更装置)を実現し

ている。

船体運動に伴う船体の動揺を操船者に感じさせることにより、実際の操船感覚に近づけることができる。操船シミュレータ自身を動揺させて前庭感覚に訴えることができなくても、大画面のスクリーンで水平線を変動させれば、体が動揺している錯覚をおこすことが可能である。船舶技術研究所の操船シミュレータでは、動揺装置がないため、シミュレータ自身の動揺は実現されていないが、ジェットフォイル用に海面を傾ける手法を用いている。

1.3.3.3 操船操作システム

景観画像表示システムからプロジェクターによりスクリーンに投影された景観画像と操船操作システムの計器やレーダ/ARPA(Automatic Radar Plotting Aids)から、操船情報が提示される。操船者は、これらの情報を得ながら、操船卓(もしくは操船スタンド)の操舵装置(ホイール、ヘルム)、変速装置(テレグラフ:機関制御レバー、スイッチ)を操作することにより、操船操作をおこなう。

実際の海域で実船を操船している感覚で、操船シミュレータを操船できることが望ましいので、実船と同じブリッジのモックアップを作成できれば一番よい。しかし、それが不可能な場合でも、少なくとも、操船装置として十分な入力装置、レーダ等の操船支援装置および他船の見える方向の角度変化を確認するために基準となるコンパス等が必要である。

船舶技術研究所の操船シミュレータでは、写真1.1から写真1.4が示すような操船操作システムを作成している。第2章、第3章の実験時は、写真1.1、第4章、第5章の実験時は写真1.3のシステムを使用している。

前期のシステムは、写真1.1が示すように、中央が操船卓で、ヘルムとその左に機関制御レバーがあり、操船卓の上には、中央にコンパス、左に視線変更装置(レバー)、右に視野変更装置(ジョイスティック)が配置されている。操船卓の左には、ワークステーション上でレーダ/ARPA表示画面を実現し、右はPC上に計器表示をおこなっている。操船操作システムの前方に、スクリーンに表示されている景観画像が見える。

後期のシステムでは、写真1.2が示すように、ブリッジのモックアップ整備され、ブリッジの窓から景観を観測するという点で臨場感が増している。操船シミュレータのブリッジ内を示す写真1.3では、中央に、既存の操船スタンド、左側には、レーダ/ARPA装置を模擬したワークステーションが配置されている。このブリッジには、必要に応じて、他の操船支援装置あるいはその模擬装置を設置できる。写真1.4には、ワークステーション上に暗視装置を模擬した画面を示す。



写真 1.1 前期操船操作システム



写真 1.2 後期ブリッジのモックアップからの景観画像



写真 1.3 後期操船操作システム

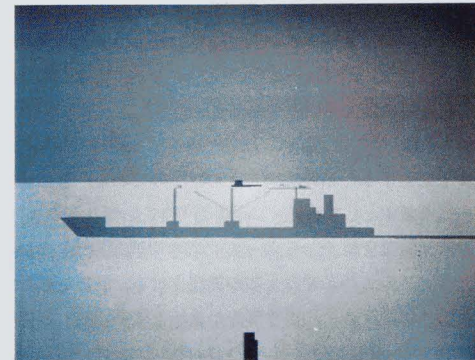


写真 1.4 暗視装置模擬画像

1.4 海上交通ルールと交通管制 (28)(29)(30)(31)

1.4.1 海上交通ルールに関する現在の法規

日本の船舶交通の安全を確保するための法規としては、基本的な海上交通ルールを定めた海上衝突予防法、海上交通安全法、港則法および関係法令が制定されている。これらの3つの法規は、まとめて海上交通三法とも呼ばれている。海上衝突予防法、海上交通安全法、港則法の順に、適用される海域が狭められ、特定されていくため、法規の適用としても、特別法令順であるこの順番で優先順位が高くなる。この他、湖沼、河川等個別の水域について交通ルールを規定した条例もあり、これらについても特別法令順に優先適用される。

海上交通三法の各法規について、概要および特徴を以下に述べる。

海上衝突予防法は、現在の法規が、1977年に制定され、1983年に一部改正された。この法規は、ロンドンで開催された国際会議で採択された「1972年海上衝突予防のための国際規則に関する条約」に添付されている規則に準拠して、船舶の遵守すべき航法、表示すべき灯火等に関して必要な事項を定めており、これにより、海上における船舶の衝突を予防し、船舶交通の安全を図ることを目的としている。適用水域は、海洋とそこから連続して航行できる港湾、河川に至るまで含まれている。

一番基本的には、船舶は、航行中に、他の船舶と衝突のおそれがあるかどうかを判断するため、すべての手段（目視、レーダ、通信手段）を用いなければならない。また、衝突を避けるための動作としての3要件は、①十分に余裕のある時期に（早期動作）、②船舶の運用上適切な慣行に従い（基本的に、他船を右に見る船舶が避航動作を取る）、③ためらわずに動作を取る（他船によくわかるよう大角度変針）こととなっている。大角度変針の有用性については、本論文の第4章でも議論している。

船舶の灯火については、船影がまったく見えない夜間や狭視界においても、船舶の針路や行動をできるだけ見やすく示すことができるよう、灯火の表示形式や種類、視認距離が条文で決められている。第5章で開発したコンピュータシミュレーションによる灯火の表現手法は、このような船舶の灯火についても表現可能である。

海上交通安全法は、1973年に施工され、船舶が輻輳する海域の特別の交通方法を定めるとともに、その危険を防止するための規制を定めたものである。適用海域としては、東京湾、伊勢湾、瀬戸内海を対象としている。

主として、航路と巨大船（全長200m以上）における航行方法について規定しており、原則的には航路を航行している船舶や巨大船が優先される。航路を航行している船舶と、それ以外の船舶（航路への出入り、横切り等しようとする船舶）が衝突するおそれのある見合い関係になったとき、航路を航行している船舶が、針路保持船となり、それ以外の船舶が避航操船をおこなって衝突を回避しなくてはならない。

また、本法適用海域の各航路について、個別の航法を定めている。例えば、航路を中央

線で分離した分離航行の実施（東京湾浦賀水道等）や、強潮流に対処するため、潮流の方向に対応した航行経路の変更（瀬戸内海来島海峡）が、特徴的なものである。

海域の中でも、港は、さらに船舶が集まってきて、輻輳した海域となりやすい。よって、さらなる船舶交通の安全と港内の整頓を図ることを目的に、港則法が制定されている。現在の法規は、1948年に制定され、1995年に改定されたものである。この法規を適用する港および区域は政令で定められており、わけても大型船や外国船の出入港があり、船舶入出港数も多い港域が、特に規制が必要な特定港として定義されている。この特定港は、1998年現在、86港で、その中でも、さらに船舶交通が著しく混雑する等により、命令により定められた7大特定港が規定されている。本論文第5章の灯火のシミュレーションを実施した関門港は、この7大特定港のひとつであるとともに、著名な航行困難海域として知られる。

港則法では、各港ごとに、命令で定められた航路を原則として航行すること、その航行方法も、航路のどちら側を通るか、どちらの方向から港に入るか等が決められている。

1.4.2 現在の交通管制

船舶交通が輻輳している海域では、船舶の衝突を予防し安全な航行の確保のため、海上保安庁により、交通管制をはじめとする各種航行安全対策のいっそうの推進が図られている。海上交通に関する情報提供と航行管制を一元的におこなうシステムとして、海上交通情報機構が、東京湾（観音崎の東京湾海上交通センター）、瀬戸内海（備讃海域の備讃瀬戸海上交通センター、関門海域の関門海峡海上交通センター、大阪湾の大阪湾海上交通センター、来島海域の来島海峡海上交通センター）、名古屋港（名古屋港海上交通センター）に設置され、この他にも、京浜港、千葉港、洞海湾地区に、港内交通管制室および船舶通航信号所が設置されて、港内交通管制をおこなっている。

管制の内容は、主として、海上交通安全法および港則法に基づいた航行方法を対象船舶が取ることを促すものであり、それらに必要な情報提供も通信手段や、電光掲示板等で行われている。

1.4.3 海上交通ルールおよび交通管制の変化

現在施工されている海上衝突予防法（海上交通三法中、最も基本的な法規）は、超大型船、コンテナ船、エアークッション艇等従来とは異なったタイプの船舶が出現したこと、レーダ等の航海計器の発達により操船方法が変化したことにより、旧海上衝突予防法（日本では1953年に制定）では対処できず、その改正の必要性から1972年に制定されたものである。よって、超高速船やテクノスーパライナー等の新形式船が出現してくれば、やはり海上衝突予防法の改定等の変化がおこることは十分に考えられることで、このあと述

べる AIS との関連も含めて、IMO の場でも、議題として登場しようとしている（1999 年 10 月時点）。

現在でも、大阪湾をはじめとする各所で、高速船と一般船との遭遇が頻繁になってきている。高速船は、現行の海上衝突予防法等の規定にない「先行避航」という新たな概念で慣行として「先行避航」を実施しているものと考えられる。そして、これらの高速船と遭遇している一般船操船者からは、航法についての法規改正が必要という意見も出てきている⁽³²⁾。

また、一般的に、近年、搭載エンジンの向上による操縦性能の向上は著しいものがあり、旧海上衝突予防法（1972 年以前）では視界制限時に「moderate speed」とされていたものが 1972 年の改正では「safe speed」として各船舶の操縦性能に応じた船速での航行が許される等の規則の緩和も見られている。交通ルールの変化の方向を示すものといえよう。

一方、IMO において、飛行機と同様のトランスポンダによる船舶自動認識システム（AIS）の導入がなされており、これにより他船の情報がいろいろな形で航行中の船舶に提供されるようになると期待されている。現在における船舶の情報は、自船に関しては、GPS 等の高性能センサや電子海図の利用により、質・量とも高い水準のものが得られるようになった。しかし、他船の情報に関しては、最も有用とされているレーダ/ARPA でも、誤差や誤認があり、信頼性がそれほど高くないという現状である。しかし、この AIS が実現すれば、他船の的確な情報を得ることができ、各船舶内での利用はもとより、海上交通センター等の一元管理によって、効果的かつ安全な交通管制が実施でき、海上交通の安全性向上が期待できる。しかし、情報伝達の誤り等、依然として残り得る問題も指摘されている。現在、この AIS は、各国が独自の仕様を提案している段階で、航行支援システム等への利用を考慮した仕様および利用法は、今後の検討課題となっている。

船舶技術研究所でも、検討を進めており、AIS の情報の内容としては、航行規制・管制状況、自船目的海域内の他船・障害物の状況、入出港に航行する航路名、自船周辺船舶の進行関連意図等が優先的に必要と考えている。さらに、ブリッジにて支援装置に表示されるときに表示形式についても検討内容としている。このような新しい情報支援内容や表示形式の評価には、本論文の第 3 章で実施した操船支援効果の評価手法を有効に用いることができる。

2 高速船安全航行のための安全性評価

2.1 緒言

船舶交通の発展に伴って、船舶の輻輳度が増すとともに高速航行する船舶が増大しつつあり、航路設計や航行管制並びに各種の航行支援システムの導入による一層の安全性向上が必要となっている。

海上交通において、ある見合い関係が生じたときに、結果的に衝突を回避できたとしても、一概に安全であるとはいえない。すなわち、衝突を回避したという結果だけでなく、これに至る過程において現れては来なかったが潜在している危険（潜在的危険）をも排除できていたかどうかで、安全を評価する必要がある。潜在的危険は、操船中に、起こり得る可能性のある状況の変化が起こったと仮定したときに生ずる危険のことをいう。詳細は、2.2.1 節で述べる。このような潜在的危険は、従来型船舶同士で海上交通を形成していたときには、避航操船を含む操船能力が同程度なので、あまり問題にされてこなかった。しかし、高速船が参入し、能力差により見合い関係が従来とは変わってくると、潜在的危険を考慮した安全性評価が必要になってくる。

本章では、潜在的危険を考慮した安全性評価手法を考案するとともに、輻輳海域を航行する高速船の安全性評価への適用例を示す。さらに、発展的手法として、高速船との遭遇において一般船の操船者の感じる脅威を、潜在的危険を考慮した航行の安全を評価する一般船側からの指標として用いることを検討し、その有用性を示す。

2.2 船舶航行の安全

2.2.1 船舶航行の安全の考え方

船舶航行は、図 2.1 に示すように、操船者、船舶、環境から成り立っている。操船者は、航行中、環境と船舶から情報収集し、その状況を把握し、危険な見合い関係の場合には衝突危険性を判断、適切な操船行動計画を決定、その決定に従った操船行動を実行し、船舶と環境に操作を及ぼすという一連の行動によって、危険の回避をおこなっており、海域の安全確保には操船者が重要な役割を果たしている。一方、操船者、船舶、環境それぞれの要素に、起こり得る様々な状況の変化が考えられ、その変化が起こると想定したとき危険が発生する場合がある。この想定する状況の変化を「外乱」と呼び、外乱を想定したときに生ずる危険を「潜在的危険」という。潜在的危険を排除するためには、このような仮想的な潜在的危険に対して、操船者の適切な行動によって、回避できる方策を持っていることが必要である。

潜在的危険を衝突の危険に限定すれば、各要素の状態量における考え得る状況の変化のうちで衝突危険があるものについて、操船者が、この衝突危険を回避するのに十分な時間

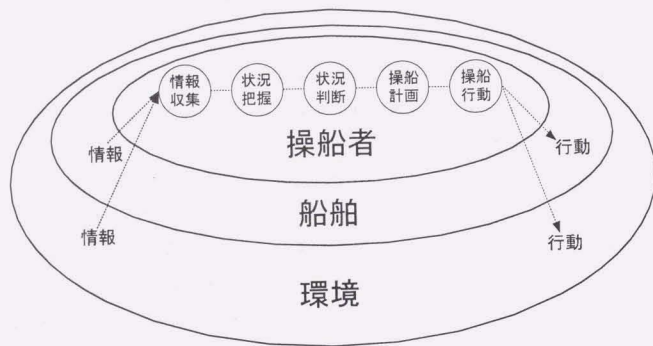


図2.1 船舶航行の概念図

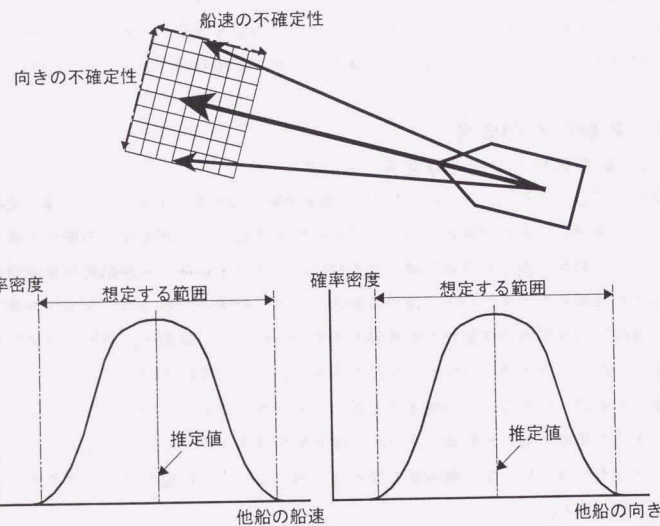


図2.2 系の状態量の不確定性と外乱の想定範囲

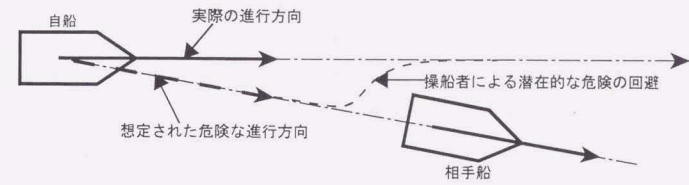


図2.3 潜在的危険の顕在化とその範囲

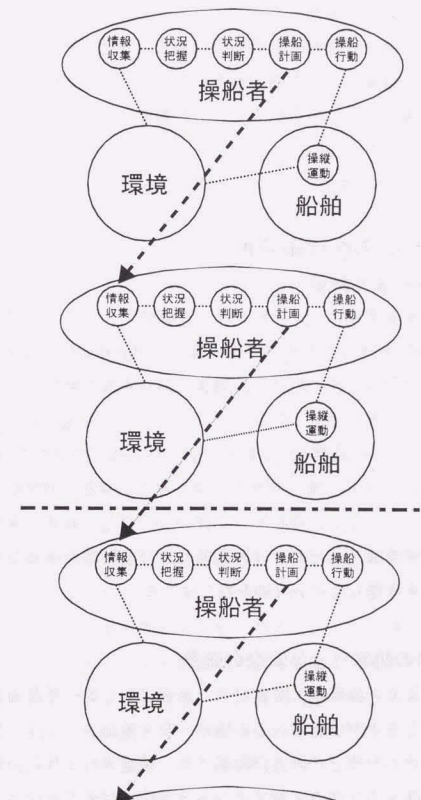


図2.4 潜在的危険を考慮した避航過程のモデル化

や距離等が担保されているかどうかで、これらの外乱に対する安全性を評価できる。一般に、船舶の輻輳した海域や狭水道等では、航過距離が必然的に小さくなるため、当直体制等監視を強化して衝突の潜在的危険の回避を考慮していると考えられることができる。

上記に定義した外乱を考慮した上での時間や距離等を「安全余裕」と呼び、潜在的危険を考慮した航行の安全評価指標として提案する。

2.2.2 想定される外乱

どのような外乱を想定する必要があるかを検討する。外乱は、系の状態の不確定性と対応して想定することができる。一般に、系の状態量、例えば、他船の速度ベクトル、すなわち、船速や向きは操船者による推定値を中心にして、図 2.2 のように、それぞれ推定誤差を考慮した確率密度分布で表現できるものとする。この確率分布の広がり、他船との距離、視程等の自然環境、熟練度等の操船者の能力、輻輳度等の交通環境に影響されるため、正確な確率分布を得ることは困難である。そこで、過去の統計や事例調査等から適当な区間を想定して、これを外乱の範囲とし、この範囲内での潜在的危険を考慮して、航行安全を評価することとする。

実際の適用例を、2.5 節で示す。

2.3 船舶航行の安全性評価手法

2.3.1 潜在的危険による評価

潜在的危険による安全評価は、仮に顕在化した場合にこれを十分に回避できるかどうかで評価できる。例えば、図 2.3 のように自船の進行方向の外乱によって衝突の危険のある見合い関係が存在する場合は、その時点から通常の避航過程を開始して、この危険を回避できるか否かがわかれば評価が可能である。

避航過程を図 2.4 のような階層的な操船ループとしてモデル化する。状況の変化が生じるとこれに対応するために 1 つ下位の操船ループに移り、新たに情報収集から始まる操船者の作業が開始されることになる。そして、下位のループでの処理を実施した結果、最終的な航過距離の確保に至るまで、どれだけ時間的および空間的な余裕があるかを求めることにより、潜在的危険を考慮した安全評価をおこなえる。

2.3.2 潜在的危険の排除による安全の確保

船舶航行における安全の確保は、想定された外乱に対して、潜在的危険が排除されているかどうかで評価することができる。この場合、安全性のレベルは、想定される外乱の範囲と潜在的危険の排除の程度との両方が関係する。想定される外乱の範囲を確率的に評価することによって、従来のリスクアセスメントと対応づけることができる。想定される危

険とその回避は図 2.4 のように階層的に無限に続いていると考えられる。どの階層まで考慮するかは確率的な評価によって決定でき、実際にはほとんどの場合、破線より上の 2 階層のみを考慮し、危険回避行動中にもう 1 階層の潜在的危険回避を考慮すれば十分であろう。

海上交通法規の遵守、分離航行等の管制および船舶間の通信等によって、操船者による他船状態量の推定値の不確定性は減少し、操船者の訓練等によって操船者自身の不確定性が減少すると考えることができるので、これらは想定する外乱の範囲を狭める意味で潜在的危険の排除に役立っていると考えられる。

2.3.3 避航限界との対応

船舶の遭遇における潜在的危険の有無を評価する場合には、操縦性能、想定すべき外乱や操船者の回避能力等が複雑に絡み合っており、単なる時間や距離だけでなく、見合い関係等を含めて総合的に安全余裕を導出する必要がある。今津らによる「避航限界」⁽³³⁾⁽³⁴⁾（避航する側の船舶のみの避航行動で、かろうじて相手船すなわち避航される側の船舶を避けることができる避航開始時点での相手船の位置を示す範囲）は、避航計画時において、自船から見た相手船の向きや船速の不確定さを外乱とし、操船者の衝突危険回避能力の評価を単純化するために、回避行動を右 30 度変針（または、左 30 度変針）に限定して、自船の周りでの安全余裕がゼロの点を結んだ線であり、距離としての安全余裕の限界線を求めたものと考えられることができる。

しかし、航行のどの局面からも潜在的危険を排除するためには、結果としての航過距離の確保だけでは不十分であり、2.3.1 節で述べたように全ての避航操船過程においても十分な安全余裕が必要であり、避航計画はこれを考慮して立てる必要がある。

2.3.4 高速船航行への適用

特に、高速船の航行における高速船と一般船との遭遇における安全性の評価においては、高速船側が積極的に避航行動を取ることを想定すると、操船者が状況を把握して、操船行動を実行するのに要する時間（以後、「危険回避所要時間」という）よりも最接近までの時間が十分長いことが安全を担保するために重要である。船舶の輻輳する海域での航行等においては、船舶間の距離は必然的に小さくなるため、操船者は監視を強化し集中力を高めることによって、操船者に関する処理時間を短くするとともに、適当に船速を落とすことによって最接近時間を長くして、余裕を担保していく方策が考えられる。また、危険回避所要時間と接近速度を乗じて得られる距離以上に離隔距離を保つことによって安全を確保する方策もある。よって、この距離としての安全余裕を確保できているかどうかで航行の安全評価をおこなえる。

2.4 シミュレータ実験

具体的に船舶技術研究所でおこなった高速船の航行シミュレータ実験結果に、潜在的危険を考慮した安全余裕による評価手法を適用する。

2.4.1 シミュレータ実験の概要

場面として東京湾を設定し、高速船の操船シミュレータ実験をおこなった。高速船は、ジェットフォイルであり、操船者は、現役のジェットフォイル操船者である。交通流は、東京湾の実測データに基づく航行シミュレーション⁽³⁵⁾により生成したものをを用いた。この実測データおよび航行シミュレーションは、第二港湾建設局による「東京空港沖合展開計画予測交通量調査」を参考にして、参考文献 35 の作業の中で実施されたものである。

解析の対象とした実験は、東京から羽田に向かうシナリオであり、このルート上を他船が交通流として 50 数隻航行しているというかなり混雑した海域設定となっている。また、自船はこの交通流の直前に発生するため、これを迂回する余裕はなく、周りの船を順次避航していかななくてはならない状況からスタートする。

実験は 2 人 1 組でおこない、1 人が、ヘルムと機関制御レバーを操作し、もう 1 人が、操船者の隣で、レーダ等を見て、操船の補助をする形で実施した。操船者に対して、目的地の灯浮標の間を通過することを目標とし、それまでは、各自最善と考えられる方法で操船しよう指示した。

自船状態としては、船速、船首方位のそれぞれ指示値と現在値が表示され、さらに舵角と回頭角速度の現在値も表示される。レーダ模擬装置では、4 秒に 1 回の更新レートで、自船の周りの近いものから、最大 20 隻まで表示されている。レンジは、1.5 海里、3.0 海里、6.0 海里であり、North-Up/Head-Up、絶対速度/相対速度の、それぞれの表示切り替えがシミュレータ実験中に可能である。各シミュレータ実験の際の目標灯浮標も、レーダ画面上で他船と別の色で表示している。シミュレータ実験に使用したジェットフォイルの操縦運動モデルは、既存のジェットフォイルのモデルを用い、旋回性能は、最大船速、最大舵角時に、6.2 度/秒であり、データは川崎重工業（株）から提供していただいた。

なお、被験者が操舵感覚、距離感覚について習熟するため、各被験者ごとに実験の前に 30 分程度の慣熟運転をおこなっている。

慣熟運転時のコメントでは、シミュレータの操縦運動モデルについては、実船のジェットフォイルとよく合っているという評価を得ている。また、シミュレータ画像については、他船の向きが不明瞭な点と、視野変更機器で補ってはいないものの通常状態で視野が不足している点を指摘された。しかし、慣熟運転の結果、シミュレータ実験をおこなう上では問題がないとの状態で本実験を実施した。

2.4.2 シミュレータ実験の結果

実験結果として、図 2.5 に絶対航跡図、図 2.6 に相対航跡図を示す。図 2.5 は、東京湾羽田沖の 16km×16km の海域を示しており、太線は自船である高速船の航跡であり、各航跡中の○印は 1 分間隔の位置を示す。図 2.6 は自船を中心とした約 800m×800m の相対航跡図である。

船速は、終始、ほぼ 45 ノット。被験者の判断では、適切な操船をおこなったとしている。相対航跡図からも、衝突、ニアミスはなかったことがわかる。

2.5 評価の実施による考察

図 2.5、図 2.6 について、航行中に外乱が発生した場合の潜在的危険を回避できるかどうかを解析してみる。

ここで、簡単のために外乱としては、致命的な機器の故障ではなく、漂流物との接触や操船者のミス等により、結果的に進行方向が左右 30 度以内で変化することを想定する。また、外乱は重複して起こらないと仮定する。また、回避すべき危険は他船との衝突に限定する。

これらの仮定の基に発生する危険を、図 2.4 に示す情報収集、状況把握、状況判断、操船計画、操船行動から成る一連の回避処理で、回避するための余裕があるかどうかを考える。

高速船の操船においては、時間的な評価が重要であると考えられるが、操船者が環境から直接得ることのできる情報は距離であるので、シミュレータ実験の 1 ケースについて、図 2.7 のように自船の進行方向から左右 30 度以内の範囲内のみを考慮するものとして、他船との最小離隔距離（図 2.7 中の□印と自船との距離）の出現頻度分布を 50m ごとにまとめたものが図 2.8 である。自船の船速 45 ノットを接近速度の代表値として距離を時間に換算したスケールを横軸の下部に併記する。

操船者による危険回避所要時間は今後の操船者の処理能力の調査を基に推定しなければならない。本論文では、評価手順を示すために危険回避所要時間を 5 秒と仮定して話を進めることとする。接近速度は自船船速 45 ノットを代表値として採用すると、1 つの危険を回避する間に、約 120m、自船は進むことになる。この距離は、危険回避処理に必要な最小の距離と考えることができる。

この位置を図 2.8 中に、点線で示す。この位置と最小離隔距離までの太い実線の距離が、危険回避所要時間 5 秒を仮定した、距離としての安全余裕と考えることができる。

逆に、これだけの安全余裕を確保しながら航行するには、先に仮定したように 5 秒以内に、危険回避処理をおこなわなくてはならないことになる。1 人の操船者で危険回避処理が間に合わない場合は、見張りの人数を増やしたり、支援装置を使って、情報収集、状況把握等にかかる時間を短くして結果として危険回避所要時間を 5 秒以内に収める必要がある。

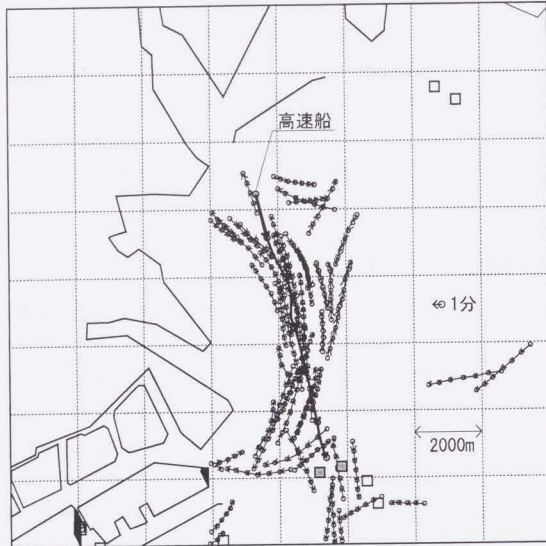


図2.5 高速船航行シミュレータ実験結果
絶対航跡図

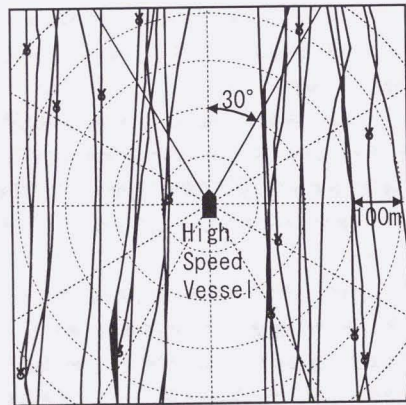


図2.6 高速船航行シミュレータ実験結果
相対航跡図

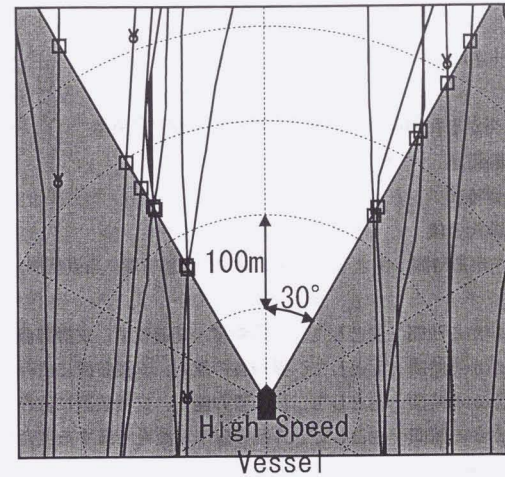


図2.7 相対航跡図 (自船進行方向左右30度)

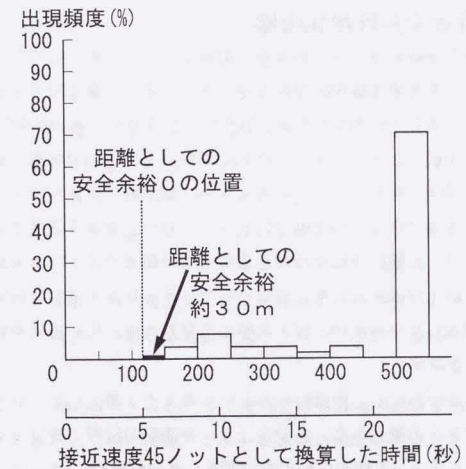


図2.8 高速船航行シミュレータ実験結果解析例

以上を簡単な式で表わすと次の(3)式ようになる。

$$M_l = L_b - T_a \cdot V_r$$
$$T_a = T_i + T_u + T_d + T_p + T_e \quad \dots (3)$$

ここで、

M_l は他船との衝突が潜在的危険の場合の距離としての安全余裕

L_b は他船との離隔距離

T_a は危険回避所要時間

V_r は自船の船速の代表値

T_i は情報収集にかかる時間 主として、自然環境、交通環境、当直体制、支援装置に依存

T_u は状況把握にかかる時間 主として、自然環境、交通環境、支援装置に依存

T_d は状況判断にかかる時間 主として、操船者の能力、支援装置に依存

T_p は操船計画にかかる時間 主として、操船者の能力、支援装置に依存

T_e は操船行動にかかる時間 主として、外乱の確率密度を考慮する度合いに依存である。

実際に、潜在的危険を評価するためには、想定する外乱の範囲を明確にするとともに、操船者の情報収集、判断、操船計画作成等の処理能力に関するデータを採取して、危険回避所要時間を推定する必要がある。

2.6 船舶航行の安全性評価指標

以上、海上交通全体の安全とは、結果的に衝突を回避できたかどうかではなく、衝突回避の過程において、潜在的危険が顕在化したときに、その危険を回避できるかどうかで評価されるべきものであるという考えを示してきた。この考え方を、安全性評価手法として、東京湾羽田-東京間のジェットフォイルによる操船シミュレータ実験へ適用したが、限定された仮定の元に評価したもので、この適用した一例から、東京湾羽田-東京間のジェットフォイル運航が安全であるとの評価には至っていない。全体を網羅するシナリオを作成し、実験をおこない、危険回避処理時間を意味ある操船者グループから求めてから手法を適用すれば、評価結果が求められる。ジェットフォイルによる東京湾羽田-東京間の航行の安全性評価は実施しなかったが、以上の手法を発展させ、他の海域や船種に適用した。以下に、その概略を示す。

避航操船作業をモデル化し、作業レベルという考え方を導入して、安全余裕があるほど作業レベルが上がるとの観点から、各シミュレータ実験の航行の安全性を評価する。避航操船作業中に、レベル1(自船の安全のみを考慮した避航操船)、レベル2(相手船への影響をも考慮した避航操船)、レベル3(海域内の最適パスの探索を含む避航操船)のどこま

で実行できたかを、操船者がアンケートにより回答し、これにより航行の安全を評価する手法である⁽³⁶⁾。音戸瀬戸を対象とした狭水道のシミュレータ実験の安全性評価に用いられた⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾。また、テクノスーパーライナーのプロジェクトにおいて、実海域実験船「飛翔」の東京湾を対象とした操船シミュレータ実験の安全性評価にも用いられた⁽³⁹⁾。

一方、航行安全の確保には、高速船側からだけでなく、一般船の側から見た潜在的危険の評価をおこなって、どちらの側からも潜在的危険を排除することが必要である。しかし、一般船側からの評価には、操縦性能の影響が大きいため、見合い関係を含めた評価手法が必要である。そこで、一般船側からの安全性評価の指標として、操船者の感じる脅威を用いることを検討した。本節からは、操船者が感じる脅威と潜在的危険について検討し、一般船と高速船の遭遇において、一般船の操船者の感じる脅威が、潜在的危険を考慮した航行の安全を評価する一種の指標となることを示していく。そして、一般船の操船者に脅威を感じさせない航行、すなわち、安全な航行をするために、高速船はどのような航行をするべきかを求めることを目的とし、まず、一般船操船者が脅威を感じる、高速船の避航開始位置を調べる実験をおこなった。さらに、一般船操船者が脅威を感じる高速船の避航開始位置が、物理的にはどのような意味を持つ位置であるかを、避航限界と比較することで検討した。

2.6.1 潜在的危険と操船者の感じる脅威

航行の安全を担保するためには、故障、見落とし、判断の誤り等の何らかの「外乱」によって、潜在的危険が顕在化したときに、その危険を回避することのできる余裕、すなわち安全余裕が必要である。どこまでの外乱を考慮しているかは、個人によって、様々ではあろうが、その想定している外乱に対する安全余裕を、操船者は、普段から持って操船している。この安全余裕は、操船者または操船している船舶によって、時間、距離、能力等様々な形が取られる。そして、図2.9に示すように、想定している外乱に対するこれらの安全余裕がないと、操船者は心理的に余裕がなくなり、衝突してしまうのではないかというおそれを感じてしまう。本論文では、この操船者が感じる衝突に対するおそれを「脅威」と呼ぶ。

反対に、操船者は、脅威を感じないように常に操船しているといえるので、これはすなわち、個人差はあるにせよ、操船者は脅威を基準として、潜在的危険を回避するような操船をしているといえることができる。

一方、1989年度から1990年度にかけておこなった東京臨海部海上交通路用船舶の調査⁽⁴⁰⁾において、一般船が航行している海域の中を、高速船の操船者が安全を確保しつつ航行するというシミュレータ実験(99ケース実施)では、高速船が、一般船にかなり接近して避航開始する場数が少なからず見受けられた。高速船の操船者は、自船の優れた操縦性能を

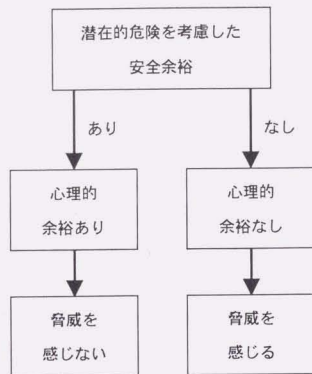


図 2.9 潜在的危険と操船者が感じる「脅威」

表 2.1 一般船操船者が感じる脅威に影響を及ぼす要因とその傾向
および実験で考慮した内容

脅威に影響を及ぼす 要因	影響の傾向	実験で考慮した 内容
避航開始位置	遠くなると、脅威が小さくなる傾向	調査対象
航過距離	長くなると、脅威が小さくなる傾向	考慮しない
海域の幅狭度	小さくなると、脅威が小さくなる傾向	非常にすいている (一対一)
一般船側の高速船の 操縦性能の認識	良いことを認識すると、 脅威が小さくなる傾向	良いことを 認識している
高速船の大きさ	小さくなると、脅威が小さくなる傾向	小型船 2 種類 (船長 30m, 50m)
高速船の速度	遅くなると、脅威が小さくなる傾向	2 種類 (50ノット, 25ノット)
高速船と一般船の 通信	できると、脅威が小さくなる傾向	なし
高速船と一般船の 意思疎通の支援機器	できると、脅威が小さくなる傾向	なし
自船の大きさ	眼高が高いと、脅威が小さくなる傾向	2 種類 (船長 209m, 50m)
自船の操縦性能	良いと、脅威が小さくなる傾向	低速船の 13ノット 航行に相当

考慮すると「十分な安全を確保できる位置から避航開始した」としている。しかし、一般船の操船者からは「衝突の危険を感じる」という意見が得られた。このように、同じ場面でも、高速船と一般船では、脅威の感じ方が違うことは明かである。

2.6.2 操船者の感じる脅威とその要因

脅威は、操船者が主観的に感じるものであり、現在、遭遇している状況に対して、今までの自分の経験から感じるものである。では、この脅威に影響を与えるものを具体的に考えてみる。

表 2.1 の左の欄と中央の欄には、一般船と高速船の遭遇において、一般船操船者の「衝突の危険を感じるという脅威」に影響を及ぼす要因とその影響の傾向を示す。操船者が感じる「脅威」は、操船者が安全を判断するときの主観的な尺度であるが、ここに示す様々な具体的要因が複合して、「脅威」に影響を与えている。また、これらの要因は、考慮すべき外乱の潜在的危険としての範囲でもある。よって、この「脅威」は、潜在的危険を評価する際に考えられる様々な要因を操船者が経験的に包括したもの、すなわち、操船者の主観による潜在的危険の評価の指標と捉えることができる。だからこそ、操船者は、自船側に潜在的危険を考慮した安全余裕があるときには、脅威を感じない。先に述べた東京臨海部海上交通路用船舶の調査における実験の、高速船と一般船の遭遇では、高速船側には自分からの安全余裕があるが、一般船側にはないので、それぞれ、脅威の感じ方が違った。海上交通全体の安全を確保するには、一般船側の操船者の脅威を、安全評価の指標として用いることとし、高速船側が一般船に脅威を与えない避航方法を取らなくてはならない。

では、どんな点に気をつけて高速船が航行すれば、一般船に脅威を与えず、すなわち、海上交通の安全を確保した航行ができるのだろうか。表 2.1 の「脅威」に影響を及ぼす要因について検討をおこなった。

表 2.1 の左の欄に示した要因の中で、高速船側の航行方法によって変わるのは、避航開始位置と航過距離である。1990 年度からおこなってきた高速船の国際基準に関する研究⁽⁴⁰⁾におけるシミュレータ実験で、「避航していることがわかれば、すなわち、意志の疎通ができているならば、航過距離は近くても安心できる。」ことが判明している。

また、高速船と一般船では、速度差が大きいことから、安全余裕は時間で表すことが適当と考えるが、接近に要する時間と距離は、船速を一定とすると一対一対応の関係と見なすことができる。

よって、高速船は、一般船に対して、脅威を与えない位置で避航を開始すれば、安全を担保できることになるので、高速船の避航開始位置を調べる実験をおこなうこととした。

2.7 シミュレータ実験

2.7.1 シミュレータ実験の概要

本実験は、一般船の操船者が脅威を感じる、高速船の避航開始位置を、様々な接近角度に対して求めるものである。

表 2.1 の左の欄に示した要因において、本実験で考慮した内容を表 2.1 の右の欄に示す。本実験では、高速船と一般船の一对一の遭遇において、一般船が脅威を感じる、高速船の避航開始位置を求める。航過距離は考慮しない。一般船の操船者は対象とする高速船についての知識を持っており、その操縦性能の良いことを認識している。高速船は、速度をパラメータとして検討するため、大きさは基本的に小型船とし、ジェットフォイル（船長 24m、船速 50 ノット）、カタマラン（船長 29m、船速 25 ノット）の 2 種類を用いた。操縦運動

表 2.2 高速船の避航開始位置の調査用実験シナリオ一覧

一般船	高速船	接近角度	見通し角	実験番号	
小型船 13ノット	ジェットフォイル 50ノット	右22.5度	右18度	小1, 小11, 小33	
		左90度	左76度	小2, 小10, 小34	
		左45度	左36度	小3, 小9, 小35	
		正面	正面	小4, 小16, 小36	
		右90度	右76度	小5, 小15, 小37	
		左22.5度	左18度	小6, 小14, 小38	
		右45度	右36度	小7, 小13, 小39	
		右135度	右123度	小8, 小12, 小40	
		右22.5度	右15度	小17, 小27, 小41	
	左90度	左63度	小18, 小26, 小42		
	左45度	左30度	小19, 小25, 小43		
	正面	正面	小20, 小32, 小44		
	右90度	右63度	小21, 小31, 小45		
	左22.5度	左15度	小22, 小30, 小46		
	右45度	右30度	小23, 小29, 小47		
	右135度	右105度	小24, 小28, 小48		
	大型船 13ノット	ジェットフォイル 50ノット	右22.5度	右18度	大1, 大11, 大33
			左90度	左76度	大2, 大10, 大34
左45度			左36度	大3, 大9, 大35	
正面			正面	大4, 大16, 大36	
右90度			右76度	大5, 大15, 大37	
左22.5度			左18度	大6, 大14, 大38	
右45度			右36度	大7, 大13, 大39	
右135度			右123度	大8, 大12, 大40	
右22.5度			右15度	大17, 大27, 大41	
左90度		左63度	大18, 大26, 大42		
左45度		左30度	大19, 大25, 大43		
正面		正面	大20, 大32, 大44		
右90度		右63度	大21, 大31, 大45		
左22.5度		左15度	大22, 大30, 大46		
右45度		右30度	大23, 大29, 大47		
右135度		右105度	大24, 大28, 大48		
カタマラン 25ノット		右22.5度	右15度	大17, 大27, 大41	
		左90度	左63度	大18, 大26, 大42	
	左45度	左30度	大19, 大25, 大43		
	正面	正面	大20, 大32, 大44		
	右90度	右63度	大21, 大31, 大45		
	左22.5度	左15度	大22, 大30, 大46		
	右45度	右30度	大23, 大29, 大47		
	右135度	右105度	大24, 大28, 大48		

モデルは、(1) 式の応答モデルを用い、旋回性能は、最大速度、最大舵角でジェットフォイルが 6.2 度/秒、カタマランが 3.8 度/秒である。高速船と一般船間において通信およびその他意志疎通のための援助装置はない。一般船側は、自船の大きさによる脅威の感じ方の違いを見るために、大型船（バルクキャリア、船長 209m、船速 13 ノット）、小型船（一般貨物船、船長 50m、船速 13 ノット）の 2 種類とした。自船の操縦性能は、一般船の 13 ノット航行に相当する。高速船、一般船とも、実験中の航行速度は一定である。

被験者は、大型船船長経験者 A, B の 2 人、内航小型船船長経験者が 1 人である。心理的な許容範囲を求める実験であることから、被験者には、普段操船している船舶に近い大きさの一般船を自船としたが、大型船船長経験者 B には、小型船を自船とした。

実験では、被験者は操船卓につき、自船である一般船ブリッジからの景観画像を見る。自船は 13 ノットでまっすぐ航行する。1 回の実験ごとに、1 隻の高速船が、自船に向かって、衝突する針路で直進してくる。実験のシナリオを表 2.2 に示す。実験番号の順に、同じ状況を 2 回から 3 回実験した。

被験者は、実験中に次の 2 つのことを申告する。

- ①脅威を感じることはない高速船の避航開始位置の限界点（以下、非脅威限界点と呼ぶ。）
- ②これ以上近くでまで寄られては我慢できない、高速船の避航開始位置の限界点（以下、許容限界点と呼ぶ。）

実験において、被験者が利用できる情報は、景観画像とレーダ模擬画像の 2 つである。一般船ブリッジからの景観画像は、通常の視野は 90 度、視線は自船の進行方向であるが、視野と視線は、操船卓にある視線変更装置（レバー）、視野変更装置（ジョイスティック）で変更可能である。

実験前には、慣熟操船をおこない、自船の操縦感覚、高速船の見え方等に慣れていただいた。よって、操船シミュレータにより表現された各船舶の操縦性能および景観画像とレーダ模擬画像が提示する他船の見え方が妥当であるとの評価を得てから本実験を実施した。

2.7.2 シミュレータ実験の結果

図 2.10 から図 2.13 に実験結果を示す。図は、一般船を中心として、高速船の位置を相対表示している。図中の、船型の記号は非脅威限界点を、■は許容限界点を示す。

図 2.10 および図 2.11 は、小型船経験者が小型船を自船とした結果であり、図 2.10 は相手の高速船はジェットフォイルで船速が 50 ノット、図 2.11 はカタマランで 25 ノットである。同様に、図 2.12 および図 2.13 は、大型船経験者 A が大型船を自船とした結果である。

これらの脅威を感じる避航開始位置が物理的にどのような意味を持った位置なのかを調べるために、一般船と高速船について次の 3 種類の避航限界と比較、検討することにした。

- ①一般船側からの左右各 30 度変針での高速船に対する避航限界

②高速船側からの右 15 度変針での一般船に対する避航限界

③高速船側からの 30 秒の「時間的余裕」⁽³³⁾を見てから右 15 度変針での一般船に対する避航限界

避航限界は、2.3.3 節でも説明した通り、自船（避航する側の船舶）のみの避航行動で、かろうじて相手船（避航される側の船舶）を避けることができる避航開始時点での相手船の位置を、自船を座標の中心にして示した線である。

一般船が高速船に対して避航操船するときには、舵を大きく取ると考えられるので、一般船からの避航限界を求めると変針角度は左右各 30 度とした。また、海難審判の事故例の中で、大型船が衝突事故を起こしたときの変針角の平均が 30 度であることから、想定する変針角としては 30 度が妥当であると判断した。図中では、一般船側からの左 30 度変針での高速船に対する避航限界を一点鎖線で、同右 30 度変針での避航限界を二点鎖線で示した。左右両者が重なる領域を太線で示したので、この太線の一点鎖線および二点鎖線で示された範囲が、一般船側からの避航限界、すなわち、一般船側から高速船を避航できる限界の位置に相当する。

一方、高速船側からの一般船の避航は、通常の避航操船であると考えられるので、変針角度は 15 度とした。また、速度差が大きいため、左変針を用いずとも右のみで充分避航限界の特徴が示せる。よって、右のみの 15 度変針とした結果、高速船側からの避航限界の形状は多少左右非対象となっている。

2.8 考察

本実験では、データ数が少なく、当初予測したよりも、操船者の個性による差が大きく、数値はケーススタディの域を出ないが、傾向を分析するには十分であると考えられる。以下、考察を試みた。

2.8.1 反航および横切りの場合

2.8.1.1 非脅威限界点

図 2.10 および図 2.11 が示すように、小型船において、非脅威限界点は、一般船側からの高速船に対する避航限界の外側に位置している。しかし、図 2.12 および図 2.13 が示すように、大型船の横切りでは、避航限界の内側に非脅威限界点が位置している。

一般船の高速船に対する避航限界の形は、左右に長い楕円形をしているのに、非脅威限界点の分布は、円形に近い。そこで、この非脅威限界点の分布については次のように考えることができる。脅威を感じる避航開始位置は、操船者の経験、感覚から出てきた値である。被験者は高速船に出会ったことはあっても、実験のような状況にあったことはなく、従来経験している一般船との見合いの感覚で、このようなほぼ円形をなす非脅威限界点の



図2.10 一般船に対する高速船の避航開始位置
一般船：小型船 高速船：ジェットfoil
操船者：内航小型船船長経験者



図2.11 一般船に対する高速船の避航開始位置
一般船：小型船 高速船：カタマラン
操船者：内航小型船船長経験者

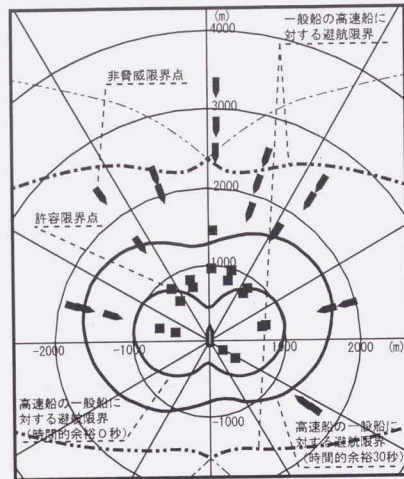


図2.12 一般船に対する高速船の避航開始位置
 一般船：大型船 高速船：ジェットフォイル
 操船者：大型船舶長経験者A

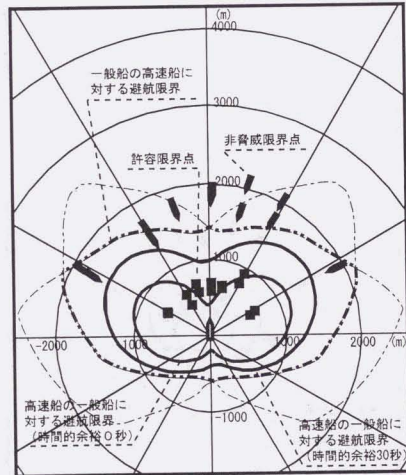


図2.13 一般船に対する高速船の避航開始位置
 一般船：大型船 高速船：カタマラン
 操船者：大型船舶長経験者A

領域が示された可能性がある。そこで、図 2.14 に示すように、図 2.12 に一般大型船の一般小型船に対する変針角左右各 30 度の避航限界を重ねてみた。非脅威限界点は、一般大型船の一般小型船に対する避航限界の外側に位置していることがわかる。図 2.15 には、参考のため、自船が一般小型船（操船者は、小型船経験者）の場合に対して、一般小型船の一般小型船に対する変針角左右各 30 度の避航限界を重ねた図を示した。

これらの結果から、高速船に対しての脅威の基準が、まだ、十分に操船者の中でできあがっておらず、高速船に対しての脅威と一般船に対しての脅威が混合した基準で、非脅威限界点が出てきていると考えることができる。したがって、本実験で求められた非脅威限界点は、一般船に対する避航限界以上の安全余裕のある位置ということができる。

図 2.16 および図 2.17 に、大型船経験者 B が小型船を自船とした結果を示す。図 2.16 は、相手の高速船はジェットフォイルで船速が 50 ノットであり、図 2.17 は、カタマランで 25 ノットである。これらの図のうち、特に、図 2.16 は、図 2.12 の大型船操船者 A が大型船を自船とした場合の分布に近く、操船者の感覚が、実験時に用いた小型船ではなく、普段、経験している自船である大型船の感覚であることが示されていることが読み取れる。

2.8.1.2 許容限界点

一方、図 2.10 および図 2.11 が示すように、小型船において、許容限界点の分布は、一般船の高速船に対する避航限界と、高速船の余裕のない避航限界の間に分布していることがわかる。大型船では、図 2.12 および図 2.13 が示すように、反航時は、小型船と同様の分布であるが、横切りでは、時間的余裕 0 秒の避航限界の内側まで入っている。ここでも、一般船の操船者による高速船の性能に対する認識が不足しており、脅威の基準がまだできあがっていないと思われるが、図 2.16 および図 2.17 を含め、全体では、許容限界点は高速船の避航限界を意識したものと捉えることができる。一般船操船者は、脅威の限界では、自船からの避航操船ができなくても、高速船の操船で衝突を回避することを期待していると推察できる。このことは、この範囲では、高速船側に避航の義務を迫らせる必要があることを示している。

また、許容限界点は、図 2.10 から図 2.17 が示すように、自船が小型船、大型船とも、高速船の 30 秒の時間的余裕を持った避航限界にほぼ含まれて分布している。この位置で高速船が避航すると、一般船に限界の脅威を与えずに避航できることがわかった。この 30 秒が、他の外乱に対処する時間としての安全余裕と捉えることができる。

2.8.2 同航の場合

斜め後ろから高速船が接近する同航の場合では、景観画像で高速船を見ることはできず、レーダのみによる確認だけであった。データは更に少ないが、図 2.12、図 2.16 および図 2.17

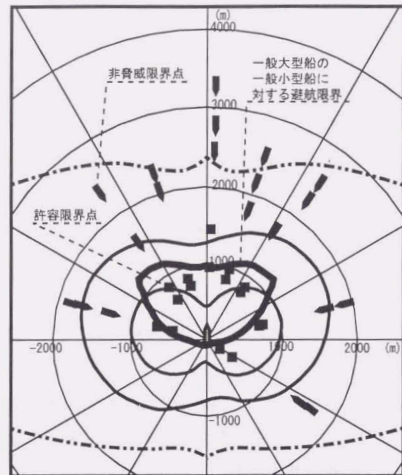


図2.14 一般船に対する高速船の避航開始位置と
一般大型船の一般小型船に対する避航限界
一般船：大型船 高速船：ジェットフォイル
操船者：大型船舶長経験者A

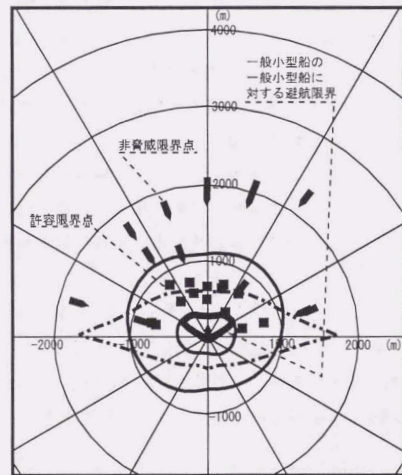


図2.15 一般船に対する高速船の避航開始位置と
一般小型船の一般小型船に対する避航限界
一般船：小型船 高速船：ジェットフォイル
操船者：内航小型船舶長経験者



図2.16 一般船に対する高速船の避航開始位置
一般船：小型船 高速船：ジェットフォイル
操船者：大型船舶長経験者B

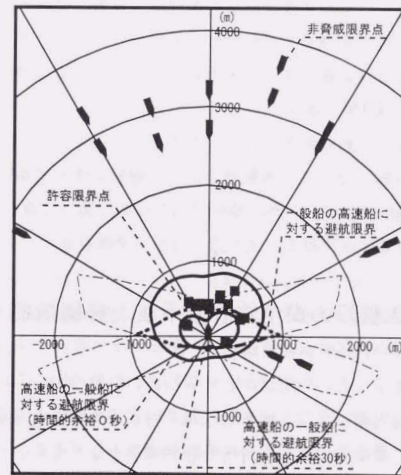


図2.17 一般船に対する高速船の避航開始位置
一般船：小型船 高速船：カタマラン
操船者：大型船舶長経験者B

が示すように、非脅威限界点、許容限界点ともに、かなり一般船に近い。接近速度が小さいので、距離が近くなっているのは、常識的である。

2.8.3 脅威に影響を及ぼす要因についての考察

全体的に、データのばらつきは、50ノットの高速船の場合の方が大きい。25ノットの方が、時間的に余裕があって、一般船側の高速船に対する情報の収集にばらつきがなく、結果的に避航開始して欲しいという判断地点が一致し易いのではないかと解釈できる。

本実験では、接近してくる高速船の速度を25ノット、50ノットと変化させて、それぞれ一般大型船、一般小型船の操船者が脅威を感じる、高速船の避航開始位置を求めた。しかし、本実験においては、高速船の船速の差による脅威の感じ方の違いは、あまり見られなかった。また、自船の大きさごとに異なった操船者に実験していただいたが、図2.10から図2.13が示す限りでも、大型船の方が小型船よりも、ジェットフォイルに対する非脅威限界点が遠くに位置している程度の違いであり、図2.16および図2.17を含めると、自船の大きさによる脅威の感じ方の違いはあまり見られなかった。一方、一般小型船操船者が脅威を感じる、高速船の避航開始位置に注目すると、図2.10および図2.11が示す小型船操船経験者よりも、図2.16と図2.17が示す大型船操船経験者Bの方が遠くなっている。これらの図のうち、特に、図2.16は、図2.12が示す大型船操船経験者Aが大型船を自船とした場合に近い分布をしている。実験時に用いた自船よりも、普段から経験している自船に基づく主観によって、脅威を感じる避航開始位置が現れていると考えられる。つまり、操船者の経験が、このような主観的な値を求めるときには、重要な要素になるので、ふさわしい被験者を選ぶことが重要である。

全体に、非脅威限界点、許容限界点とも、当初予測したよりも、一般船に近いところに分布している。これは、一対一の実験のため、一般船の周りに空いている海域があったためと推察する。輻輳海域では、一般船操船者が潜在的危険を考慮すべき要素が増えるので、脅威を感じる避航開始位置がこれより遠くなる可能性がある。

2.9 結言 —高速航行の安全性評価手法と評価指標—

以上のように、高速船航行の安全性評価には、外乱により顕在化する潜在的危険を考慮した安全評価が必要であること、高速船側と一般船側の両者の側からの評価が必要であることを示してきた。高速船側からは、潜在的危険を回避するための安全余裕という評価指標を、一般船側からは、操船者の感じる脅威を評価指標として考案し、その有効性を明らかにした。

安全余裕による評価は、操船者が潜在的危険を排除するという立場での評価であるため、航路設計や現在と性能の大きく異なる船舶の安全評価等において有効であるが、想定され

る外乱の範囲やその程度、外乱によって生じた危険を操船者が回避する能力および船舶の操縦性能等の因子に大きく依存するため、定量的な評価のためには、これらの因子のそれぞれについての調査を深めることが重要である。特に、操船者の能力についての基礎的なデータを収集するため、操船者の危険回避の能力を状況把握、判断、避航計画等の要素ごとに調査を進める必要がある。実船実験でこれらの調査をおこなうとなると、条件を整えたり、パラメータを変化させ多数のケースを実施するには困難を伴うので、操船シミュレータの利用が効果的である。

一方、操船者の感じる脅威が、経験的に操船者の危険回避能力や外乱を包括したものであるということ、一般船側からの潜在的危険を考慮した航行安全の評価指標として有効であることを、操船シミュレータ実験により明らかにすることができた。

脅威は、操船者が主観的に感じるものであるから、どこまでの潜在的危険を考慮しているかは、本人にもはっきりと意識されていない。そこで、シミュレータ実験で、実際に外乱を起こして、潜在的危険を明確にすることは操船シミュレータの大きな役割である。

また、一般船、高速船の操船者、海域管理者等、海上交通の安全についての関係者の認識を同じにするための道具として、操船シミュレータは利用できる。

すなわち、操船シミュレータは、操船者だけでなく、海上交通の関係者まで含んだヒューマンファクターの調査や実験に有効なツールとなる。

本研究のシミュレータ実験からは、高速船に対しての脅威が、一般船の操船者の中で、まだ、基準として固まっていないことが判明した。実際に経験しなくても、本研究のような一般船操船者によるシミュレータ実験をおこない、その実験結果を操船者が確認することができれば、主観的に感じていた脅威が、客観的に、例えば、避航限界等に対してどの程度に位置するかを知ることができ、一般船操船者が高速船に対して感じる脅威の基準を固めることができる。そして、一般船の感じる脅威が、正しい認識から得られた基準であれば、潜在的危険を考慮した高速航行の安全を評価する指標として確立できると考える。

本実験の約1年後に、大型高速船を対象とし、同じ被験者で、操船者が感じる脅威を評価指標として、一般船操船者に脅威を与えない大型高速船の避航開始距離を求めた⁽⁴¹⁾。それを基に、その避航開始距離を確保できる大型高速船の限界輻輳度を求めることができた⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾。その輻輳度を用いて、次の第3章の、大型高速船の操船支援の実験を実施した。また、第4章でも、テクノスーパーライナー実海域実験船「飛翔」の遭遇実験において、一般船操船者に脅威を与えない飛翔の避航開始距離を求め、この数値を、輻輳海域における高速船の安全な航行方法のモデル化に用いた⁽⁴⁴⁾。このように、本章で述べた操船者が感じる脅威を、高速船の安全評価指標として導入し、それにより求められた数値を、定量的に用いることができる。

3 高速船安全航行のための有効な操船支援

3.1 緒言

以前から、様々なところで、高速船の安全な高速航行についての課題⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁷⁾が検討されてきた。また、高速航行の安全評価についても、関西国際空港海上アクセス船舶についての調査⁽⁴⁸⁾や超高速旅客船の夜間航行の調査検討⁽⁴⁹⁾、および東京臨海部海上交通路用船舶の調査⁽³⁹⁾において実施されている。これらの対象は、いずれも小型の高速船であり、安全評価手法については、AHP (Analytic Hierarchy Process : 階層分析法) によるものや、閉塞領域等を個々に検討するもの、シミュレーションによる実験を再生して有識者により主観的に評価するものであった。

船舶技術研究所では、高速船の国際基準に関する研究⁽⁴⁰⁾⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾において、高速船の運航体制についての研究をおこなってきており、大型高速船の高速航行の安全に対する各種の操船支援の効果調べるために操船シミュレータ実験をおこなった。この結果については、第2章で示した安全余裕による評価⁽⁴⁰⁾や分散分析の手法を用いて評価をおこなった⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾⁽⁵¹⁾。この操船シミュレータ実験では、操船支援の効果により安全余裕が増加するかどうかの調査をおこなっても、一定の範囲内で、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、客観的な時間もしくは距離としての安全余裕としては、支援効果の詳細なデータ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、各種の操船支援の効果に対する主観的な意見が述べられている。

そこで、シミュレータ実験の際に実施した操船者へのアンケートを基に、大型高速船を対象として、操船支援の効果に対する操船者の主観的な評価を客観的に解析する手法として主成分分析を用いて操船支援効果について求めた結果について述べる。

3.2 操船支援の策定

操船シミュレータ実験にてその支援効果を調査した操船支援を表3.1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

表3.1 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

とにおこなうのか1秒ごとにおこなうのかが相違点である。ARPA (Automatic Radar Plotting Aids) は「ARPAなし」、「ARPA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おこなう」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、暗視装置は「暗視装置なし」の場合と「暗視装置あり」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は「高速船識別灯なし」、「高速船識別灯あり」の2種類を調べた。

これらの操船支援をどのように組み合わせ、何ケースずつ実験をおこなったかを表3.2から表3.4に示す。組み合わせの詳しい内容については、あとの3.5節で述べる。

表3.2 昼間航行の操船支援組み合わせ

	高速船情報なし	高速船情報あり			
	レーダなし	表示周期3秒レーダ		表示周期1秒レーダ	
	ARPAなし	ARPAなし	ARPAあり	ARPAなし	ARPAあり
援助者なし	A 4ケース				
援助者情報支援のみ		B 3ケース	C 4ケース	E 3ケース	
援助者情報と判断支援			D 3ケース		

表3.3 夜間航行の操船支援組み合わせ (1)

	暗視装置、高速船識別灯なし				
	高速船情報なし	高速船情報あり			
	レーダなし	表示周期3秒レーダ		表示周期1秒レーダ	
ARPAなし	ARPAなし	ARPAあり	ARPAなし	ARPAあり	
援助者なし	F 3ケース				
援助者情報支援のみ		G 3ケース	H 3ケース	J 3ケース	
援助者情報と判断支援			I 3ケース		

表3.4 夜間航行の操船支援組み合わせ (2)

	高速船情報あり、レーダ表示周期3秒、ARPAあり、援助者による情報と判断支援	
	暗視装置なし	暗視装置あり
高速船識別灯なし	(I 3ケース)	K 3ケース
高速船識別灯あり	L 3ケース	M 3ケース

3.3 アンケートによる意見集約方法

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調査票に回答を記入していただいた。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、実験をおこなう前に、アンケートについての説明を一通りおこない、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。

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な評価を尋ねる項目も盛り込んでいる。

アンケートにより操船支援に対する操船者の主観的な意見を集め、それを解析することにより、操船支援効果について求めた。

3.4 シミュレータ実験

シミュレータ実験は、船舶技術研究所の操船シミュレータを用いておこなった。操船者は、過去のシミュレータ実験においても高速船の操船者をしていただいた船長経験者である。よって、操船シミュレータでの船舶の表現には習熟している。

表 3.5 に示すように、この実験は、前もっておこなったシミュレータ実験⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾により求めた限界幅緯度の海域の中を、船長 127m、船速 50 ノットの SES 型の大型高速船で 10 分間航行するというものである。操縦運動モデルは、(1) 式の応答モデルを用い、舵の遅れは 14 秒 (0 度から最大舵角に至る時間)、回頭角速度は 2 度/秒 (50 ノット時) である。表 3.1 に示した各種の操船支援を組み合わせて、その効果を求めた。

シミュレータ実験では、他船がランダムに航行している海域を、自船の大型高速船が灯浮標に添って航行する。10 分間航行したところで、1 回の実験は終了する。他船は、平均船速 13 ノットの大型船 (バルクキャリア、船長 225m)、中型船 (一般貨物船、船長 100m)、小型船 (一般貨物船、船長 50m) の 3 種類の一般船であり、その航行密度は昼間の航行で 1

表 3.5 シミュレータ実験の概要

自船	大型高速船 (船長 127m、船速 50ノット)		
航行時間	1回の実験につき 10分間		
海域	航行密度	昼間	1平方海里6隻
		夜間	1平方海里4隻
	他船	一般船3種類 (大型、中型、小型)、船速13ノット 高速船2種類 (大型、小型)、船速50ノット	
実験回数	昼間	17回	
	夜間	24回	

平方海里 6 隻、夜間の航行では 4 隻である。全てのシナリオで、10 分間の航行のほぼ中ほどにおいて、他の高速船が自船大型高速船と出会うように設定している。自船と同じ大型高速船は正面から、ジェットフォイルが左右両側から、それぞれ 50 ノットで航行してくる。一般船、高速船とも直進し、避航動作は取らない。実験数は、昼間を 17 回、夜間を 24 回おこなった。

3.5 操船支援の組み合わせ

表 3.2 から表 3.4 に示した操船支援の組み合わせの内容は次の通りである。

昼間の航行は、A: 援助者もレーダもない組み合わせを 4 ケース、B: 援助者が情報支援のみおこない表示周期 3 秒のレーダだけが使用でき、高速船情報がある場合を 3 ケース、C: 組み合わせ B にさらに ARPA が使用できる場合を 4 ケース、D: 組み合わせ C に加えてさらに援助者が判断支援をおこなう組み合わせを 3 ケース、E: 組み合わせ B と比較のために、援助者が情報支援のみおこない、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を 3 ケースおこなった。以上、17 ケースである。

夜間の航行では、F: 援助者もレーダもない組み合わせを 3 ケース、G: 援助者が情報支援のみおこない、表示周期 3 秒のレーダだけが使用でき、高速船情報がある場合を 3 ケース、H: 組み合わせ G にさらに ARPA が使用できる場合を 3 ケース、I: 組み合わせ H にさらに援助者が判断支援をおこなう組み合わせを 3 ケース、J: 組み合わせ G と比較のために、援助者が情報支援のみおこない、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を 3 ケースおこなった。以上、組み合わせ F から J には、暗視装置および高速船識別灯はない。

暗視装置 (写真 1.4 参照) と高速船識別灯の効果を調べるために、組み合わせ I と比較して、援助者が情報と判断の支援をおこない、表示周期 3 秒のレーダと ARPA が使用でき、高速船情報もあるという条件で、K: 高速船識別灯なし暗視装置ありの場合を 3 ケース、L: 高速船識別灯あり暗視装置なしの組み合わせを 3 ケース、M: 高速船識別灯あり暗視装置ありの場合を 3 ケース実施した。夜間は合計 24 ケースである。

3.6 アンケート結果の解析と考察

3.6.1 主成分分析とアンケート回答の数量化

アンケート結果の解析には、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⁽⁵²⁾。この手法は、船用機関故障の要因分析において、蓄積された故障データに埋もれている情報を集約し、知識として整理したり⁽⁵³⁾、船用機関の安全性向上に応用される情報の特徴抽出⁽⁵⁴⁾に用いられ

ている。

ここで、主成分分析について簡単に述べる。因子分析と一般に呼ばれる多くの手法の中で、もっとも実用性のあるのが主成分分析 (Principal Component Analysis) である。

主成分分析は、 p 個の特性値 x_1, x_2, \dots, x_p の持つ情報を、これらの重み付き平均と考えられる (4) 式の m 個 ($m < p$) の総合特性値 z_1, z_2, \dots, z_m に要約する手法である。これら z_1, z_2, \dots, z_m を第 1、第 2、 \dots 、第 m 主成分と呼ぶ。

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= l_{11}x_1 + l_{12}x_2 + \dots + l_{1p}x_p = \sum_{i=1}^p l_{1i}x_i \\ z_2 &= l_{21}x_1 + l_{22}x_2 + \dots + l_{2p}x_p = \sum_{i=1}^p l_{2i}x_i \\ \dots & \\ z_m &= l_{m1}x_1 + l_{m2}x_2 + \dots + l_{mp}x_p = \sum_{i=1}^p l_{mi}x_i \end{aligned} \right\} (4)$$

$$\text{ここで、} l_{k1}^2 + l_{k2}^2 + \dots + l_{kp}^2 = \sum_{i=1}^p l_{ki}^2 = 1 \quad (5)$$

さらに、 z_k と $z_{k'} (k \neq k', k=1, \dots, m)$ の相関は、すべてゼロであり、主成分 z_1, z_2, \dots, z_m は、元の特性値 x_1, x_2, \dots, x_p の持つ情報の損失が最小になるように決定される。

具体的に、 m 個の主成分を求める重み係数 $\{l_{ki}\}$ を求めるには、元の特性値 x_1, x_2, \dots, x_p の相関行列 R の固有値を求め、大きい方から順に m 個 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m$ をとり、対応する固有ベクトルを求めれば、それが $\{l_{ki}\}$ に等しいことを利用する。また、 m の決定には、 $\lambda_m > 1$ なる m を採用するか、式 (6) で計算される累積寄与率 V_m を参考にする。

$$V_m = \frac{\sum_{k=1}^m \lambda_k}{p} \quad \dots (6)$$

主成分同士は互いに無相関であるが、主成分 z_j と元の特性値 x_i との相関係数は $\sqrt{\lambda_j} l_{ji}$ で表され、これを因子負荷量と呼ぶ。

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。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、まったくない、ほとんどない、少しある、かなりある、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。

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

表3.7 昼間航行のアンケート項目と回答

1	ARPA	ある	1	20	周囲の船舶に脅威を与えた	かなり与えた	3
		ない	0			少し与えた	2
2	表示周期 1秒レーダ	ある	1	21	操船判断のレベル	ほとんど与えない	1
		ない	0			全く与えなかった	0
3	表示周期 3秒レーダ	ある	1	22	ARPAが役立った	はい	1
		ない	0			いいえ	0
4	援助者からの情報支援	ある	1	23	表示周期 3秒のレーダが役立った	はい	1
		ない	0			いいえ	0
5	援助者からの情報と判断支援	ある	1	24	情報支援が役立った	はい	1
		ない	0			いいえ	0
6	操船困難な場面とやさしい場面の差	大きかった	2	25	高速船情報が役立った	はい	1
		あまり大きくない	1			いいえ	0
7	避航開始限界距離の厳守	小さかった	0	26	判断支援が役立った	はい	1
		できた	1			いいえ	0
8	目視の情報収集が困難	どちらともいえず	0	27	今のままで十分	はい	1
		できなかった	-1			いいえ	0
9	レーダの情報収集が困難	避けられなかった理由		28	ARPAが必要	はい	1
		はい	1			いいえ	0
10	得られる情報が不十分	いいえ	0	29	レーダが必要	はい	1
		はい	1			いいえ	0
11	避航判断が困難	避航開始限界距離の厳守が困難だった理由		30	判断支援の内容の高度化	はい	1
		はい	1			いいえ	0
12	避航判断の時間が不足	いいえ	0	31	判断支援が必要	はい	1
		はい	1			いいえ	0
13	情報収集時の援助者との意思疎通困難	いいえ	0	32	援助者との意思疎通の改善が必要	はい	1
		はい	1			いいえ	0
14	避航操船が困難	いいえ	0	33	高速船情報が必要	はい	1
		はい	1			いいえ	0
15	自船操縦性能が不十分	いいえ	0	34	情報支援が必要	はい	1
		はい	1			いいえ	0
16	東京湾と比べて輻輳していた	いいえ	0	35	他船との交信が必要	はい	1
		はい	1			いいえ	0
17	困難な見合い関係だった	東京湾以上に輻輳	2	36	操船困難な場面は連続していた	連続していた	2
		同程度に輻輳	1			あまりしていない	1
18	避航可能スペースは	あまり見合い関係	2	37	困難な場面数	ほとんどしていない	1
		あまり見合い関係	1			ほとんどしてない	0
19	同時に考慮すべき船舶は多かった	簡単に見合い関係	0	20	周囲の船舶に脅威を与えた	2回	2
		かなりあった	2			1回	1
20	表示周期 1秒レーダ	あまりなかった	1	21	操船判断のレベル	0回	0
		ほとんどなかった	0				
21	表示周期 3秒レーダ	たいへん多かった	3	22	ARPAが役立った		
		多かった	2				
22	援助者からの情報支援	あまり多くない	1	23	表示周期 3秒のレーダが役立った		
		少なかった	0				

3.6.2 夜間航行シミュレータ実験の主成分分析

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おこなった。

夜間の分析対象となる項目は、表 3.6 が示すように、アンケート項目数の 40 である。この 40 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 (表 3.8) 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%まで集約することができた。表 3.9 に、主成分と、因子であるアンケート項目との相関係数である因子負荷量と固有値、寄与率を示す。

図 3.1 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おこなう。

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。有効に使うことのできない理由としては、1 秒周期では、画面を見ながらの状況判断および操船計画が、結論に至る前に表示更新により中断されてしまうためと考察できる。

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」、「困難な見合い関係だった」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、海域の容易さを表している。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。

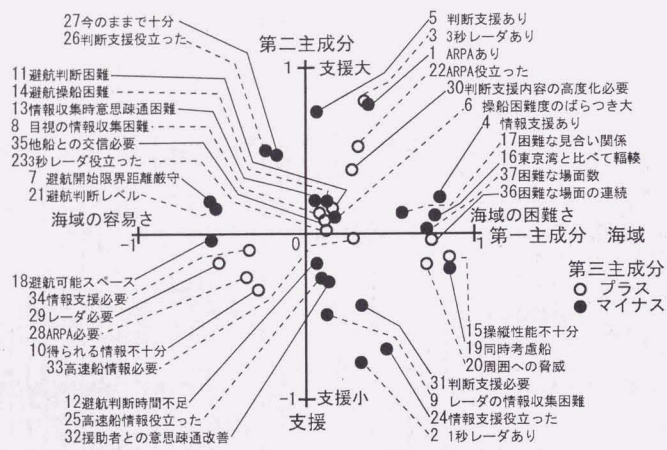


図3.3 昼間航行主成分分析結果

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役立った」といった項目の絶対値が大きい。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。プラス側に支援が高く評価されている項目、マイナス側に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、余裕を生み出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。

3.7 高速船同士の遭遇について

本章のシミュレータ実験のシナリオでは、高速船同士も遭遇したが、高速船の航行数が少なく遭遇頻度も少なかったため、支援全体の中では高速船情報や高速船識別灯の個別の効果は高くなかった。しかし、操船者へのインタビューの中では、「一般船に気を取られ、高速船に気がつくのが遅れてヒヤッとした。」という意見も見られた。

高速船同士の遭遇は、高速ではあるが、基本的には、一般船同士の遭遇と同じと考えら

れ、従来の航法に則った避航方法が当てはまる。しかし、高速で接近するので、安全余裕を保持するために、見合い関係の早い時期に避航開始をすることが重要である。よって、高速船の情報は、船舶搭載の支援機器（ARPA 等）だけに頼るのではなく、通信や導入が検討されている AIS 等の別の手段で入手できるようにする必要がある。

3.8 結言 —高速船の有効な操船支援—

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。この手法により、従来の安全評価では示されなかった大型高速船における様々な操船支援の効果について明らかにすることができた。ここで検討した対象は大型高速船であるが、この手法自体は小型高速船、一般船にも対応できるものであり、実船実験で実施したアンケート調査に対しても対応できる。

しかし、このようなヒューマンファクターの関連した研究に、操船シミュレータを用いることは、実験条件を整え、多数のパラメータを変化させて繰り返し実験を実施することを可能にする。さらに、操船シミュレータ実験では、時間的空間的にもすぐ被験者にアンケートをおこなうことができる。このように、操船シミュレータ実験とアンケート調査、主成分分析を用いて、操船者の操船および安全航行に関する意見を徴収して分析するという手法は、ヒューマンファクターの調査に適した手法である。

最後に、本研究で明らかになった大型高速船における操船支援の効果等について、夜間と昼間航行の両方をまとめて示す。

- ①操船者は、ARPA、表示周期 3 秒レーダおよび援助者による判断支援を、操船支援として有効であると評価している。
- ②これらに次いで、夜間航行では、高速船識別灯、暗視装置、情報支援が有効と評価している。
- ③表示周期 1 レーダは表示の更新が速すぎるため有効に使うことができない。
- ④ARPA は、夜間および昼間航行とも、操船の余裕を生み出し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。
- ⑤さらに判断レベルの達成には、夜間航行では暗視装置が、昼間航行では援助者による判断支援が役立っている。
- ⑥しかし、特に夜間航行においては、援助者との意志疎通と内容の改善が強く望まれている。
- ⑦夜間航行においては、第一主成分として操船支援が現われており、昼間航行よりも操船支援の影響が強い。一方、昼間航行では、第一主成分が海域の評価となっており、昼間

航行では、機器や援助者を通しての支援よりも、操船者が直接収集する情報源である海域の状態の方が操船者に強く影響している。

4 高速船安全航行のための航行方法

—主として TSL 飛翔を対象として—

4.1 緒言

テクノスーパーライナー技術協同組合が実施する実海域実験船「飛翔」(以下、TSL 飛翔という)を用いた総合実験が 1995 年に実施された。この総合実験は、TSL 飛翔の荷役、入出港、航行等様々な場面の安全を調査する目的でおこなわれた。船舶技術研究所は、航行の安全の中でも、幅狭海域における高速船の安全な航行方法をモデル化することを目的として、TSL 飛翔と一般船の見合い実験をおこなった。

実船実験に先立って、船舶技術研究所にある操船シミュレータを用いて、TSL 飛翔と一般船との見合いシミュレータ実験をおこない、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おこなった。これを踏まえて、幅狭海域を想定した、TSL 飛翔と一般船との見合い実船実験をおこない、TSL 飛翔の避航開始距離、航過距離等を実測した。その際に、一般船の操船者が感じる脅威をアンケートにより回答していただき、避航開始距離との関係を求めた。これにより、各遭遇において操船者が感じる脅威を基に、TSL 飛翔の安全な航行について検討をおこなった。また、TSL 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おこなった。

本実験では、操船の責任を負っている船長だけでなく、航海訓練所の専任教官、商船大学の教授、各航海士にも実験に参加して、アンケート調査に協力していただいた。そこで、船長等の操船の責任者に限らず、航海士まで含めて実験に参加した実験参与船員全員を対象とし、彼らの航行の安全に関する意見について、所属するクラス間で比較検討して、TSL 飛翔の安全な航行方法について検討を深めた。また、実船実験とシミュレータ実験の結果についても比較検討することにより、安全な航行方法の検討に関する知見を得た。

ここでの実験結果およびアンケート解析と考察は、その後おこなった東京湾を例とした幅狭海域の TSL 飛翔のシミュレータ実験⁽³⁹⁾と、幅狭海域における高速船の安全な航行方法のモデル化⁽⁴⁰⁾の基となるデータとしても利用されている。

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 隻と、その操船者の方々に、実船実験とシミュレータ実験の両方に協力していただいた。

4.2 航行方法モデル化の基本的考え

第 2 章で述べた通り、幅狭海域において高速船が安全に航行するための航行方法とは、一般船が受け入れられる航行方法、すなわち一般船に脅威を与えないような航行方法を高

速船がおこなうことである⁽⁵⁵⁾。幅狭海域の航行方法では、見合い関係になったときの高速船の避航操船方法が重要である。避航操船の中でも、高速船の避航開始距離が、相手船の操船者にとって、脅威を感じる最も大きな要因になっている。そこで、幅狭海域を想定し、TSL 飛翔が一般船に遭遇する場合、その接近方向と避航開始距離によって、一般船の操船者が感じる脅威がどのように変化するかを求めることとした。一般船の操船者が感じる脅威は、アンケートにより収集した。これを基に、幅狭海域において一般船が許容できる、すなわち高速船が守るべき避航開始距離等をはじめとする安全な航行方法を求めていった⁽⁴⁴⁾。

4.3 アンケートによる意見集約方法

アンケート調査票には、安全な航行方法の検討に必要な設問を盛り込まなくてはならない。シミュレータ実験を通して、アンケート自体にも修正を加えて、アンケート調査票を

表 4.1 アンケート調査票 (一部)

設問 1. ただいまの遭遇における衝突の危険 (脅威) 判定で、その最大値は、次のランクでいかほどのランクでしたか。○印をつけてください。 (2, 4, 6, 8は補間として用いる。)	
10: 危険極まりない接近であった。こんな遭遇状態はごめんである。 9: 許容できるぎりぎりまで接近した。 7: 幅狭海域で遭遇する程度。例えば、通常の航行時に比べると 2 倍程度の危険。 5: 通常の航行中によく遭遇する程度であり、衝突の危険も普通と感じてであった。 3: 衝突の危険をあまり感じなかった。例えば、通常時に比べ余裕がある感じ。 1: 衝突の危険を全く感じなかった。例えば、非常に速くを航行したためなど。	
設問 2. ただいまの衝突の危険判定で次のどれを重要と考えましたか。 重要と考えたものを次の項目から選んで点数をつけてください。 最重要を 5 点、重要を 4 点、普通を 3 点、ある程度考慮を 2 点、無視を 1 点とします。	
<input type="checkbox"/> 相手の接近速度	<input type="checkbox"/> 相手の接近速度の変化
<input type="checkbox"/> 相手の方位角 (ベアリング)	<input type="checkbox"/> 相手の方位角の変化 (ベアリングの変化)
<input type="checkbox"/> 相手の姿勢 (アスペクト)	<input type="checkbox"/> 相手の姿勢の変化 (相手の変針)
<input type="checkbox"/> 相手の航行速度	<input type="checkbox"/> 相手の航行速度の変化
<input type="checkbox"/> 相手との距離	<input type="checkbox"/> 相手との距離の変化
<input type="checkbox"/> 相手との予想最近距離	<input type="checkbox"/> 相手との予想最近距離の変化
<input type="checkbox"/> 相手の意志	<input type="checkbox"/> 相手の走行波・ウェイク等の影響
設問 3. ただいまの遭遇で衝突危険の程度が減少したと判断したときの判断材料について、次の項目から選んで点数をつけてください。最重要材料を 5 点、重要材料を 4 点、普通材料を 3 点、ある程度考慮したを 2 点、材料としなかったものを 1 点とします。	
<input type="checkbox"/> 相手の接近速度の減少	<input type="checkbox"/> 相手の方位角の変化 (ベアリングの変化)
<input type="checkbox"/> 相手の航行速度の変化	<input type="checkbox"/> 相手の姿勢の変化 (相手の変針)
<input type="checkbox"/> 相手との距離の変化	<input type="checkbox"/> 相手との予想最近距離の増加
<input type="checkbox"/> 相手の意志の確認	<input type="checkbox"/> 相手の走行波・ウェイク等の変化

作り上げていった。アンケート調査票の中で、本研究で整理した設問は、表 4.1 に示す 3 つである。

まず、各遭遇における、一般船の操船者が感じる脅威を求めると、設問 1 として、各見合い実験において感じた脅威の最大値（最大脅威）のランクを回答していただいた。ランク 1 からランク 10 までであるが、ランク 5 として、「通常の航行中によく遭遇する程度で、衝突のおそれ（脅威）も普通の感じである。」、ランク 7 として「輻輳海域で遭遇する程度の接近。例えば、通常の航行時に比べると 2 倍程度の脅威。」とした。

さらに、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際と、衝突の危険の程度が減少したと判定する際に、どのような点に着目しているかを求め、それによって、高速船はどんな点に注意して航行すれば良いかを求めるための設問を設けた。設問 2 では、各見合い実験において、衝突の危険が発生したかどうかの判定（以下、衝突の危険判定）において用いた項目を、重要度に応じて 5 点から 1 点まで点数をつけて回答していただいた。設問 3 では、各見合い実験において、衝突の危険の程度が減少したとの判定（以下、衝突の危険減少判定）の際に用いた項目を、重要度に応じて点数をつけて回答していただいた。いずれも、点数を重複して回答していただいている。

4.4 シミュレータ実験

4.4.1 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、船舶技術研究所にある操船シミュレータを用いて、シミュレータ実験をおこなった。シミュレータ実験の目的は次の通りである。

- 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

表4.2 シミュレータ実験の概要

実験参加船名と大きさ	実験実施の日付	実験参与船員	実験場所	飛翔接近方向	ケース数
航海訓練所北斗丸 5,877ト, 125m	7月5日	船長、航海士	船研シミュレータ	右	1
				左	2
東京商船大学汐路丸 425ト, 50m	9月5日, 6日	船長、航海士	船研シミュレータ	左	23
航海訓練所銀河丸 4,888ト, 115m	10月3日	船長、航海士	船研シミュレータ	右	3
				左	3
神戸商船大学深江丸 449ト, 50m	9月21日	船長	船研シミュレータ	右	1
				左	5
T S L 飛翔 1,427ト, 70m	7月12日	船長、航海士 3人	船研シミュレータ	右	4
				左	2

飛翔の自船は内航タンカー

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、TSL 飛翔および一般船の船長を含む 2 人（TSL 飛翔は 4 人、深江丸は船長のみ）、一般船として評価者が操船する船舶は、それぞれの自船を操船したが、TSL 飛翔のシミュレータ実験の場合のみ、自船は内航タンカーとした。各自船とも、操縦運動モデルは (1) 式の応答モデルを用いている。これまでのシミュレータ実験と同様に、慣熟運転をおこない、妥当との評価を得てから、本実験を実施した。

表4.3 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 飛翔 +90 ↑ 自船 -90	TSL飛翔の船速 (ノット)	避航開始距離 (海里)	避針角度 (度)	航路距離 (海里)	備考
7月5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4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	10	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5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	-48 → -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 → 10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3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	45	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	
9月21日	深江丸実験1	-56	40~45	0.80	25	左0.40	
	深江丸実験2	-48	40~45	1.00	30	左0.32	
	深江丸実験3	-46	40~45	0.75	40	左0.19	
	深江丸実験4	54	40~45	2.00	25	船首0.67	
	深江丸実験5	-49	40~45	1.00	30	左0.27	船尾を追う
	深江丸実験6	-50	40~45	1.50	10	船尾左0.16	
7月12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		
	-33	40~45	0.30	29	左0.10		
	46	40~45	0.20	41	船首0.10		

シミュレータ実験の実験概要を表 4.2 に、実験条件と結果を表 4.3 に示す。表 4.3 には、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(表 4.1 参照)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。

4.4.2 シミュレータ実験の結果と考察

①実船実験の見合い状況の理解とその慣熟

図面上だけでなく、シミュレータで実際に、実船実験の見合い状況を体験することにより、理解が深まり、慣熟することができた。

②実船実験のシナリオの検討と修正および決定

図面上で検討した見合い実船実験のシナリオを、シミュレータで実際におこなうことによって、より実船実験に近い形で検討することができた。その際に出された意見を取り入れながら、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を決定できた。決定したシナリオについては、実船実験の 4.5 節に示す。

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することができた。よって、表 4.3 に示したように、避航開始距離や、変針角度を細かく変えて、それにより、操船者の感じる脅威の変化や TSL 飛翔の避航操船行動の認識し易さについて検討することができた。

④実船実験との比較

これについては、実船実験のところでも述べる。

⑤安全な航行方法の検討

各実験終了後に操船者に答えていただいたアンケート調査票の中で、表 4.1 に示した設問の回答結果を整理した。

表 4.1 の設問 1 の各見合い実験において感じた脅威の最大値(以下、最大脅威という)のランク(最高値 10~最低値 1)の回答と避航開始距離との単相関グラフを、TSL 飛翔の接近方向別に、図 4.1 と図 4.2 にまとめた。凡例は、評価者である操船者の別を示す。

これらのグラフからは、全体の傾向としては、TSL 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ことがわかる。

図 4.1 において、1.5 海里および 2.0 海里で、汐路丸の最大脅威が幅を持っている。これは、TSL 飛翔が変針角度を変えて複数避航をおこなったのであるが、同じ遭遇角度、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。特に、1.5 海里で汐路丸が最大脅威のランク 9 と評価している実験は、TSL 飛翔が変針角度 10 度で避航操船による避航動作を取ったあとに、5 度舵を戻したものである。また、1.0 海

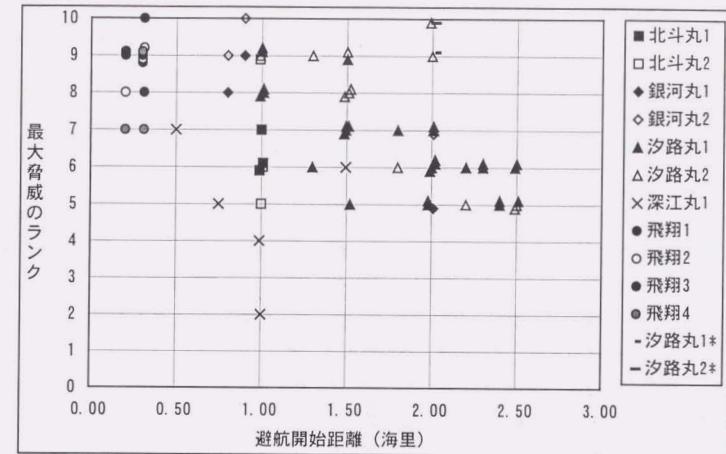


図 4.1 一般船にTSL飛翔が左から接近した場合の最大脅威のランク(シミュレータ実験)

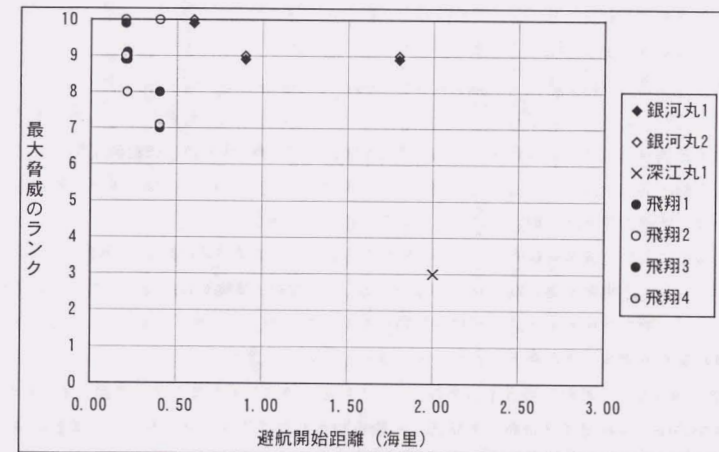


図 4.2 一般船にTSL飛翔が右から接近した場合の最大脅威のランク(シミュレータ実験)

里と 1.5 海里で深江丸が最大脅威のランクを逆転して評価しているが、TSL 飛翔の変針角度が、1.0 海里では 30 度と大きく、反対に 1.5 海里では 10 度であった。TSL 飛翔が避航操船動作を取る際の変針角度が小さいと、その動作がわかりにくいいため、一般船上の評価者に脅威を与えていることが読み取れる。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。一方、2.0 海里で、汐路丸操船者 2 が、最大脅威のランクを 10、9 と評価している実験がある。これは、TSL 飛翔が汐路丸から見て左 45 度付近から接近し、左転避航動作を取ったものである。船首を横切る避航操船動作は、汐路丸上の評価者に、脅威を与えている。汐路丸 1*、汐路丸 2* で示した実験は、45 ノットから 30 ノットへの減速による避航をおこなった場合であるが、その動作がすぐに一般船にわからないので、その遭遇で感じた最大脅威のランクが高くなっており、脅威を与えていることがわかる。

図 4.2 では、1.8 海里で銀河丸が最大脅威のランクを 9 と評価しているが、これは、銀河丸が避航操船をおこなったものである。

図 4.3 は、表 4.1 の設問 2 である衝突の危険判定に用いた項目において、図 4.4 は、同じく設問 3 の衝突の危険減少判定に用いた項目において、操船者が最重要もしくは重要と考えた項目について整理したものである。凡例は表 4.3 で示した実験番号の別を示す。

これらのグラフからは、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ことがわかる。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、操船者によって順位は前後するが、相手船との距離に関する項目と相手船の意志となっている。相手船の速度に関する変化や走行波・ウェイクの変化については、衝突の危険減少判定にはほとんど重要視していない。

表 4.2 に示した遭遇実験の他に、一般船から見た TSL 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おこなった。一般船に対して、TSL 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、避航操船動作をおこなった。その際、一般船が、TSL 飛翔の避航動作を視認できたかどうかを、インタビューにより尋ねた。

TSL 飛翔が、一般船に接近する場合、左の方向から接近し右転変針する避航、すなわち、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、TSL 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。これについては、実船実験で確認することとなった。

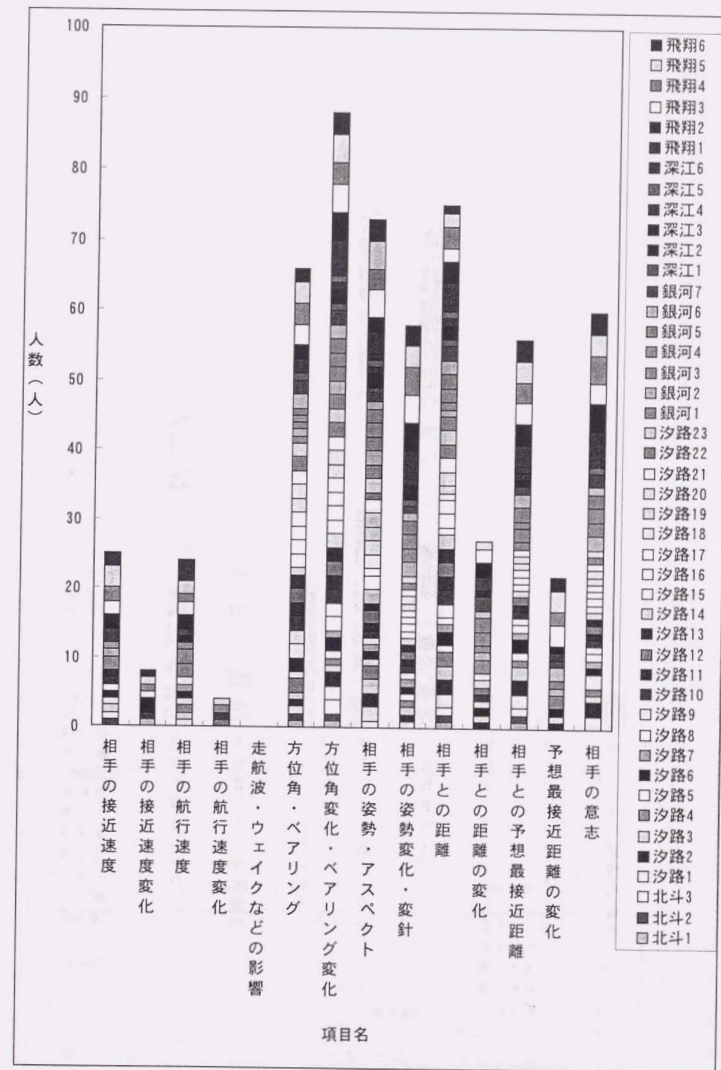


図 4.3 衝突の危険判定に用いた項目の評価者数積み上げグラフ（シミュレータ実験）

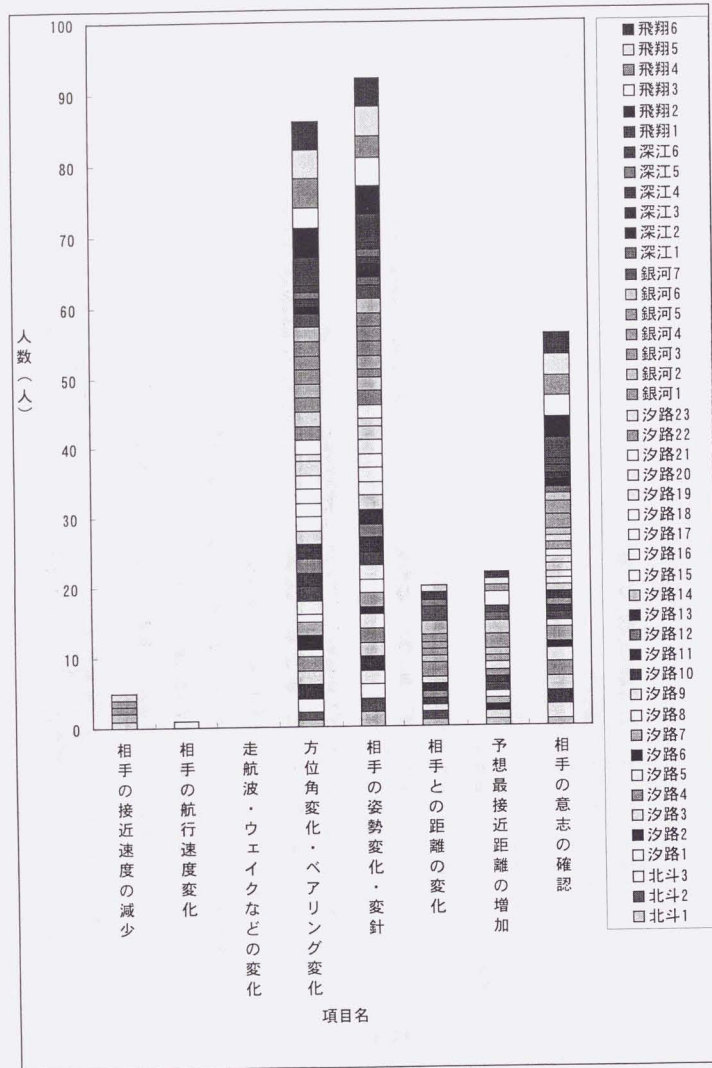


図 4.4 衝突の危険減少判定に用いた項目の評価者数積み上げグラフ (シミュレータ実験)

4.4.3 シミュレータ実験の問題点

船舶技術研究所の操船シミュレータは、第 1 章で述べたように、視野角が左右 45 度づつ計 90 度である。しかし、写真 1.2 のブリッジのモックアップを整備した結果、操船者の立つ位置が、後方に移動してしまい、実際の景観画像が 90 度以下の広がりしかなくなってしまうため、実海域においておこなう他船のベアリングを取る動作がシミュレータ上では困難であった。このため、他船との遭遇状況は、レーダ/ARPA の情報で補われた。

実船実験とシミュレータ実験の最も大きな相違は、他船の見え方であった。シミュレータにおいては、CGI の分解能に限界があるため、実海域では視認が可能な 4 海里より遠方の船影を画像で表現した場合、情報の欠落があり、距離や姿勢の確認に困難を伴った。シミュレータ上で遠方の物体を描く際に、遠距離での船舶の視認性を確保するための対策を取る必要がある。但し、実験で用いた避航開始距離は全て 4 海里以内であり、データを収集するには問題はなかった。

また、操船シミュレータで表現している走行波・ウエイクは、海面や船体運動による変化をせず船体に固定であるため、情報として利用がより乏しくなった。コンピュータの能力の充実により、このような細かいところまで、必要に応じて改善を図りたい。

4.5 実船実験

4.5.1 実船実験の概要

表 4.4 に、実海域における、TSL 飛行と一般船による見合い実験の概要を示す。運輸省航海訓練所の 5,000 トンクラスの大型船 (北斗丸、銀河丸)、および、東京、神戸の両商船大学が所有する 500 トンクラスの中型船である練習船 (汐路丸、深江丸) を用い、他の船舶の航行が少な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。各実験とも、TSL 飛行が一般船に接近し、操舵による避航動作を取る。

表 4.4 実船実験の概要

実験参加船名と大きさ	実船実験の日付	実験参与船員	実験場所	飛行接近方向	ケース数
航海訓練所北斗丸 5,877ト, 125m	7月28日	船長、専任教官、 航海士3人	足摺岬160度 30海里沖	左	2
東京商船大学汐路丸 425ト, 50m	9月27日, 28日	船長、教授、 航海士2人	伊豆大島 東側海域	右	6
				左	4
航海訓練所銀河丸 4,888ト, 115m	10月26日	船長、専任教官、 航海士5人	紀伊水道 和歌山寄り沖	右	2
				左	3
神戸商船大学深江丸 449ト, 50m	10月31日	船長、教授、 航海士4人	室戸岬北東沖	右	5
				左	4
TSL 飛行 1,427ト, 70m	上記全て	船長、船長補佐	上記全て	上記全て	上記全て

実船実験を通して、TSL 飛翔が一般船と遭遇したときの避航開始距離、航過距離等を実測した。また、TSL 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おこなった。

表 4.5 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。航行速度は、大部分は、45 ノットであるが、汐路丸および深江丸については、30 ノットでの見合い実験も実施した。その実験ケースは、汐路丸に対しては、左舷船首 45 度と右舷正横、深江丸に対しては、右舷正横からの接近である。

各遭遇実験終了後にはアンケートを実施し、安全な航行方法の検討のデータとした。視認性の実験では、TSL 飛翔の避航動作が視認できた時点を、一般船上の評価者が身振り以示すことになっており、それをブリッジ内でビデオ撮影し、これを解析することにより、視認性について調査した。

表 4.5 実船実験の条件と結果

日付	通し番号	遭遇パターン		TSL 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
		→ 飛翔 ↑ 自船	90 45						
7月28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26日	汐路丸実験1	90	40~45	2.20	船首0.35	良	良		
9月27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26日	銀河丸実験1	-90	40~45	2.00	左0.6	悪	良	波高1.85m、風速18m/s	
	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	
10月31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

4.5.2 実船実験の結果と考察

実船による遭遇実験においても、安全な航行方法検討のため、シミュレータ実験と同じ内容のアンケートを実施し、表 4.1 に示した 3 つの設問について解析した。

図 4.5 から図 4.8 には、表 4.1 の設問 1 である各見合い実験の最大脅威のランクと避航開始距離の単相関グラフを、一般船の大きさごとに、TSL 飛翔の接近方向別に示す。TSL 飛翔側の回答もあわせて示してある。凡例は、評価者である操船者の別を示す。

これらのグラフからは、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。図 4.8 において、避航開始距離 0.6 および 0.7 海里で複数の深江丸評価者または TSL 飛翔が最大脅威のランクを低く評価している実験は、遭遇角度が 90 度のものである。

全体として、2 海里以遠で避航した場合、評価者は、幅狭海域での遭遇と同じ程度以下の脅威と評価している。2 海里より接近した避航では、多くの評価者が、幅狭海域での遭遇と同じ脅威の程度以上を感じており、特に、5,000 トンクラスで顕著である。また、避航開始距離 1 海里前後で、5,000 トンクラスではほとんどの評価者が最大脅威のランクを 9、10 とし、許容の境と評価している。500 トンクラスでは、この付近で、最大脅威のランクに評価者によるばらつきが見られるが、低く評価しているのは、一般船側の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 海里前後で、許容の境としている。

安全な航行方法のモデル化の際には、これらの数値を直接用いるのではなく、特にばらつきについている評価の数値については評価者からの意見を聴取して検討を加え、データの持っている意味を抽出して用いた。

図 4.9 は、表 4.1 の設問 2 である衝突の危険判定に用いた項目において、図 4.10 は、同じ設問 3 の衝突の危険減少判定に用いた項目において、操船者が最重要もしくは重要と考えた項目について整理したものである。凡例は表 4.5 で示した実験番号の別を示す。これらの結果の中には、TSL 飛翔の船長等に対して、一般船の立場に立って回答を求めたアンケート結果のデータも含まれている。

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。相手船の速度に関する変化や走行波・ウェイクの変化については、衝突の危険減少判

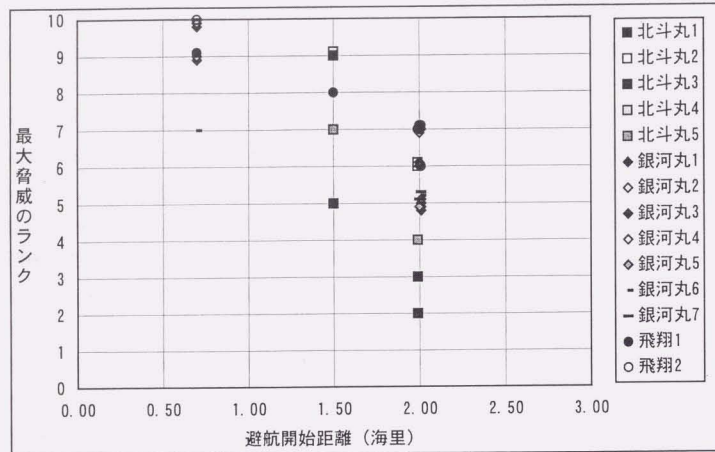


図4.5 5,000トンクラス一般船にTSL飛翔が左から接近した場合の最大脅威のランク(実船実験)

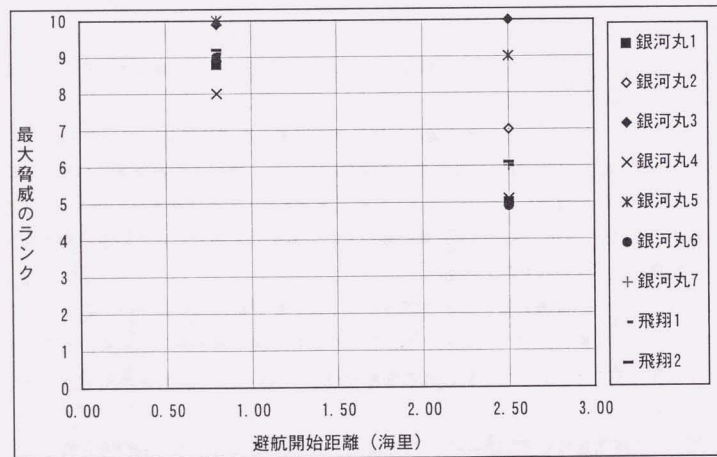


図4.6 5,000トンクラス一般船にTSL飛翔が右から接近した場合の最大脅威のランク(実船実験)

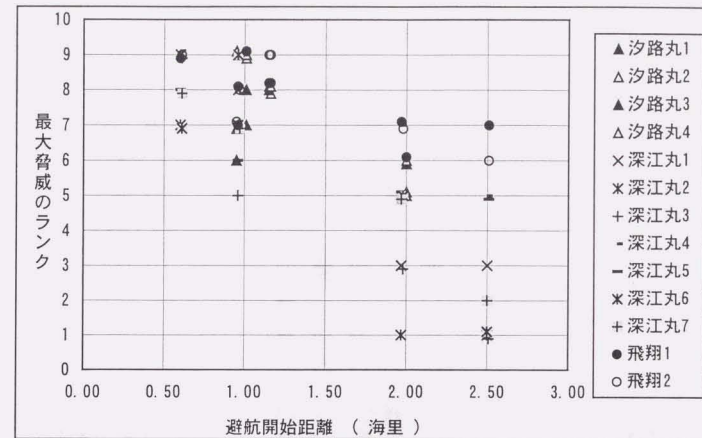


図4.7 500トンクラス一般船にTSL飛翔が左から接近した場合の最大脅威のランク(実船実験)

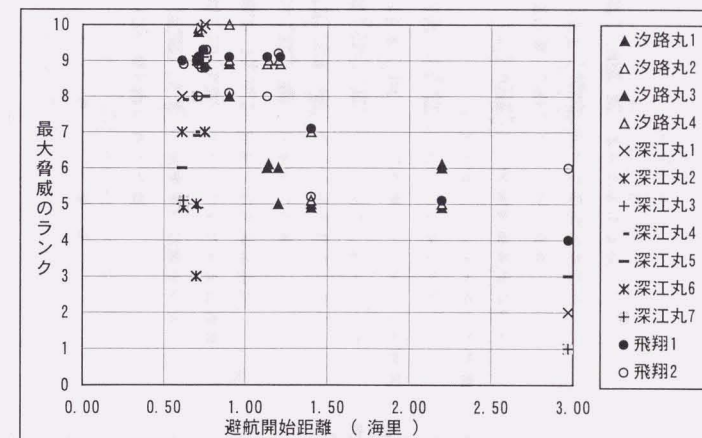


図4.8 500トンクラス一般船にTSL飛翔が右から接近した場合の最大脅威のランク(実船実験)

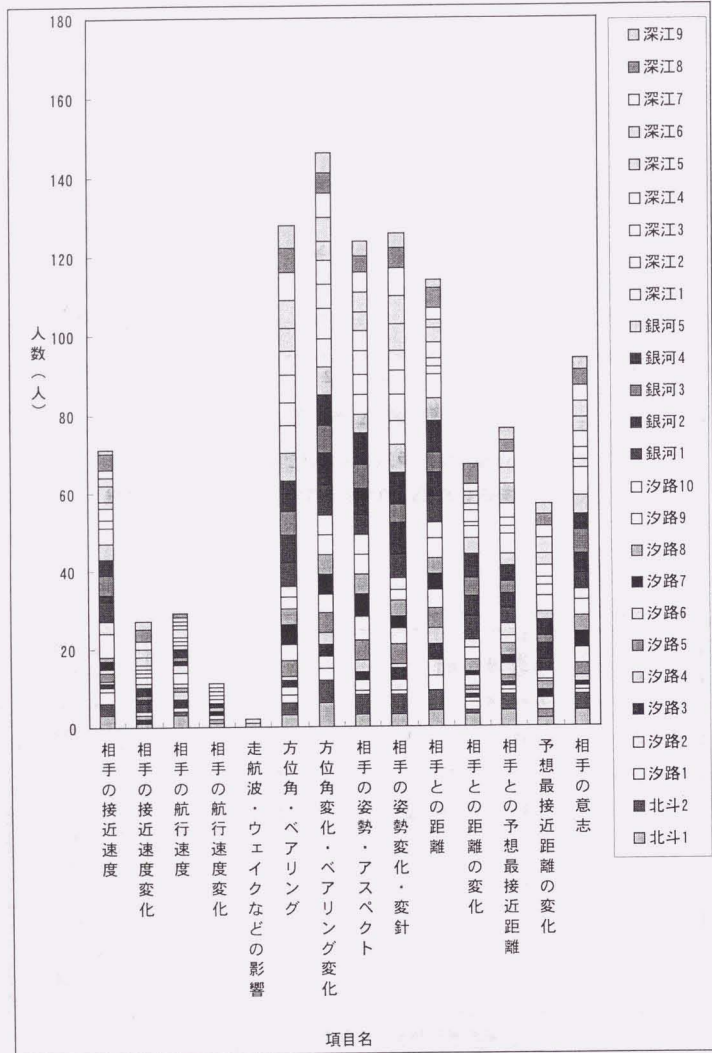


図 4.9 衝突の危険判定に用いた項目の評価者数積み上げグラフ (実船実験)

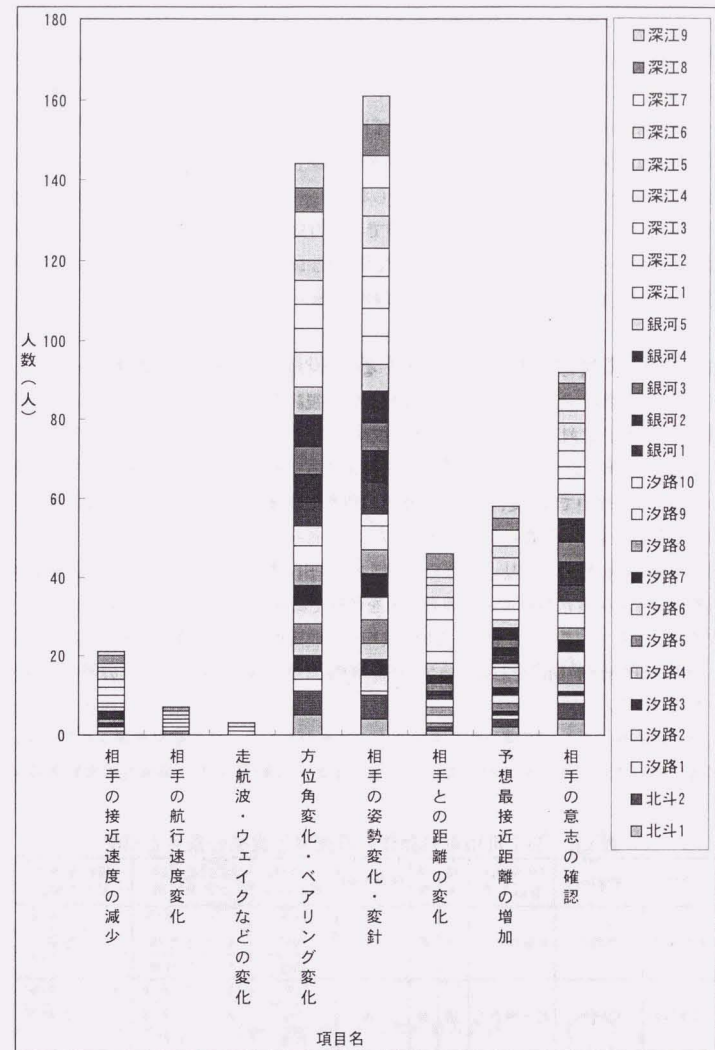


図 4.10 衝突の危険減少判定に用いた項目の評価者数積み上げグラフ (実船実験)

定にはほとんど重要視していない。

表 4.1 の設問 1 である各見合い実験の最大脅威のランクにおいて、シミュレーション実験と実船実験の結果を比較すると、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。深江丸に関しては、それが顕著である。また、設問 2 の衝突の危険判定に用いた項目と設問 3 の衝突の危険減少判定に用いた項目においては、実船実験とシミュレータ実験とは同様の結論が得られた。

本実験では、それぞれの船の操船責任者である船長には、実船実験とシミュレータ実験の両方に参加していただいている。そこで、実船とシミュレータの相違点や、補完できる点についての詳細は、このあとの 4.7 節で検討した。

4.6 TSL 飛翔の避航動作に対する一般船からの視認実験

さらに、一般船から見た TSL 飛翔の避航動作の視認実験を、汐路丸、銀河丸、深江丸で実施した。汐路丸に対しては、TSL 飛翔が汐路丸の左舷船首 45 度および左舷正横から接近し、途中で 10 度、20 度、30 度の角度で変針をする。銀河丸と深江丸に対しては、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て、その視認性について調査した。

調査方法は、一般船のブリッジ内で、評価者が TSL 飛翔の動向を観測し、各変針による避航動作が視認できた時点で、評価者が手を挙げて身振りで示し、それをブリッジ内でビデオ撮影しておく。このビデオと、TSL 飛翔が避航動作を取った時刻を解析することにより、TSL 飛翔が避航動作をおこなってから一般船側がそれを視認するまでの遅れ時間の測定をおこなった。

これらの実験のうち、正横からの実験 3 ケースを整理した。その結果を表 4.6 に示す。評価者は、それぞれ、汐路丸の操船責任者を含む実験参与船員 4 人、銀河丸の操船責任者を

表 4.6 TSL 飛翔避航動作の視認実船実験の条件と結果

日付	一般船船名	TSL 飛翔の接近方向	海象	視程	評価者数	TSL 飛翔の変針角度	変針を視認できた時刻	復針を視認できた時刻
9月26日	汐路丸	左正横から	良	良	4人	10度	6 ~ 13 秒後	1 ~ 2 秒後
						20度	4 ~ 9 秒後	18 秒後
						30度	1 ~ 6 秒後	-
10月26日	銀河丸	右正横から	悪	良	7人	10度	15 ~ 20 秒後	8 ~ 17 秒後
						20度	13 ~ 17 秒後	4 ~ 20 秒後
						30度	12 ~ 14 秒後	-
10月31日	深江丸	右正横から	悪	良	7人	10度	-	17 ~ 20 秒後
						20度	9 ~ 13 秒後	12 ~ 15 秒後
						30度	-7 ~ 13 秒後	-

含む実験参与船員 7 人、深江丸の操船責任者を含む実験参与船員 7 人である。

視認実験も、表 4.4 および表 4.5 に示した実験と同じ海域で実施したので、銀河丸と深江丸の実験時には海面が荒れていた。そのため、深江丸では、TSL 飛翔が実際に避航操船動作を取る前に、操船行動を取ったと認識してしまう評価者が 1 人あった。

TSL 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（汐路丸の場合）は、一般船側からの TSL 飛翔の避航に対する視認性が良い。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（銀河丸と深江丸の場合）には、一般船側から TSL 飛翔の変針を確認するのに、汐路丸よりも時間を要しており、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、TSL 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、TSL 飛翔の当面する船側のみを見る際には、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、TSL 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。

さらに、図 4.11 が示すように、相手船が自船の左正横から接近したときに、相手船の船速が、自船と同じ 12.5 ノットの場合は、 α が 45 度となり、相手船が 45 度近く変針しないと相手船の逆側の船側を見ることができない。しかし、相手船の船速が 35 ノットのときには、 α は 20 度、相手船船速が 50 ノットの場合 α は 14 度となり、TSL 飛翔のような高速船が一般船を避航する場合には、船尾航過のための変針角が小さくてすむことになり、船尾航過による避航操船に顕著な効果があることがわかる。

また、測定した TSL 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は、高速船の安全な航行方法のモデル化のデータとして用いることができた⁽⁴⁴⁾。

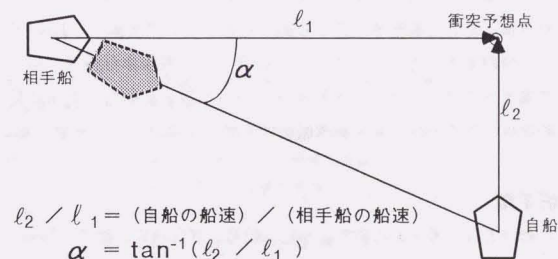


図 4.11 一般船船尾航過の避航操船の模式図

4.7 実船およびシミュレータ実験のまとめ

シミュレータ実験において、実船実験に備えての、目的と状況の理解、実施要領の理解が、一般船とTSL飛翔の両方とも効果的におこなうことができた。また、シナリオの検討、修正、決定においても大きな役割を果たした。しかし、高速船の高速航行には、相手船の向き等を早期に判断する必要があるため、より遠方の情報が望まれる。現状のシミュレータでは限界があり、景観画像に表示する相手船自体のサイズについては対策が必要である。

シミュレータ実験と実船実験を通して、TSL飛翔と一般船の見合い実験をおこなった結果、次の点が明らかになった。

- ①TSL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り、実船実験において、このことが確認された。
- ②操船者が、衝突の危険判定、すなわち衝突の危険が発生したと判定する際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。
- ③衝突の危険減少判定、すなわち衝突の危険の程度が減少したと判定する際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、相手船との距離に関する項目と相手船の意志となっている。相手船の速度に関する変化や走行波・ウェイクの変化については、ほとんど重要視していない。
- ④TSL飛翔に対して一般船の操船者が感じる最大脅威のランクとTSL飛翔の避航開始距離との関係が求められた。また、TSL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。

4.8 実船実験における実験参与船員のクラス間解析

前節までは、実験に参加した実験参与船員を所属クラスで区別せず、操船者として一括して扱い、各遭遇において操船者が感じる最大脅威のランクを基に、TSL飛翔の安全な航行方法について検討をおこなってきた。本節以降では、実験参与船員（以下、参与者という）をその所属するクラスに分け、実船実験における彼らの航行の安全に関する見解をクラス間で比較解析することにより、高速船の安全航行方法について考察する。

4.8.1 解析手順

実船実験の参与者は、表4.4に示すように、船長、専任教官、教授、航海士であった。これらの参与者を所属するクラスに分けて、航行の安全に関する意見や考え方について、クラス間の比較検討をおこなう。

最初に、参与者を、船長クラス、航海士クラスとTSL飛翔側の3クラスに分ける。船長クラスには、船長、専任教官、教授が含まれ、TSL飛翔側には、船長と船長補佐が含まれる。

一方、実験の際に、アンケートやインタビューにより収集した自由意見があり、その全容とまとめ⁶⁶⁾から、TSL飛翔と一般船との安全な航行方法に関連した意見について、クラス別に表4.7に抜粋した。

考察は、TSL飛翔と一般船との遭遇時に、参与者が感じる最大脅威のランクの違いをクラス間で比較検討した。その際、表4.7から関連した意見を補足している。次に、各遭遇実験において、危険判定および危険減少判定に重要視した項目をクラス間で比較し、さらに、項目間の関係について考察した。

表4.7 クラス別自由意見の抜粋

船長クラス
1. 飛翔が左から接近するときでも大きく圧迫感を受けたが、右からの接近の方がより脅威が大きい。
2. 2海里が飛翔の避航開始を希望する距離であり、許容できる限界は1.5海里。
3. 2海里を中心に10,15,20度と変えて飛翔が舵をきった場合、15度以上なら、よくわかった。
4. 減速は意志表示ではない。飛翔が50から30ノットに落としてもわかりにくく小角度変針のように見える。
5. 一度変針して舵を戻すのは、十分に船尾に向けたあとならば不安ではない。
6. 遠距離での明確な姿勢変化、ベアリング変化が有効である。
7. 航過距離として、最低でも自分の旋回径を確保する。
航海士クラス
1. 姿勢変化が読みやすくなると、脅威を小さくする。
2. 飛翔が左から接近するよりも、右からの接近の方がより脅威が大きい。
3. 飛翔のアスペクトが、45度以下になると脅威を増す。
4. 飛翔の針路変更時の角速度変化が安全側に早く変われば、脅威の薄らぎも早い。
5. 飛翔の諸性能をあらかじめ知っているに対応しやすいものと思われる。
TSL飛翔側
1. 一般船の大きさが大きいほど、運動諸元が増大傾向にあり、脅威を大きくするが、小型船でも無謀運転船があり、気を抜けない。
2. 飛翔の航行速度が速いほど、舵効きがよいので、脅威段階から抜けやすい。
3. 真正面に相対するとき、接近速度がより速くなり、脅威は大きい。
4. 相手船の大小にかかわらず、衝突そのものに脅威感を持つ。
5. 脅威の一つの理由は、航法を守るかどうか。
6. 飛翔は船型の特徴から10度以上変針しないとわからないだろう。

4.8.2 最大脅威のランクのクラス間比較

高速船と一般船との見合い関係においては、高速船の避航操船、わけてもその避航開始距離が一般船の脅威の大きな要因になっている。そこで、最大脅威のランクと避航開始距離との相関を調べた。

図 4.12 および図 4.13 は、TSL 飛翔の接近方向別に示した、各遭遇実験において参加者が感じた最大脅威のランクと避航開始距離との単相関グラフである。凡例は、評価者である参加者の別を示し、黒ぬりは船長クラス、白ぬきは航海士クラス、TSL 飛翔は×印で示している。

図 4.12 および図 4.13 とも、船長クラスはばらつきが少なく、全体的に、最大脅威を高く評価しているが、船長クラスの方が最大脅威を低く評価しているケースがいくつかあり、特に 2 海里以遠に見られる。これについては、船長クラスが「2 海里が TSL 飛翔の避航開始を希望する距離であり、許容できる限界は 1.5 海里。」と述べており、2 海里以遠はあまり問題がないと考え、個人差がでていると見られる。

TSL 飛翔は、両グラフとも、全般に、最大脅威のランクを高く評価し、避航開始距離 3 海里まで、最大脅威のランクを 5 前後に保っており、緊張を持續させていることがわかる。これに対応するものとして、TSL 飛翔側からは「絶対に衝突させてはならない」という意見があり、TSL 飛翔側が避航操船をおこなう側であり、状況をより厳しく認識していることが現れている。

図 4.12 と図 4.13 を比較すると、TSL 飛翔が左から接近するよりも、右から接近する方が、全体として、最大脅威のランクが大きくなっている。船長クラス、航海士クラスとも、「TSL 飛翔が左から接近するときよりも、右からの接近の方がより脅威が大きい。」と述べている。

最大脅威のランクを参加者クラス間で比較検討した結果、一般船側よりも、TSL 飛翔側が遭遇のどの段階においても、状況認識を厳しくしていること、TSL 飛翔の避航開始が望まれる避航開始距離 2 海里以内では、TSL 飛翔との遭遇を、航海士クラスよりも、船長クラスの方が厳しく認識していること、それ以遠では、操船者によって差があることがわかった。

4.8.3 危険判定項目と危険減少判定項目のクラス間比較

図 4.14 は、危険判定に用いた項目ごとに、重要視した割合を、船別、クラス別に示したものである。半径方向の軸は、各クラスがその項目を重要視した割合を示し、参加者が危険判定する際に最重要もしくは重要とした項目を船別クラス別に累積し、そのクラスに属する参加者数と実験数で除した値である。各クラスに属している参加者のいずれもが、いずれの実験ケースにおいても常に重要視した項目は、外側の円の 1 に近くなり、少数の参

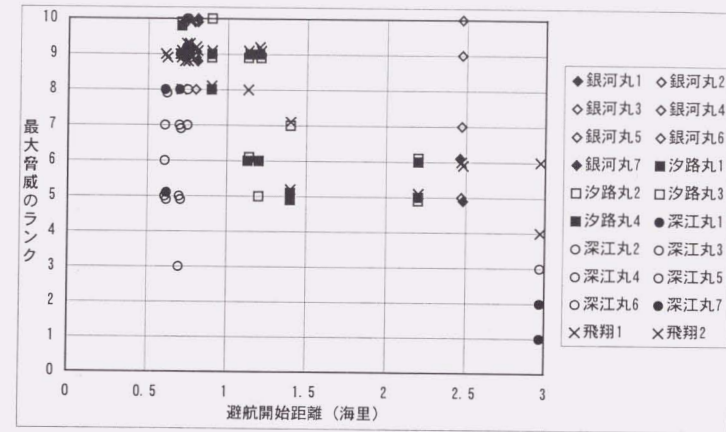


図4.12 一般船にTSL飛翔が右から接近した場合の最大脅威のランク (クラス間比較)

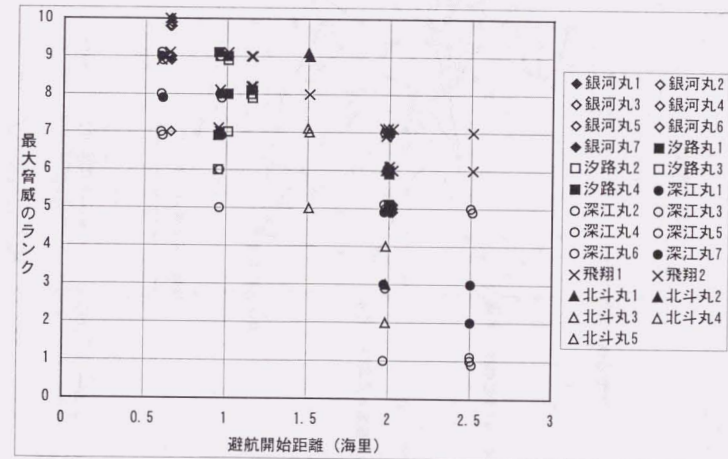


図4.13 一般船にTSL飛翔が左から接近した場合の最大脅威のランク (クラス間比較)

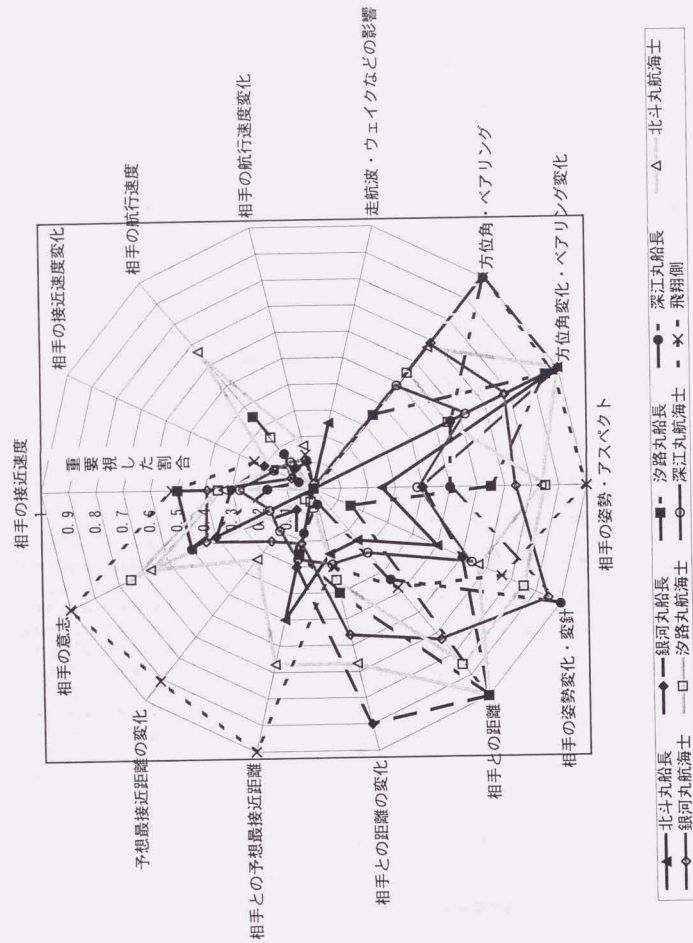


図 4.14 衝突の危険判定に用いた項目の重要視した割合(クラス間比較)

与者または一部の実験ケースのみで重要視した項目は中心の0の値に近くなる。

4.7節でまとめたように、全体としては、ベアリングやアスペクトに関する項目を重要視した割合が高いが、クラスごとにばらつきがある。参加者から得たアンケートの回答、194ケースについて主成分分析をおこない、各項目間の関係を調べた。

表 4.8 に危険判定項目の相関表を示す。主成分分析の結果、有為な主成分は2であり、第一、第二主成分で約41%の情報を集約できた。表 4.9 に、因子負荷量、固有値、寄与率を示す。図 4.15 は、第一、第二主成分平面に項目の因子負荷量をプロットしたものである。主成分による相関の高い項目同士をグループ化すると、4つのグループを抽出できた。相関の高い項目は第一、第二主成分平面上で近くに位置するので、各グループを図中に楕円で示した。図の上部から、1番目のグループは、相手の接近速度とその変化、相手の航速、相手との距離とその変化のグループ、2番目のグループは、ベアリング変化の単独グループ、3番目のグループは、相手の姿勢・アスペクト、方位角・ベアリング、相手の意志、相手との予想最近距離とその変化のグループ、4番目は、相手の姿勢変化・変針の単独グループである。すなわち、衝突の危険判定に用いられる項目は、グループごとにまとめて、用いられていると仮定できる。

表 4.8 危険判定項目の相関表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 相手の接近速度	1.00	0.39	0.44	0.18	0.08	0.02	0.18	-0.15	0.32	0.23	0.22	0.17	0.31
2 相手の接近速度変化	0.39	1.00	0.23	0.09	0.12	0.05	-0.03	-0.23	0.19	0.34	0.38	0.32	0.25
3 相手の航速	0.44	0.23	1.00	0.11	-0.11	0.06	0.03	-0.06	0.21	0.13	-0.02	-0.07	0.11
4 相手の航速変化	0.18	0.09	0.11	1.00	0.09	0.04	0.02	0.08	0.06	0.10	0.15	0.31	0.14
5 方位角・ベアリング	0.08	0.12	-0.11	0.09	1.00	0.26	0.30	0.15	0.07	0.01	0.32	0.33	0.36
6 方位角変化・ベアリング変化	0.02	0.05	0.06	0.04	0.26	1.00	0.25	0.00	0.16	0.11	0.28	0.28	0.14
7 相手の姿勢・アスペクト	0.18	-0.03	0.03	0.02	0.30	0.25	1.00	0.28	0.29	0.14	0.22	0.34	0.43
8 相手の姿勢変化・変針	-0.15	-0.23	-0.06	0.08	0.15	0.00	0.28	1.00	-0.11	-0.08	0.10	0.13	0.30
9 相手との距離	0.32	0.19	0.21	0.06	0.07	0.16	0.29	-0.11	1.00	0.45	-0.03	-0.11	0.16
10 相手との距離の変化	0.23	0.34	0.13	0.10	0.01	0.11	0.14	-0.08	0.45	1.00	0.07	0.12	0.05
11 相手との予想最近距離	0.22	0.38	-0.02	0.15	0.32	0.28	0.22	0.10	-0.03	0.07	1.00	0.69	0.50
12 相手との予想最近距離の変化	0.17	0.32	-0.07	0.31	0.33	0.28	0.34	0.13	-0.11	0.12	0.69	1.00	0.47
13 相手の意志	0.31	0.25	0.11	0.14	0.36	0.14	0.43	0.30	0.16	0.05	0.50	0.47	1.00

表4.9 危険判定項目主成分分析結果 (因子負荷量)

	x_i	z_1	z_2
1	相手の接近速度	0.51338	0.54213
2	相手の接近速度変化	0.51458	0.43779
3	相手の航行速度	0.21006	0.56901
4	相手の航行速度変化	0.32418	0.03016
5	方位角・ベアリング	0.51471	-0.34076
6	方位角変化・ベアリング変化	0.41242	-0.11211
7	相手の姿勢・アスペクト	0.55622	-0.18821
8	相手の姿勢変化・変針	0.16099	-0.52795
9	相手との距離	0.32201	0.55810
10	相手との距離の変化	0.34613	0.51198
11	相手との予想最接近距離	0.72697	-0.25548
12	予想最接近距離の変化	0.73793	-0.33218
13	相手の意思	0.73233	-0.20162
	固有値	3.2807	2.0429
	寄与率 (%)	25.24	40.95

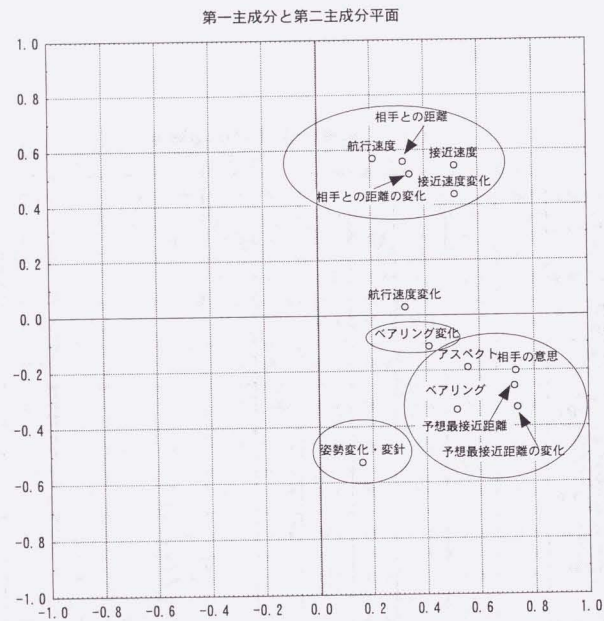


図 4.15 危険判定に用いた項目の主成分分析結果

操船者が衝突の危険判定をする場合は、漠然と情報を集めているのではなく、遭遇状況を認識する各自のモデルを持っていて、それに必要な情報を収集していると考えられる。本研究で抽出したグループは、その情報の項目の集まりを示していて、各操船者は、これらグループ群の1つ、または複数を用いていると解釈できる。

これら、主成分分析の結果得られた4つのグループに、各クラスの重要視した割合の高い項目を対応させると、各クラスを次のように分類できる。1番目のグループには、銀河丸と汐路丸の船長クラスと、北斗丸と汐路丸の航海士クラスおよびTSL飛翔が属し、2番目のグループには、北斗丸、銀河丸と汐路丸の船長クラス、北斗丸と銀河丸の航海士クラスおよびTSL飛翔が属し、3番目のグループには、銀河丸船長クラスと北斗丸、銀河丸と汐路丸の航海士クラスおよびTSL飛翔が属している。4番目のグループには、深江丸の船長クラス、北斗丸、銀河丸と汐路丸の航海士クラスおよびTSL飛翔が属している。深江丸の航海士クラスは、全項目を用いており、所属するグループがはっきりしなかった。以上のように、船長クラスは、用いている項目のグループが少ない傾向にある。

衝突の危険減少判定に用いた項目についても、図4.16に示すように、同様にクラス別に集約した。表4.10に危険減少判定項目の相関表を示す。主成分分析の結果、有為な主成分は2であり、第一、第二主成分で約55%の情報を集約できた。表4.11に、因子負荷量、固有値、寄与率を示す。

表4.10 危険減少判定項目の相関表

	1	2	3	4	5	6	7	
1	相手の接近速度の減少	1.00	0.26	0.20	-0.46	0.54	0.42	0.28
2	相手の航行速度変化	0.26	1.00	0.06	-0.06	0.42	0.09	0.10
3	方位角変化・ベアリング変化	0.20	0.06	1.00	0.02	0.26	0.33	0.32
4	相手の姿勢変化・変針	-0.46	-0.06	0.02	1.00	-0.30	-0.19	-0.01
5	相手との距離の変化	0.54	0.42	0.26	-0.30	1.00	0.27	0.36
6	予想最接近距離の増加	0.42	0.09	0.33	-0.19	0.27	1.00	0.37
7	相手の意志の確認	0.28	0.10	0.32	-0.01	0.36	0.37	1.00

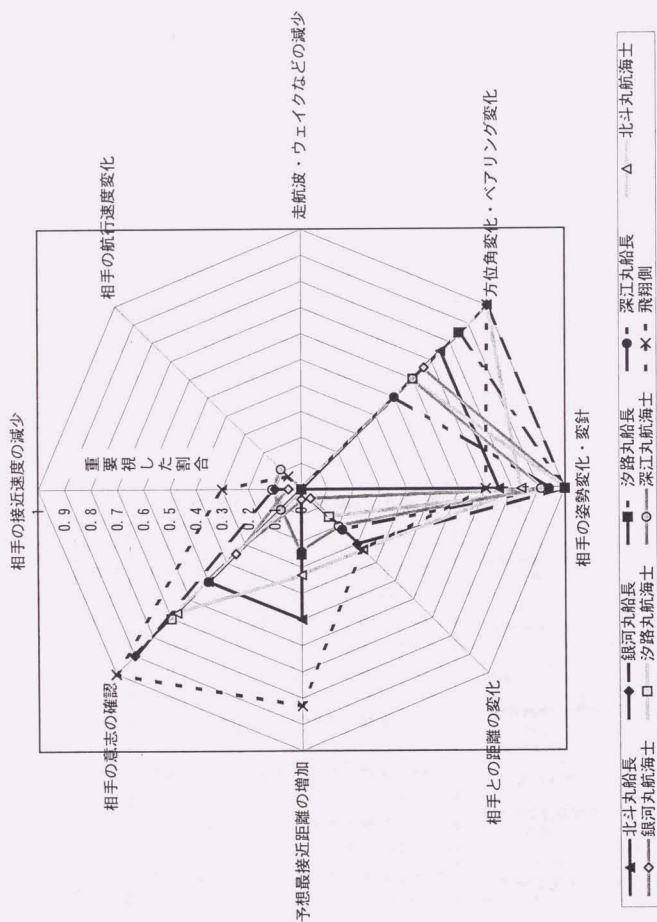


図 4.16 衝突の危険減少判定に用いた項目の重要視した割合(クラス間比較)

表 4.11 危険減少判定項目主成分分析結果 (因子負荷量)

	x_i	z_1	z_2
1	相手の接近速度の減少	0.78885	0.27762
2	相手の航行速度変化	0.43661	0.28920
3	方位角変化・ペアリング変化	0.48066	-0.60144
4	相手の姿勢変化・変針	-0.46077	-0.60508
5	相手との距離の変化	0.77657	0.18084
6	予想最近距離の増加	0.64411	-0.29541
7	相手の意志の確認	0.58646	-0.48620
	固有値	2.6181	1.2449
	寄与率 (%)	0.37	0.18

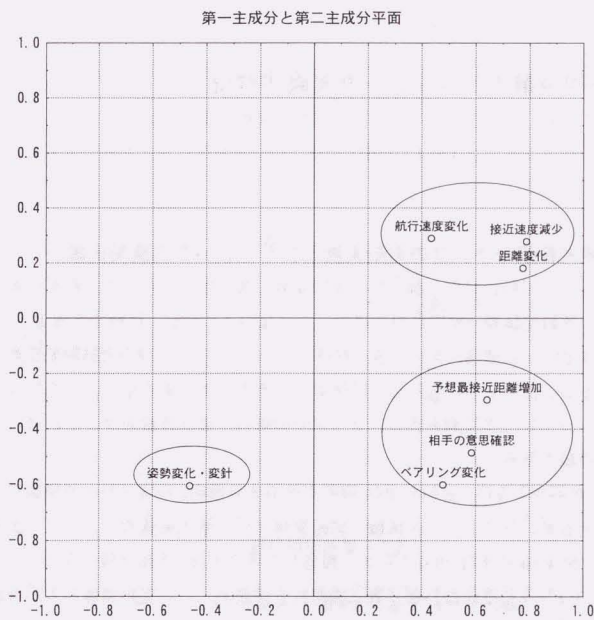


図 4.17 危険減少判定に用いた項目の主成分分析結果

図 4.17 は、第一、第二主成分平面に項目の因子負荷量をプロットしたものである。主成分による相関の高い項目同士をグループ化し、図中に楕円で示した。1 番目のグループは、相手の接近速度減少、相手との距離の変化のグループ、2 番目のグループは、相手との予想最接近距離の増加、相手の意志確認、方位角変化・ベアリング変化のグループで、相手の姿勢変化・変針は単独グループであった。

これを基に、参加者の各クラスを分類すると、2 番目のグループには、北斗丸、銀河丸、汐路丸の船長クラスと航海士クラス、TSL 飛翔が属し、単独グループの相手の姿勢変化・変針単独には、全てのクラスが属している。

主成分分析により、危険判定、危険減少判定に用いる項目をグループ化でき、操船者の遭遇状況を認識するモデルによって、情報項目のグループが使い分けられていることが推察できた。船長クラスは、確固としたモデルを持ち、少数の情報項目で集中して判断している。航海士クラスは、実験の形態上、広く情報収集できる立場にあったこともあり、複数の項目グループの情報を収集し、遭遇状況を認識するモデルを複数同時に用いる傾向にある。

4.9 実船実験とシミュレータ実験間解析

参加者のうち、船長は、シミュレータ実験と実船実験の両方に参与した。そこで、実験の際実施したアンケート(表 4.1 参照)の彼らの回答を基にシミュレータ実験と実船実験の比較をおこなった。

4.9.1 最大脅威のランクの実船実験とシミュレータ実験間比較

シミュレータ実験の日程の都合や、実船実験の数が限られたため、必ずしも、シミュレータ実験と実船実験が一对一の対応になっていない。しかし、比較できるように、図 4.18 および図 4.19 に、各遭遇における最大脅威のランクと TSL 飛翔の避航開始距離との単相関グラフを示し、考察する。凡例は、評価者である参加者の別を示し、黒ぬりは実船実験、白ぬきはシミュレータ実験を表し、グラフ中の線は、最大脅威のランクと避航開始距離の対数近似曲線である。

図 4.18 が示すように、右から TSL 飛翔が接近する場合、シミュレータ実験ケースが少ないこともあるが、シミュレータ実験と実船実験では、最大脅威のランクに、あまり差が見られない。図 4.19 の TSL 飛翔が左から接近した場合では、実船実験とシミュレータ実験で、最大脅威のランクに差がない参加者(銀河丸と汐路丸)と、実船実験の方が脅威を厳しく評価している参加者(北斗丸と深江丸)がある。TSL 飛翔の避航開始距離が問題となる 2 海里未満に注目した場合、シミュレータ実験において、深江丸船長の最大脅威のランクが他者に比べて低いことは、実験に用いたシミュレータで、距離感、アスペクト等の情報の

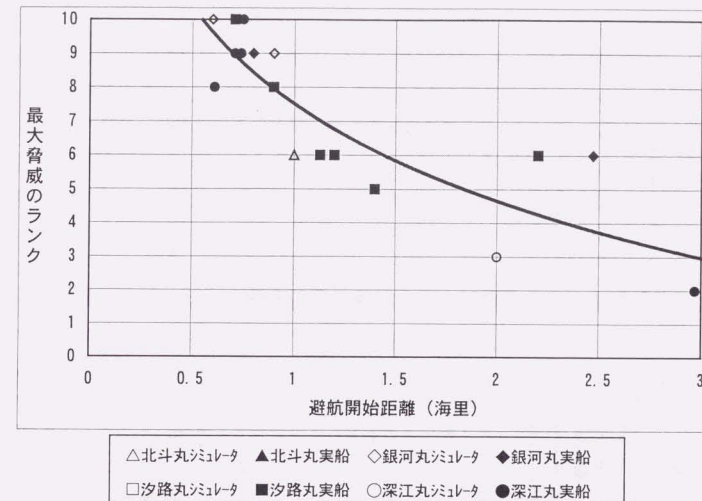


図 4.18 一般船にTSL飛翔が右から接近した場合の最大脅威のランク (実船/シミュレータ実験間比較)

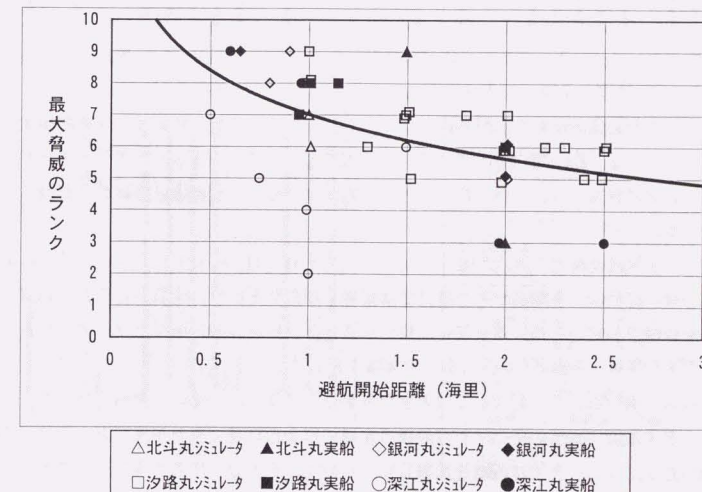


図 4.19 一般船にTSL飛翔が左から接近した場合の最大脅威のランク (実船/シミュレータ実験間比較)

欠落があることを示していると推察される。

また、対数近似曲線から、避航開始距離 1 から 1.5 海里を境に、それ以内でランクの評価値の傾きが急になり、それ以後では緩やかになっていて、1 から 1.5 海里が変曲点といえる。

実船とシミュレータでは、参加者の最大脅威のランクに定性的な違いはなく、操船者の特徴抽出のツールとして用いることができることがわかった。しかし、定量的な値が求められるようにするためには、シミュレータに距離感や相手船のアスペクト情報の欠落対策を施す必要がある。

4.9.2 危険判定項目と危険減少判定項目の実船実験とシミュレータ実験間比較

危険判定に用いた項目に、実船実験とシミュレータ実験とで違いがあるかを比較した。図 4.20 (1) ~ (5) は、各参加者が各項目を重要視した割合を船別に示したグラフである。クラス間の比較時と同様に、縦軸は、各参加者すなわち各船長がその項目を重要視した割合を示し、それぞれ危険判定する際に最重要もしくは重要とした項目を船ごとに全実験ケース分累積し、実験数で除した値である。船長がいずれの実験ケースにおいても常に重要視している項目は、縦軸の 1 の値に近くなり、少数のケースでのみ重要視したものは 0 の値に近くなる。黒ぬりが実船実験、白ぬきがシミュレータ実験を表している。

実船とシミュレータでは大きな差が見られないが、速度に関して、一般船では、実船実験時に重要視した割合が高く、TSL 飛翔の実物に対したときには、その速度の速さに注意が向けられていると思われる。TSL 飛翔で、シミュレータ実験時の速度に関する項目の重要視度が高いのは、この場合の自船が内航タンカーであったことと TSL 飛翔の速度等の実態を知っていたことによると考えられる。

また、予想最接近距離およびその変化が、シミュレータ実験に重要視した割合が高くなったが、これは、4.4.3 節で述べたように、実験に用いた操船シミュレータでベアリングを取ることが困難なため、それを補うために、将来値である予想最接近距離を重要視したためである。

次に、危険減少判定に用いた項目について、図 4.21 (1) ~ (5) に示すように、船別に集約した。縦軸は、各船長がその項目を重要視した割合を示し、危険判定項目と同様、船長が危険減少判定した際に重要視した割合が高いと、縦軸方向に棒グラフが高くなる。黒ぬりが実船実験、白ぬきがシミュレータ実験を表している。

やはり、実船とシミュレータでは大きな差が見られない。一部の一般船において、シミュレータ実験時に距離の変化と予想最接近距離の増加の項目で重要視度が高いのは、実験に用いたシミュレータでは距離を把握しにくいので、その分、注意を喚起したこと、ベアリングを取ることが困難なので、将来値である予想最接近距離で補足したためである。操船者は、遭遇状況を認識するモデルを用いて、それに必要な情報を収集するため、実船と

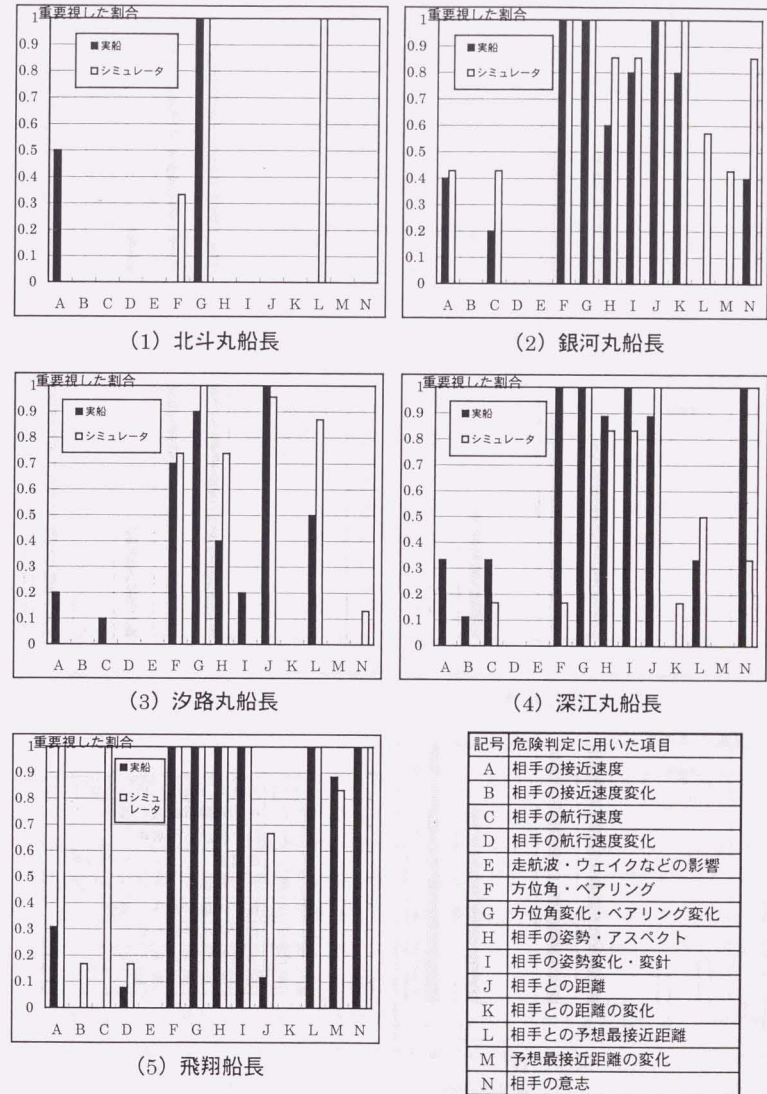
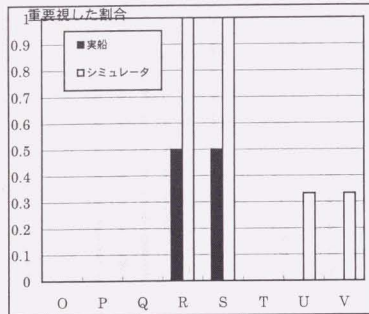
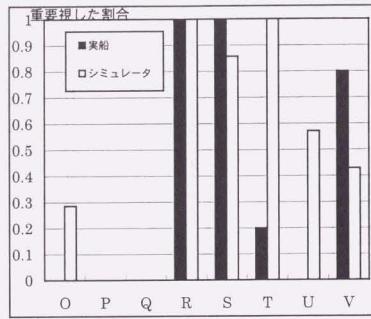


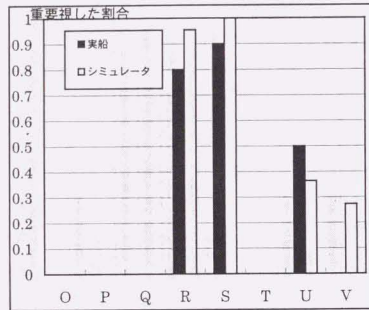
図 4.20 危険判定に用いた項目の重要視した割合 (実船/シミュレータ間比較)



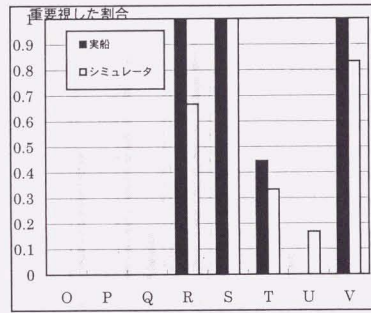
(1) 北斗丸船長



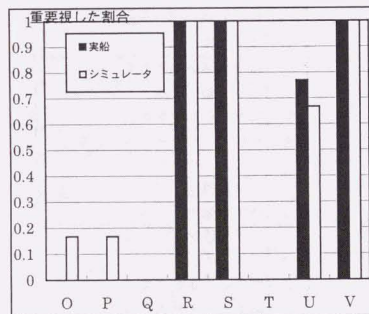
(2) 銀河丸船長



(3) 汐路丸船長



(4) 深江丸船長



(5) 飛翔船長

記号	危険減少判定に用いた項目
O	相手の接近速度の減少
P	相手の航行速度変化
Q	走航波・ウェイクなどの減少
R	方位角変化・ベアリング変化
S	相手の姿勢変化・変針
T	相手との距離の変化
U	予想最接近距離の増加
V	相手の意志の確認

図 4.21 危険減少判定に用いた項目の重要視した割合
(実船/シミュレータ間比較)

シミュレータ間で、参加者の危険判定および危険減少判定に用いた項目の重要視度に大きな違いはないことが明らかになった。しかし、実験に用いたシミュレータには、ベアリングや距離感について情報の欠落部分があり、それを補うため、シミュレータ実験時に別の情報項目を用いたり、当該項目の重要視度の変化が見られた。

4.10 参加者クラス間解析および 実船とシミュレータ実験間解析のまとめ

TSL 飛翔と一般船間の安全な航行方法について、参加者をクラス分けし、航行の安全に関する意見や考え方をクラス間で比較検討して考察をおこなった。さらに、実船実験とシミュレータ実験の結果についても比較検討をおこなった。その結果についてまとめると次のようになる。

- ① 実船実験時の最大脅威のランクについて、参加者クラス間の比較から、一般船側よりも、TSL 飛翔側が遭遇のどの段階においても、状況認識を厳しくしていること、TSL 飛翔の避航開始が望まれる避航開始距離 2 海里以内では、TSL 飛翔との遭遇を、航海士クラスよりも、船長クラスの方が厳しく認識していること、それ以外では、操船者によって差があることがわかった。
- ② 主成分分析により、危険判定、危険減少判定に用いる項目をグループ化でき、操船者の遭遇状況を認識するモデルによって使い分けられていることが推察できた。船長クラスは、確固としたモデルを持ち、少数の情報項目で集中して判断している。航海士クラスは、実験形態上、広く情報収集できる立場にあったこともあり、複数の情報とモデルを同時に用いている傾向にある。主成分分析に用いる項目を検討することにより、操船者の航行安全を確保するための情報を取り扱うモデルの解析やそれを踏まえた支援方法、航行方法の検討への発展が見込まれる。
- ③ 実船実験とシミュレータ実験結果の比較から、操船シミュレータを用いることにより、航行安全における操船者の特徴抽出等をおこなうことができることが明らかになった。一方、操船シミュレータにおいて従来から一般に指摘されている距離感や相手船のアスペクト情報の欠落対策は、高速船においても重要である。しかし、同時に、情報の補い方について観測でき、知見を得ることができた。
- ④ 以上のことから、操船シミュレータを用いることにより、操船者の情報収集、状況把握および状況判断のモデル化をはじめとする操船者の安全航行に関するヒューマンファクターの調査および解明が有効におこなえることが明らかになった。

4.11 結言 — 高速船の安全な航行方法 —

各所で、高速船と一般船との遭遇が頻繁になるにつれ、航法についての新たな検討が必要ではないかという意見が出ている⁽³²⁾。これらでも指摘されているが、従来からいわれている、操船者が基本的な操船技法（マナーを含む）を大切にしなければならないということが、本研究の一連の実験でも何度も指摘された。本研究の実験参加者は、その所属から、安全サイドに立った操船者といえるので、広い範囲の操船者に対しても、TSL 飛翔のような高速船の安全な航行方法の指針となる点が、実船およびシミュレータ実験を通じて抽出できた。さらに、実船実験との比較により、操船シミュレータが、海上交通におけるヒューマンファクターの研究に有効であることが明らかになった。

最後に、本研究得られた安全航行の指針をまとめると次の通りになる。

- (1) 一般的、基本的な操船技法を大切にすること。
 - (2) (1) の基本的な操船技法の範ちゅうといえるが、特に指摘されたこと。
- ① TSL 飛翔の運動・操縦性能を、前もって広く知らせる必要がある。
 - ② 脅威は急速に高まってくるので、遭遇船相互の航法措置を早めにとること。特に、TSL 飛翔の避航開始が望まれる 2 海里以内、1~1.5 海里が変曲点となって、脅威のカーブが変化する。
 - ③ TSL 飛翔は甲板艦装制約上、前後部マストの間隔が短い、これらの特色を持つ高速船の避航措置としては、他船が明瞭に判断できるように、できるだけ大きい角度の変針をおこなうこと。
 - ④ 避航の意志を示す動作が小さな角度にならざるをえない場合でも、相手船の船尾に自船の船首を向ける意志表示が、相手船に理解してもらうために効果が大きい。

5 航行援助施設の安全性向上

5.1 緒言

船舶航行は、操船者、船舶、環境の 3 つの要素から構成され、それぞれに海上交通の安全に果たす役割が大きい。前章までは、これら 3 つの要素のうち、主として操船者と船舶（高速船）を対象として、高速安全航行のための評価手法および評価指標、操船支援の効果について述べ、TSL 飛翔を対象として安全な航行方法について検討してきた。この章では、航行環境を主対象として、高速船を含んだ海上交通において、その安全な航行を確保するために重要な役割を担い、かつ行政の責任において整備される航行援助施設の安全性向上について検討する。

航路を示す灯浮標や灯台等の航行援助施設は、現在十分設置が行き渡り、船舶の安全航行の重要な役割を果たしている。しかし、海難事故を減らし、さらなる海上交通の安全性向上のためには、より効果的な仕様と配置が求められている。また、設置・管理する側だけでなく、利用する操船者の視点を盛り込むことが、使いやすく、さらに安全な航行環境を提供するという点で必要とされてきている。

日本有数の交通の難所である関門海峡における夜間航行では、関門港関門航路を示す灯浮標が、その背景にある陸上の光（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ることがある。また、図 5.1 が示すように、旧関門港関門航路の一部（以下、関門航路という）は水深が十分でないため、関門航路第五号および第六号灯浮標の箇所が屈曲している。このことが、操船者が航路を認識することをさらに困難にし、同航路の航行を難しいものになっている。

そこで、このような困難を解消し、船舶が安全に航行できるように、関門海峡を浚渫した上、同航路を変更して、灯浮標を再配置する工事が 1996 年 1 月 4 日に実施された。

船舶技術研究所では、海上保安庁、航海訓練所と共同研究を実施し、関門航路設定工事の前に、変更後の航路がその認識の容易さにおいて効果があることを確認するための作業をおこなった。

一般的に、どのような航路標識をどのように配置するかについては、その地域の地理的条件や船舶航行の実態を考慮して決定されているが、日時の経過と共に変化する陸上の灯火や船舶の航行実態等、標識環境への対応が求められる一方、灯浮標の場合は電源に制約があるので、いたずらに光力を上げることはコスト面から無理がある。光の見え方の問題は、多分に観測者側の要素を有している。従って、見易いか否かの検討にあたっては、実際に視認し比較することが必要となり、まして机上計画のみでは不可能である。

そこで、特に夜間において、より効果的に航路航行環境について検討できるよう、技術の進歩の著しい操船シミュレータを航路の検討に利用することを図った。

関門航路の設定工事前に、操船者が再配置後の灯浮標を容易に認識できることを、船舶技術研究所にある操船シミュレータ上で確認した。このシミュレータ実験のためには、操船シミュレータのCGIによる景観画像が、灯浮標等の航路標識の灯火とそれらの見え方を妨げる背景光の両方を評価するのに十分なまでに表現できなくてはならない。そこで、操船シミュレータ上で、このような灯火を表現する手法を検討し、関門航路の灯火表現に適用してその視認性の評価をおこなった。

さらに、操船シミュレータ上の灯火の表現手法を改良し、再度、関門航路を対象として、航路の視認性を高める方策についてシミュレータ実験で検討し、一般的なCGIのポリゴンによる灯火表現の手法の確立を図った。

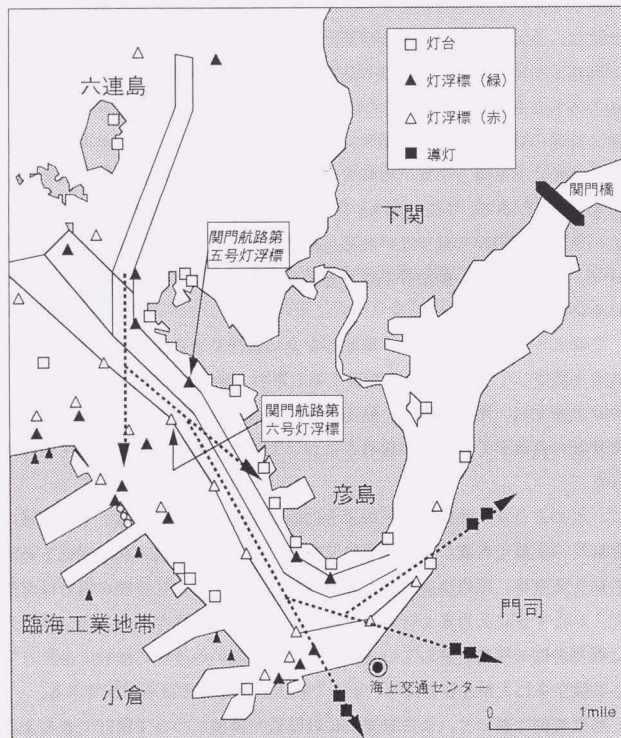


図 5.1 旧関門航路の概略図

5.2 関門航路の問題点と変更点⁽⁶⁷⁾

5.2.1 旧関門航路の問題点

先に述べたように、旧関門航路は、水深が十分でないため、関門航路第五号および第六号灯浮標の箇所では屈曲している。関門航路では、東行の場合、図 5.1 の破線が示すように、船舶は導灯を目標にして航行する。導灯の 2 つの灯火が鉛直線上にのるようにすれば、自船は関門航路上を最も望ましい針路をもって航行しているということがわかる。しかし、旧関門航路の東行では、第一導灯にのる前にまず、背景光の多い臨海工業地帯に向かい、次に明かりの少ない彦島寄りに航行し、そのあとに第一導灯にのることとなる。この際、周辺の街や臨海工業地帯の光がじゃまをして、操船者が灯浮標を認識することを困難にしている。この問題をはじめとする旧関門航路の問題点を以下に整理する。

- ①六連島東水路から関門航路に進入する際、90 度近い大変針の必要があり、西行する船舶との行き会い関係もあってオーバーランの傾向がある。
- ②背景光、輻射する船舶の灯火および船体等により灯浮標の灯火が見失われたり、隠れて見えにくい。
- ③関門航路第五号および第六号灯浮標の箇所では航路が屈曲しているため、東行の場合、関門航路に入り、第一導灯にのるまでに、臨海工業地帯に向かいさらに彦島寄りに航行するという手順を踏む必要があり、航路の認識に難点を残している。
- ④強潮流や追い越し関係を生じたときは、操船に気を惹かれがちになり、航路内航行中の確認は、浮標の位置やその灯火の光力いかんによっては、困難なものとなる。
- ⑤多数の分岐航路が存在する。

図 5.2 に、本シミュレータ実験において表現した旧関門航路の航路標識（灯浮標、灯台、導灯）と著目標（海上交通センター、プラントの煙突、ガスタンク）を示す。

5.2.2 変更後の関門航路の概要

旧関門航路の問題点を考慮して、変更後の関門航路では、以下のような点が改善される（図 5.3 参照）。

- ①航路幅が拡張される。
- ②関門航路第五号から第十五号灯浮標までと、関門航路第六号から砂津航路第二号灯浮標までが直線航路となる。
- ③関門航路第五号から第十五号までの各左舷灯浮標と、関門航路第八号から第十四号までの各右舷灯浮標および砂津航路第二号灯浮標までの灯質が揃い、同期点滅をおこなう。

以上のことにより、先に述べた問題点が大幅に解消され、関門航路の航行が容易になることが期待されている。このことを船舶技術研究所にある操船シミュレータで確認するシミュレータ実験をおこなった。



図 5.2 旧関門航路の航行援助施設配置



図 5.3 変更後の関門航路の航行援助施設配置

5.3 操船シミュレータ上の灯火表現手法⁽⁵⁸⁾⁽⁵⁹⁾⁽⁶⁰⁾⁽⁶¹⁾

5.3.1 灯浮標の光度表現

実際の世界では、光の光色および光度は、たいへん広く分布している。表 5.1 に関門航路の灯浮標と灯台の一部の諸元表を示す。この表が示すように、関門航路を示す灯浮標をとっていても、一番暗い灯浮標である関門第二航路第二号灯浮標の光度 27 カンデラから、一番明るい灯浮標である関門航路第六号灯浮標の光度 264 カンデラまで広く分布している。一方、CGI では、狭い範囲しか輝度を表現できない。シミュレータ上で灯浮標を実物と同じ光度で表示することは不可能である。

そこで、CGI で表現した各灯浮標間の光度の比が、実物の灯浮標間の光度と同じ比で表現できるように、灯浮標の光源部分のオブジェクト（CGI で表示される物体）を作成することとした。

まず、操船シミュレータの景観画像が表示されるスクリーン上で、プロジェクターが表示する色の輝度を測定し、一番明るい灯浮標光源部オブジェクトの適切なカラーパレットの明るさをなわち輝度とポリゴン（色付きの多角形）のサイズを求めた。それを基準にして、他の灯浮標光源部オブジェクトにおけるカラーパレットの明るさとポリゴンのサイズを決定し、各灯浮標光源部オブジェクト間の光度の比が実物と同じになるように設定した。なお表 5.1 に示した例では、関門航路第五号、第六号灯浮標、関門第二航路第二号灯浮標、下関福浦防波堤灯台の実物の光度は、それぞれ 173:264:27:886、比は 6.4:9.8:1:33 である。Level-of-Detail 2 と 3（詳細は次節 5.3.2 にて）の光度は、それぞれ 32.4:49.0:5.0:165、比は 6.4:9.8:1:33 となり、実物と同じ比である。

表 5.1 関門航路の灯浮標および灯台諸元表（一部）

標識名	光度	灯質	Level-of-Detail1	Level-of-Detail2	Level-of-Detail3
			輝度 カラーパレットの値 ポリゴンサイズ 光度	輝度 カラーパレットの値 ポリゴンサイズ 光度	輝度 カラーパレットの値 ポリゴンサイズ 光度
関門航路 第五号灯浮標	173 カンデラ	FlG3s	14.4カンデラ/m ² G224 1.5m×1.5m 32.4カンデラ	3.6カンデラ/m ² G138 3.0m×3.0m 32.4カンデラ	0.9カンデラ/m ² G89 6.0m×6.0m 32.4カンデラ
			関門航路 第六号灯浮標	264 カンデラ	Fl(2)R6s
関門第二航路 第二号灯浮標	27 カンデラ	Fl(2)R6s			
			下関福浦 防波堤灯台	886 カンデラ	FFI(2)G8s

5.3.2 灯浮標のサイズ表現

さらに CGI において一般的となっている Level-of-Detail の手法を、灯火を表現するために適したものに改良した。この改良した Level-of-Detail の手法（以下、改良型 Level-of-Detail 手法と呼ぶ）を、前節 5.3.1 で設定した灯浮標のカラーパレットの明るさとポリゴンのサイズに適用することにより、航行シミュレータ景観画像の中で、灯火を適切に表現することができた。

図 5.4 の模式図が示すように、一般的な Level-of-Detail の手法は、視点近くのもの、精密に描いたオブジェクトを表示し細かい観察にも耐えられるようにし、視点から遠いところでは細かいところまで見えないので粗く描いたオブジェクトを表示することにより、シミュレーション全体の描画更新速度を確保するための手法である。この一般的な手法の場合、Level-of-Detail1 および 2 のオブジェクトの大きさは一定である。オブジェクトが視点から近づくかまたは遠ざかり、Level-of-Detail の変換点に来たところで、別の Level-of-Detail のオブジェクトに入れ替わる。

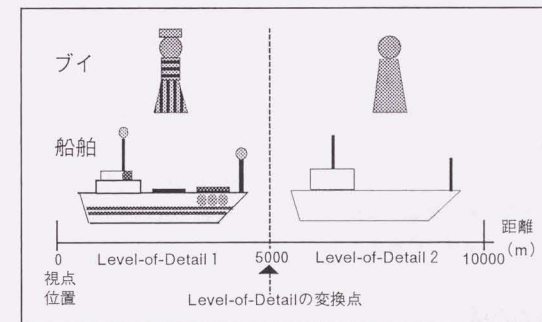


図 5.4 一般的な Level-of-Detail の手法

しかし、本研究が対象としている灯火のシミュレーションでは、灯浮標本来の大きさでオブジェクトを作成すると、視点位置に近いところでは適切な大きさに見えるが、遠くなるにつれて、スクリーン上で見ることができる最小単位 1 ピクセルよりも小さくなって、表示されない。これを図 5.5 に模式図で示す。図の下方が視点位置である。視点位置近くでは Level-of-Detail1 の詳細なオブジェクトが表示される。図の上方ほど視点位置から離れ、Level-of-Detail の変換点にくると Level-of-Detail2 のオブジェクトに入れ替わる。さらに視点から離れた位置では、船舶のような大きなオブジェクトでは問題ないが、灯浮標のような小さなオブジェクトは最小単位 1 ピクセルよりも小さくなって、依然灯浮標灯火の情報が必要とされる位置であるにもかかわらず表示されないという現象が起きてしまう。

これを防ぐために改良型 Level-of-Detail 手法では、各灯浮標光源部オブジェクトのポリゴンサイズは、視点から離れた位置で表示される Level-of-Detail のオブジェクトほど大きく作成する。これにより、スクリーン上で必ず 1 ピクセル以上になっており、消えてしまうことがない。しかし、オブジェクトの輝度が各 Level-of-Detail において同じままでは、ポリゴンサイズが大きくなる分面積が広がるので光度が増してしまい、Level-of-Detail が変わった途端、同じ灯浮標なのに急激に明るくなってしまふ。光度自体が重要な情報となる灯火のシミュレーションでは、光度を忠実に模擬しなくてはならないので、ポリゴンサイズが大きくなった分だけ輝度を下げることが必要になる。

図 5.6 のように、改良型 Level-of-Detail 手法では、視点位置から遠ざかるに連れて、灯浮標光源オブジェクトのポリゴン面積を、4 倍ずつ大きくし、カラーパレットの明るさをなわち輝度を 4 分の 1 ずつ小さくすることにより、スクリーン上で、Level-of-Detail の変換点の前後における光度を一定に保つことを実現した。このシミュレーションでは 10,000m 先から灯浮標が見えるように設定してあり、5,000m、2,500m の Level-of-Detail の変換点でオブジェクトが入れ替わる。光度が一定に保たれているので、観測者が、オブジェクトが入れ替わり、面積が 4 倍になったことに気づかないほど違和感がない。

本実験で用いられたプロジェクターでは、輝度の性能の関係で、2,500m の変換点で、面積は 4 分の 1 になるが、輝度は 4 倍にすることができず、光度が不足する灯浮標も一部存在する (表 5.1 に示した関門航路第六号灯浮標の Level-of-Detail1)。しかし、すでに、灯浮標を特定できる大きさになっているので、光度が完全に一致していなくても、問題はないと考えている。それ以遠では、灯浮標の確認がしにくいので、光度の急激な変化は関門航路の航行に必要な情報の欠如となる。ゆえに、5,000m の変換点では光度を一定に保つことが不可欠であり、本実験では実現できている。

5.3.3 背景光の表現

背景光は無数の点光源の集まりであり、厳密には、光点の大きさ、密度、明るさ、点滅のあるなし等の要素があげられる。これらの要素を考慮し、実物と同様な、かつ灯浮標との対比までを考慮した厳密なモデル化は現時点では困難である。ここでは、灯火の視認性を妨げるという観点でモデル化をおこなった。背景光を表現するにはテキストチャッピングの手法を用いることが適当と考えた。これは、背景光が存在する位置に罫をたてて、そこに背景光の写真を壁紙のように張り付けることに相当する。

使用している画像用コンピュータの能力の制限から、6 種類のパターンの背景光テキストチャを用いることにした。実際の夜間の風景をビデオ撮影し、この映像を参考にして、パソコンのペイントツールでテキストチャを作成した。図 5.7 にその例を示す。上半分が光点の密度が高く、強力な光点がある背景光を表現したテキストチャであり、下半分が光点の密度が

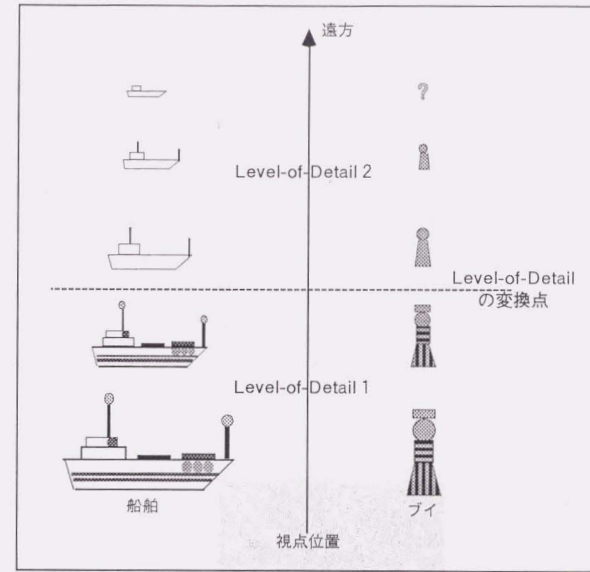


図 5.5 一般的な Level-of-Detail 手法適用時の模式図

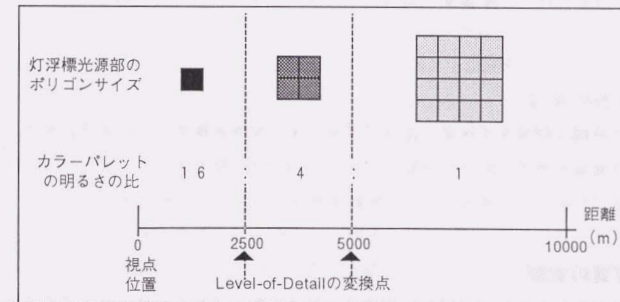


図 5.6 灯浮標の灯火表現の基本的な考え方

低い背景光を表現している。

ビデオの画像と地図を参考にして、実際に背景光の多いところは光点の密度の高い背景光テキストチャ（例：図 5.7 上半分）を、少ないところは光点の密度の低い背景光テキストチャ（例：図 5.7 下半分）を配置した。

これらのテキストチャはバックグラウンドを透明にしている（図 5.7 の黒の部分）。これにより、航路がずっと奥に入っているようなところに奥行き感を出すことが可能になった。また、2枚重ねて用いることにより、光の多さや配置等の変化をつけることができた。

本実験で用いた背景光テキストチャでは、視点位置からの距離に関係なく、1つのオブジェクトなので、視点位置近くではテキストチャの細かい点光源が見えるが、遠いと大きな点光源しか見えず、背景光全体として遠いと暗く、近いと明るいという現象が起こってしまう。これを解決するためには、灯浮標と同様、改良型 Level-of-Detail 手法を用いる必要がある。しかし、本実験では、使用している画像用コンピュータの能力の制限から、これ以上、テキストチャを増やすことができなかったので実現していない。

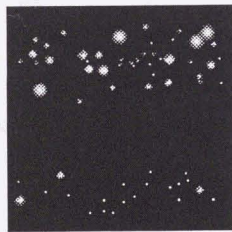


図 5.7 シミュレーションで用いたテキストチャの例

5.3.4 灯台の表現

灯台も灯浮標と同様な手法で、ポリゴンサイズと輝度を決定し、灯浮標の光度と灯台の光度の比は実物と同じになっている。表 5.1 が示すように、灯台は灯浮標よりも一桁明るいので、ポリゴンのサイズを大きくして光度を稼いでいる。

5.3.5 灯質の表現

灯浮標や灯台は、それぞれ固有の灯質（固有の光色、点灯と消灯のリズム）を持っている。表 5.1 に示した灯質を表す記号において、例えば、関門航路第六号灯浮標の灯質は、F1(2)R6s であるが、これは F1(2)が 2 閃光であること（1 閃光の場合は数字を省略）、R が灯

火の灯色が赤であること（G は緑）、6s は周期が 6 秒間であることを示している。これら灯質を表す記号は海図の上に表記されていて、操船者はこれを基にして灯浮標を認識する。よって、灯質を模擬することも重要である。

灯質の模擬はタイマー関数を用いて実現した。本シミュレーションでは描画の更新が 1 秒間に 10 枚であるので、0.1 秒単位で灯質を模擬することができる。

5.3.6 導灯の表現

導灯は、狭水道、狭い湾口を航行する場合に、船舶に最適針路を示すため、位置および高さの異なる 2 つの灯火を設置したもので、最適針路にのれば、これら 2 つの灯火は鉛直線上に視認される。また、導灯は側感性が重要である。側感性とは、導灯を構成する 2 つの灯火のずれを感じる感度のことである。2 つの灯火を上下角 3.5 分の位置に設置した場合に側感性が最大であるとしている。関門航路の導灯もこれに基づいて設計、設置されている。

よって、CGI による表現においては、2 つの灯火が、シミュレーション実行中、常にはつきりと視認され、なおかつ側感性を損なわないように、導灯のポリゴンサイズとカラーパレットを決定した。手法は、灯浮標と同様である。

5.4 操船シミュレータ上の灯火表現の評価⁽⁶²⁾

5.4.1 評価の概要

灯火表現の評価方法の流れを図 5.8 に示した。まず、灯浮標および灯台の諸元表と実態調査から灯火のモデル化をおこなった。また、背景光のモデル化もおこなった。ここで作成した灯火モデル、背景光モデルを基に景観画像を作成し、シミュレータ実験をおこなって、このモデルの評価をおこなった。ここでは、光という物理量をいかに視覚情報としてモデル化するかという点について検討をおこなった。すなわち、CGI 上で実現可能な要素と実現不可能な要素についての種分けをおこなった。これについては前節 5.3 で述べているので省略する。

次に、この灯火モデル、背景光モデルを、旧関門航路に適用し、関門航路の航行経験者複数によって、シミュレータ実験をおこなって、灯火表現の評価をおこなった。評価の手法としては、この実験に関してアンケート調査および自由討論をおこなった。旧関門航路を対象として、モデル化、シミュレータ実験、評価をおこなうことにより、本来灯火がその役割上機能として備えていなくてはならない要素を含んだモデル化が可能となる。このモデル化が正しくおこなわれることによって、変更後の関門航路に対する客観的な評価がおこなえる。旧関門航路のモデルを、変更後の関門航路に応用し、その認識の容易さを確認するために、関門航路の航行経験者複数によって、シミュレータ実験をおこなった。

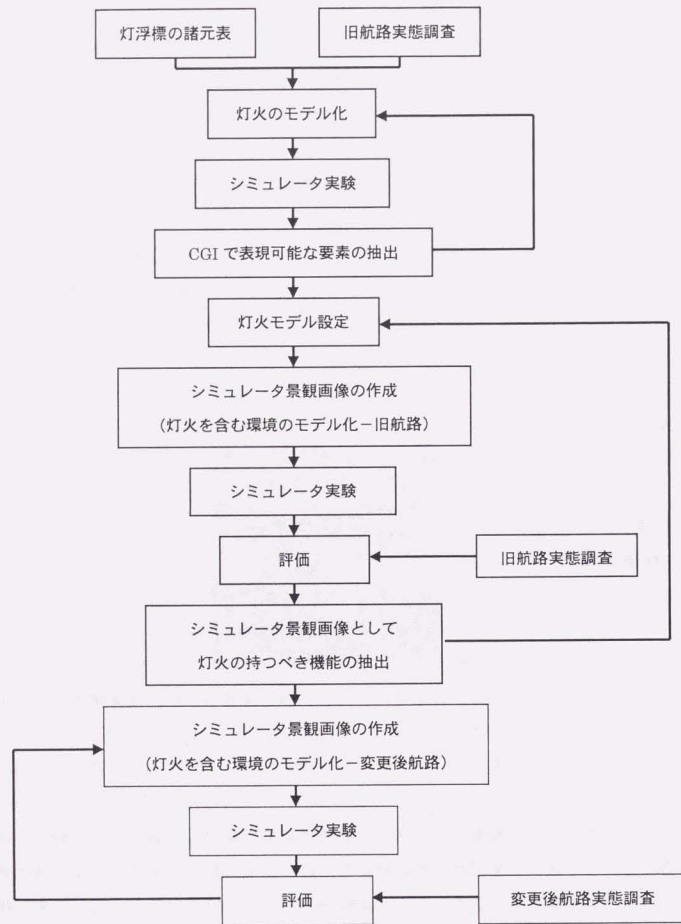


図 5.8 評価のフローチャート

さらに、移設工事後の関門航路に関して、工事直後だったため少数ではあるが、関門水先人会事務所の関係者の方から意見を収集した。

5.4.2 シミュレータ実験

変更後の関門航路に対する認識の容易さを確認するために、シミュレータ実験をおこなった。

評価者は、航海訓練所と海上保安庁の関門航路操船経験者、海上保安庁の本庁と第七管区の灯台部および試験研究センターの航路標識担当者、計 27 人である。

操船シミュレータの自船は 3,000 トンの内航タンカー、自船の眼高は 13m とした。この視点位置から見ることでできる船橋からの景観画像が操船シミュレータのスクリーン上に表示される。この景観画像を見ながら、操船者は、シミュレータを操船する。自船の速度は、シミュレータ実験開始時は 12 ノットであるが、操船者の判断により通常通りに速度変更をおこなうことができる。また、灯浮標の評価が目的であるので、本シミュレータ実験では、自船以外の航行船舶は数隻とし、潮流はないものとした。

シナリオは、六連島から海上交通センターまで東行、Uターンしたのち、六連島まで西行するものであり、最初に旧関門航路を、次に変更後の関門航路を航行した。

5.4.3 評価の結果

操船者が、灯浮標を認識することは、海図等で確認した通りに、灯浮標を発見し、その位置を把握し、何号の灯浮標であるかを認識できることである。本実験では、関門航路を対象にして、灯火表現および変更後の視認性の容易さの評価をおこなった。関門航路の灯浮標を評価する上でのポイントは次の通りである。

- ①シミュレーション中、一つの灯浮標が、同一のものであることを違和感なく判定できること。
 - ②灯浮標の灯質と光度により、何号灯浮標であるかが認識できること。
 - ③背景光によって灯浮標の見え方が妨げられること。
- さらに、変更後の関門航路に対する評価のポイントとして
- ④③の状況にあっても、灯浮標の認識の容易さが向上していること。
 - ⑤各導灯の側感性が、航行する上で十分にあること。

本実験では、先に述べた通り、シミュレータ実験中および実験後に、評価者に対してアンケート調査および自由討論をおこない、上述の評価のポイントに示した項目について質問し、評価者の意見を聴取するという評価方法を取った。

評価結果は、27 人全員が、評価ポイント①、②とも旧および変更後の関門航路の灯浮標

を評価する点で、十分に実現できているということであった。評価ポイント③については、旧関門航路で、実海域とシミュレータ実験を比較した場合、視点位置から遠いところでは背景光が灯浮標の光度より相対的に暗く、近いところでは、反対に明るいという意見があった。しかし背景光が灯浮標の見え方を妨げるという点では十分にその目的を達することができているという評価が全員から得られた。変更後の関門航路については、全員が④の項目が達成できているという評価であり、導灯の評価も全員が⑤の項目を実現できているとしていた。また、問題点としては、灯質の切れがよすぎるという意見が出された。

変更後の関門航路の航行において効果があった具体的な点としては、次のことがあげられた。

①東行の場合、六連島東水路から関門航路に進入した際、関門航路が広がったのでオーバーランをせず、すぐに第一導灯にのることができる。同時に、関門航路第八号から砂津航路第二号灯浮標の赤の同期点滅でグループとして灯浮標を認識でき、航路の直線部分が明らかに認識できる。

②西行の場合、右側に見える山底ノ鼻灯台、金ノ弦岬灯台、大山ノ鼻灯台と順次かわした後に、関門航路第十五号から第五号灯浮標までの緑の同期点滅を見渡すことができ、東行と同様、航路の直線部が非常に認識しやすい。

さらに、眼高を変えて、小型船が変更後の関門航路を航行した場合や、灯浮標の光度を変更して、認識の容易さにどのような変化があるかを評価する実験もおこなった。

眼高の低い小型船の場合、灯浮標がより背景光に埋没しやすく、内航タンカーよりも灯浮標の見え方がより背景光によって妨げられていた。しかし、そのような状況でも、変更後の関門航路は現在の航路よりも認識が容易であるという評価が得られた。また、実物の光度が27カンデラの灯浮標は比較的暗すぎるので、100カンデラ程度に光度を上げると認識が容易になることがわかった。

このように、操船シミュレータでは、簡単に条件を変えて実験および評価をおこなうことができ、航路標識の灯火の評価をおこなうツールとしての長所を十分に活かすことができた。

新航路に関して、関門水先人会事務所にて意見を収集した結果を要約すると、上記2点の効果を裏付ける意見を得た。但し、「航路の幅が約500m小倉側に広がり寄せられたので、各枝航路への出入りに難点を生じている。」という意見があった。

5.5 変更後の関門航路の評価についてのまとめ

関門航路の変更を事前に評価することを目的として、その評価シミュレータ実験に使用するため、操船シミュレータのCGI景観画像上で灯火を表現する手法を開発した。この手法では、灯火同士の光度の比を実物と同じになるようにカラーパレットの明るさとポリゴ

ンサイズを設定している。また、遠方の灯火でも情報としての欠落がなく視認できるように、近くの灯火に対して遠くの灯火のポリゴンサイズを大きく輝度を小さく設定する改良型Level-of-Detail手法を開発した。この手法を用いることにより、Level-of-Detailの遷移の際に違和感と情報の欠落のないモデル化をおこなった。また、背景光は、まだ実物通りにモデル化はできないので、灯火の視認を妨げるという主旨で、バックグラウンドを透明にし、光点の大きさ、明るさ、密度を変化させた複数のテクスチャとしてモデル化をおこなった。これらのモデル化をおこなった旧関門航路に対しては、シミュレータを用いた専門家による評価を実施し、この手法が灯火を評価するのに十分であるとの評価を得た。

この手法を変更後の関門航路に応用して同様にシミュレータ実験を実施した結果、変更後の関門航路がその認識の容易さにおいて効果があることを確認した。さらに、変更後の関門航路に関して、実態調査および関門水先人会事務所における意見収集の結果、関門航路の変更が航路の認識の容易さにおいて効果があるということが確認できた。

以上述べてきた本手法の灯火表現の検討課題としては、

①灯浮標等における灯火の灯質の切れがよすぎること

②背景光が、灯浮標等の灯火との光度比の模擬を実現できていないこと

があげられた。これらの課題の解決と、一般的なCGIのポリゴンによる灯火表現のさらなる改良を含めて、航路の視認性を向上させるための研究を進めた。5.6節以降で、これについて述べる。

第5章の本節までの研究は、操船シミュレータ関連の国際シンポジウムにおいて発表⁽⁶⁾されているが、International Association of Lighthouse Authoritiesの関係者により、一般的なCGIのポリゴンによる灯火表現を実現した本手法は、その新規性において高い評価を受けている。

5.6 航路の視認性・識別性向上方策の策定

海上では、灯浮標を的確に配置することによって、航路が認識されるようになっていく。図5.9は前節まで検討してきた変更後の関門航路の一部であるが、航路の範囲と航路を示す灯浮標の位置が描かれている。前述したように、灯浮標は、それぞれ、固有の灯質と光度を持っていて、これにより、灯浮標同士は識別される。船上の操船者は、図のように配置されている灯浮標を鳥瞰図ではなく、ほぼ水平方向から見て、海図と灯浮標を対応させ、航路を認識する。特に夜間は海面が暗いため、航路を安全に航行するためには、昼間に比べてより灯浮標が欠かせないものとなる。

航路を示す灯浮標は、敷設される位置によって、灯質等が規則で一元的に決定されるものがある。しかし、そのように決定されるもの以外の灯浮標を配置するとき、環境に合わせて、航路の視認性を高めるよう、その灯質等の決定については自由度がある。そこで、

前節までの灯火表現手法をさらに発展させ、航路の視認性を向上させるために、自由度のある灯浮標について、シミュレータ上で効率的に検討するための研究を進めた。

ここで述べている視認性は、ただ単に目立つということだけではなく、識別性も含んでいる。すなわち、必要な航路が的確に認識できることが重要である。航路の視認性を向上させる方策においては、関門海峡全体を考えると、メインである関門航路だけでなく、いわゆる枝航路と呼ばれる小さな航路も交通網として重要であるので、関門航路はもちろん、枝航路も、きちんと識別できるということが大切である。そういった意味での、航路の視認性を高めることが目的であり、その効果的な検討ツールとして、操船シミュレータを使うため、シミュレータ上での灯火の表現手法の改良を考案し、実現した。

航路の視認性を向上させる方策として次のものについて検証した。

- ①関門航路と枝航路を別系統の同期点滅にして、その交互点灯タイミングの時間差を最適なものにする。
- ②関門航路をカスケード（一定の間隔で次々と起こる）点灯方式にし、順次点灯していく時間差を最適なものにする。
- ③関門航路をカスケード点灯、枝航路を同期点滅にする。

図 5.9 には、関門航路と枝航路を示す灯浮標のグループと、カスケード点灯の方向を示す。

シミュレータ実験では、関係者によるアンケート調査を主とした評価を実施し、交互同期点滅とカスケード点灯の最適な時間差の決定と、①から③の方策の中から、効率良く航路の視認性を高めるものの選定をおこなった。

5.7 操船シミュレータ上の灯火表現手法の改良

まず、操船シミュレータが、航路等を示す灯浮標や灯台等の灯火を評価に用いることができるよう正確に表現できなくてはならない。その上で、前述の航路の視認性を向上させる方策について、シミュレーションをおこないながら、リアルタイムで簡単に変化させ、比較検討できることが必要である。

CGI の方式によっては、点光源をポリゴンではなく、光専用の手法で高度に表現ができるものもあるが、船舶航行の分野に限らず、一般的な CGI でも灯火を扱えるように、ポリゴンで表現する手法について検討し、船舶技術研究所の操船シミュレータ上で実現した。

5.7.1 同期点滅・カスケード点灯等の簡便な設定

航路の視認性向上の方策検討には、操船シミュレータ上で、灯浮標のグループ化の設定、灯質の設定、グループごとの同期点滅の設定、グループ間の同期点滅の時間差の設定および時間差の変更、さらにカスケード点灯の時間差の設定と変更を容易に実現する必要がある。このために、表 5.2 に示した例のように、灯浮標のデータテーブルを用意し、灯質等の

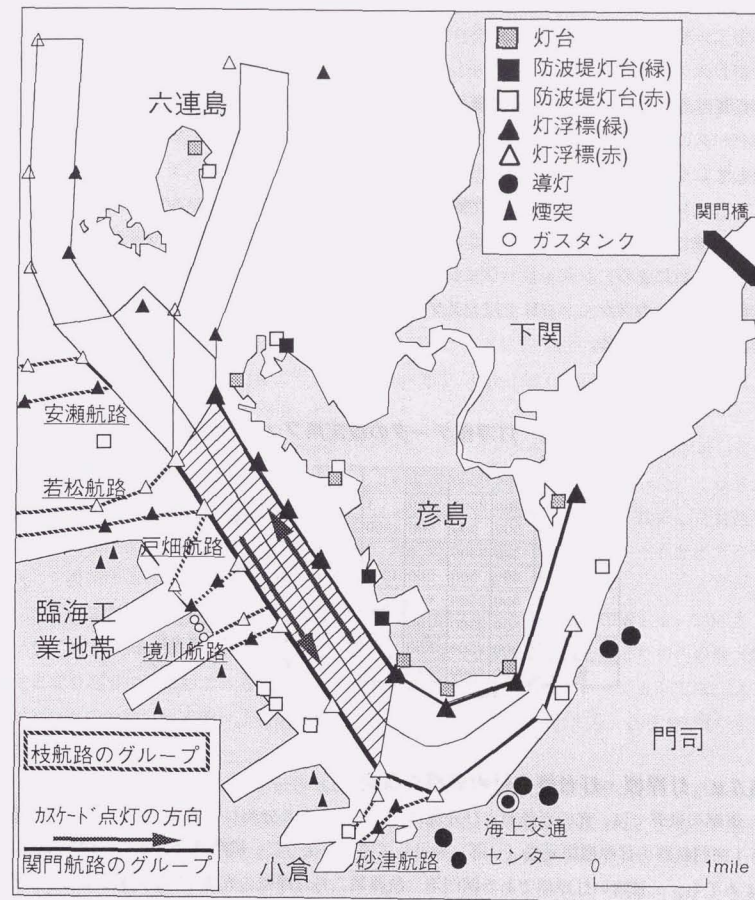


図 5.9 関門航路の航行援助施設配置とグループ化の例

データを簡単に設定できるようにした。横方向に1つの灯浮標のデータを入力する。灯質の点灯と消灯の時間については、milli-sec単位で設定する。同期点滅の場合、各灯浮標のデータ列最後尾の数字がベースとなる灯浮標の通し番号であり、1つのグループを示し、同期点滅の開始時刻を合わせる。網掛け部がオフセットで、グループ間の点灯開始時間差を示している。カスケード点灯の場合、各灯浮標のデータ列の最後尾の数字で、マイナス符号がカスケード点灯であることを示し、その絶対値の順番で順次点灯が開始する。その後の灯質は各灯浮標ごとに設定した通りになる。最後尾から1つ前の数字はカスケード点灯のベースになる灯浮標の通し番号を示す。網掛け部がオフセットで、カスケードで順次点灯していく時間差となっている。

シミュレーション中にキー入力で時間差が変更できるようなシミュレーションプログラムを作成した。特定のキーを押すことによって、網掛けで示したオフセットの値を増減できる。これにより、シミュレーション中に、交互同期点滅では各グループの点灯開始時刻の時間差を、カスケード点灯ではカスケードの順次点灯していく時間差を、その場で変化させることができる。

表5.2 灯浮標データの設定用ファイルの例

通し番号								
1	2	500	2500	0				
2	2	500	2500	0	1			
3	4	500	500	500	4500	200		
4	2	500	2500	0	1			
5	4	500	500	500	4500	200	3	
6	2	500	2500					
7	2	500	2500	100	6	-1		
8	2	500	2500	200	6	-2		
9	2	500	2500	300	6	-3		

グループA
同期点滅

グループB
同期点滅

グループC
カスケード点灯

データ幅

5.7.2 灯浮標・灯台等の灯火表現の改良

実際の世界では、光の光色および光度は、たいへん広く分布している。先の5.3.1節で表5.1 関門航路の灯浮標諸元表（一部）を示して述べたように、関門航路を示す灯浮標をとって見ても、一番暗い灯浮標である関門第二航路第二号灯浮標の光度27カンデラから、一番明るい灯浮標である関門航路第六号灯浮標の光度264カンデラまで広く分布している。さらに、灯台は、一桁大きい数値を持っている。

一方、CGIでは、狭い範囲しか輝度を表現できない。船舶技術研究所における操船シミュレータにおけるCGIのRGBの値は、0から255まで取れるが、例えば赤（灯浮標に使用される光色）のスクリーン上の輝度はR255で5.5カンデラ/m²であった。スクリーン

上で、少なくとも2×2ピクセルを保持すること、視点近くで灯浮標として適切な大きさとなることを考慮し、視点から2,500mの位置を基準にして、灯浮標光源部の大きさを一辺が1.5mの立方体とした。このときの光度は、最高でも約20カンデラしか表現できない。CGIでは、実物の灯浮標と全く同じ光度を表示することは不可能である。そこで、CGIで表現する各灯浮標間の光度の比が、実際の灯浮標間の光度と同じ比で表現できるように、灯浮標の光源部分のオブジェクトをポリゴンで作成した。

ところが、この一辺1.5mの立方体のオブジェクトでは、本シミュレーション範囲の10,000m四方の場合、最速以前に、スクリーン上で見ることができるときの最小単位1ピクセルよりも小さくなって、表示されない。これを防ぐために、5.3.2節で示したように、改良型Level-of-Detail手法を開発した。この手法では、各灯浮標光源部オブジェクト（以下、簡略して灯浮標オブジェクトという）のポリゴンサイズは、視点から離れた位置で表示されるLevel-of-Detailのオブジェクトほど大きく作成し、ポリゴンサイズが大きくなった分だけ輝度を下げる。図5.10の上部に示すように、改良型Level-of-Detail手法では、視点位置から遠ざかるに連れて、灯浮標オブジェクトのポリゴン面積を、4倍ずつ大きくし、輝度を4分の1ずつ小さくすることにより、スクリーン上で、Level-of-Detailの変換点の前後における光度を一定に保つことを実現した。

しかし、この改良型Level-of-Detail手法では、オブジェクトの大きさの変化が著しく、また、灯浮標や灯台の光度ごとにオブジェクトを個別に作成する必要があった。これを解決するため、灯浮標や灯台の光色と光度とスクリーン上の輝度に基づいて作成した共通のオブジェクトから、各灯浮標固有の光度や距離に応じて適切なオブジェクトとサイズを選択して表示するアルゴリズムを用いた。

まず、標準サイズの一辺1.5mの立方体でオブジェクトを作成し、その輝度を、0.05カンデラ/m²（夜間のシミュレーションで識別できる最低の輝度）からそれぞれの色の最大輝度までを適当に分割して、各オブジェクトに割り当てる。本シミュレーションでは、コンピュータの能力に対するシミュレーション全体のポリゴン数の検討から、各色20個のオブジェクトを作成した。

基準とする灯浮標を決め、それを基に、各灯浮標の実際の光度を標準化して、標準位置である視点から2,500m位置のスクリーン上の光度buoy.candelaを求めるとともに、各灯浮標のサイズも、基準とする灯浮標サイズとスクリーン上の光度から求める。灯台のように光度の大きいものはサイズを大きくして対応できる。但し、視点から2,500m離れた位置で、2×2ピクセルを保つように、最低サイズを標準サイズである1.5mとし、それ未満の場合はサイズを1.5mとした。ここで求めたサイズが、2,500mより近いところで表示される灯浮標のサイズbuoy.sizeとなる。このサイズを基に、各距離で対応する光度を求める。

一方、2,500m地点を基準にしてそれ以外では、距離が遠くなる分、表示させるオブジェ

クトを拡大することにより、見かけの大きさを保つ。2,500m 以遠で表示させるオブジェクトは、標準サイズの 1.5m を使い、視点と灯浮標との距離を d (m) として、次の (7) 式で求められるスケール buoy.scale の値で拡大する。2,500m より近くでは、 d を 2,500 とする。

$$\text{buoy.scale} = \frac{\text{buoy.size}}{1.5} \cdot \frac{d}{2500.0} \quad \dots (7)$$

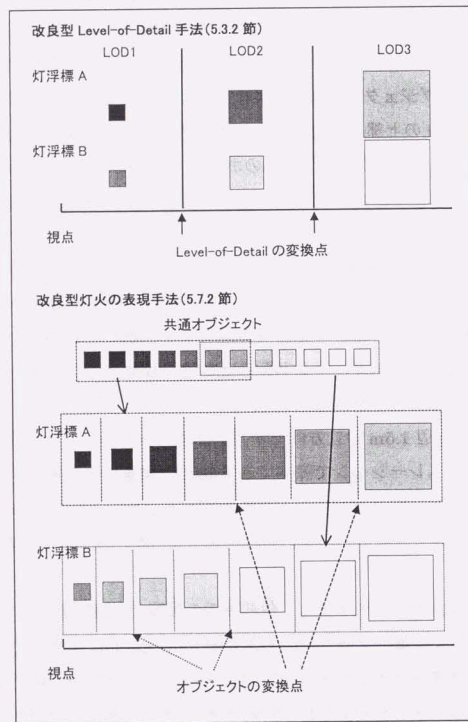


図 5.10 灯浮標等灯火オブジェクトの表現手法

拡大した分の光度を一定にするため、各地点における灯浮標のスクリーン上見かけの光度 buoy.candela_1 は、視点と灯浮標との距離を d (m) として、(8) 式と表せる。

$$\text{buoy.candela}_1 = \left(\frac{2500.0}{d} \right)^2 \cdot \text{buoy.candela} \quad \dots (8)$$

2,500m より近くでは、 d を 2,500 とする。

これにより、図 5.10 の下部「改良型灯火の表現手法」に示すように、各灯浮標が、固有の光度と、視点と灯浮標間の距離に応じて、共通のオブジェクトの中から、光度が buoy.candela_1 のオブジェクトを選択し、そのオブジェクトのサイズを buoy.scale 倍することにより、非常にスムーズかつ正確な比の灯火が模擬できた。

5.7.3 大気透過率の反映⁽⁵⁸⁾⁽⁶⁴⁾

完全な平行光線以外の点光源から放射された光は発散し、その照度は距離の 2 乗に反比例する。灯浮標が、操船者に観測されときの角膜照度がこれにあたる。

大気透過率を考慮し、世界気象機関により採択されている輝度対比の閾値を用いて、灯浮標からの光に対する観測者の角膜照度 E_d を求めると、次式 (9) のようになる。

$$E_d = \frac{I_0 \cdot \varepsilon^{\frac{d}{V}}}{d^2} = \frac{I_0 \cdot 0.05^{\frac{d}{V}}}{d^2} \quad \dots (9)$$

ここで、 I_0 は光源の光度 (カンデラ)、 ε は輝度対比の閾値、 d は視点と光源間の距離 (m)、 V は気象学的視程 (m) を表す。

一方、国際航路標識協会では、標準的な視程として 10 海里 (1 海里は 1,852m) を用いて航路標識灯火の光学的距離を取り扱うように勧告している。この勧告に沿った大気透過

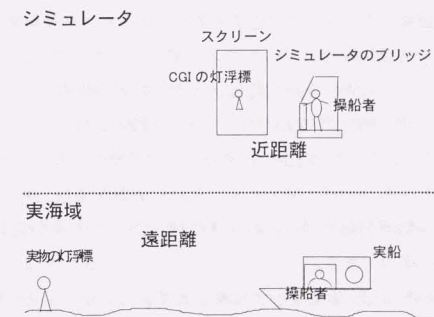


図 5.11 シミュレータと実海域における操船者の視点と灯浮標の位置

率を考慮すると、表 5.1 の関門航路第六号灯浮標の実海域での操船者への角膜照度は、2,500m の位置で、 2.819×10^{-5} ルクスとなる。大気透過率を考慮しないと、 4.224×10^{-5} ルクスである。図 5.11 に示すように、操船シミュレータでは、操船者は、スクリーン上に表示される CGI のオブジェクトを、操船シミュレータのブリッジ内の決まった位置から観測する。スクリーンとブリッジ間の距離は、シミュレーション範囲に比べて非常に短いので無視することができる。すなわち、スクリーン上に表示されるオブジェクトの光度を求めるときに、大気透過率を直接反映することにし、大気による減衰後の光度を用いることにした。よって、前節 5.7.2 で示した各地点における灯浮標のスクリーン上見かけの光度 buoy.candela_1 は、(10) 式で表される。

$$\text{buoy.candela}_1 = \left(\frac{2500.0}{d} \right)^2 \cdot \text{buoy.candela} \cdot (0.05)^{\frac{d}{v}} \cdots (10)$$

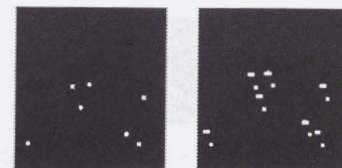
これを用いることにより、視程によって灯火の光度が変化するという自然現象を模擬できた。

5.7.4 背景光の表現の改良

これまで、現場を再現した形で背景光が灯浮標や灯台の視認を妨げるように、操船シミュレータ上で背景光を作成し用いていたので、背景光の光度は一貫して正確とはなっていないかった。しかし、背景光を、灯浮標等に対して相対的に正確な光度で表現することは、操船シミュレータ上の灯火の表現と評価において重要なことである。

背景光は、灯浮標等と違い、景観画像上に広く大きく存在するものである。そこで、灯浮標等の灯火と光度を比較するときには、対する背景光の範囲を決めておく必要がある。この範囲（景観画像上で、窓もしくは枠として想定することになるが）を、高精度な情報受容が可能な範囲である弁別視野の視角縦横 2 度の範囲⁽⁶⁵⁾⁽⁶⁶⁾とする。その範囲内に点在している光点の光度の総和を、その背景光の光度とする。さらに、背景光のテキストチャには、これまでにも用いて一定の効果を上げていたバックグラウンドが透明なテキストチャを用いることにした。背景光のテキストチャの例を図 5.12 に示す。左側が基となる背景光テキストチャで、白い部分が光点、黒い部分がバックグラウンドで透明になっている。このテキストチャは、重ね合わせることで、図 5.12 の右側のように密度を増すことができる。一般的なグラフィックスコンピュータではテキストチャメモリに制限があり、多くの種類の背景光を個々に用いることには限界があるが、このようなバックグラウンドが透明な背景光を使うことにより、効率的に使用できる。

背景光のテキストチャの作成は、次のようになる。まず、スクリーン上の視角縦横 2 度の範囲を求める（船舶術研究所の操船シミュレータのスクリーンでは、約 18cm×18cm）。その面積を基準にして、背景光テキストチャを作成する。背景光は、白が基本となるが、船舶



基本テキストチャ 重ね合わせによる効果

図 5.12 背景光テキストチャの例

技術研究所の操船シミュレータでは、白の最大輝度が 32 カンデラ/㎡まで表現できる。5.7.2 節で述べたように、見えなくなることを防ぐため、スクリーン上では、背景光テキストチャの光点の 1 つ 1 つも、必ず 2×2 ピクセルを保持する必要がある。これが、背景光テキストチャの光点の最小単位であり、図 5.13 のようになる。この図 5.13 に示した最小単位の光点の背景光テキストチャで、 4×10^3 カンデラ（白の最大輝度 32 カンデラ/㎡の場合）から 6×10^6 カンデラ（前述の夜間のシミュレーションで識別できる最低の輝度 0.05 カンデラ/㎡を用いた場合）まで表現できる。図 5.12 のような背景光テキストチャの光度は、点在する全光点の光度の総和になる（但し、テキストチャの大きさが視角縦横 2 度で、個々の光点が 2×2 ピクセル以上）。

一方、灯浮標等の表現と同様に、背景光が視点位置から遠ざかるにつれて、図 5.14 に示すように背景光も背景光オブジェクト（背景光テキストチャ付きのポリゴン）も変換していく。このとき、背景光の光点一つの光度を x カンデラ、光点の個数を m 個とすると、ある背景光は、 $x \cdot m$ カンデラを一定に保つことにより、光度を保持する。一般的には、光点の輝度は変化させず（最大輝度を用いる）、視点位置から遠ざかるにつれて、個々の光点は大きく（ x を大きく）、光点の個数を少なく（ m を小さく）することにより、スクリーン上で背景光の光点が見えなくなることを防ぎつつ、光度を保つようにする。しかし、光点の大きさには限度があるため、限界にきたところからは、光点の輝度を小さく、暗くして、 $x \cdot m$ カンデラを一定に保つことも必要になる。観測者の視点位置からは、灯浮標と同様、距離に応じて光度の変化が観測できる。

以上のような手法を用いて、背景光を表現する。実世界の背景光の光度は、現場で測定機器を用いて、視角縦横 2 度の範囲の光度を求め、この数値を基に、灯浮標等の光度に対して相対的に正確な背景光を表現できる。

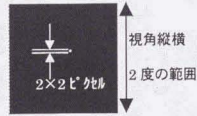


図 5.13 背景光テクスチャの最小単位

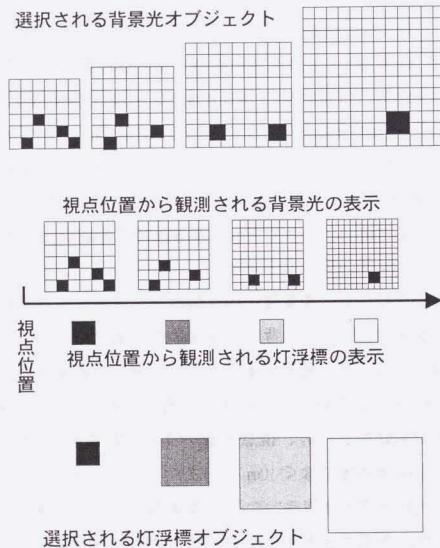


図 5.14 背景光オブジェクトの表現手法

5.8 改良した操船シミュレータ上の灯火表現の評価

航路の視認性向上策のシミュレータ実験に先立ち、5.7 節で示した手法を、5.3 節で示した前手法と比較し、その改良の効果について、シミュレータ実験と評価をおこなった。

5.8.1 灯浮標・灯台等の灯火表現の改良

関門航路の中から、代表的な灯質を持つ 5 つの灯浮標と灯台を選択して、操船シミュレータ上に、「改良型 Level-of-Detail 手法」および「改良型灯火の表現手法」（図 5.10 参照）でそれぞれ表現して、5 つの灯火を 250m 間隔で一列に表示した。視点位置を 0m から 10,000m まで変化させて、両手法による表現を比較し、改良効果について意見を聴取した。評価者は 2 人で、いずれも関門航路航行を経験しており、1 人は船長経験者、1 人は海上保安庁の航路標識担当者である。

評価結果をまとめると次のようになる。「改良型 Level-of-Detail 手法」では、Level-of-Detail の変換点で、光度は一定に保たれても、面積の変化が著しく、灯浮標の灯質によっては、変換点が意識されてしまうことがあった。「改良型灯火の表現手法」では、変換点で光度を保つだけでなく、長距離にわたり面積の変化もギャップがなくなめらかで、灯浮標・灯台光源部の灯火表現がスムーズにおこなえている。

5.8.2 大気透過率の反映

同じく、関門航路の中から、5 つの灯浮標と灯台を選択して、操船シミュレータ上に、「改良型灯火の表現手法」で表現し、5 つの灯火を 250m 間隔で一列に表示する。それらの灯火の上空 50m と 100m に、同じ灯火にさらに「大気透過率を反映」させたものを同時に表示した。視程は、国際航路標識協会の標準視程 10 海里と半分の 5 海里を適用した。視点位置を 0m から 10,000m まで変化させて、大気透過率を反映させた灯火とさせない灯火を比較し、意見を聴取した。評価者は、5.8.1 節と同じである。

結果としては、大気透過率を反映させた灯火は、視程が悪い場合ほど、距離が遠ざかるにつれて、急激に表示されるオブジェクトの光度が小さくなり、視程が悪くなると、視認できる限りの距離が短くなるという自然現象が模擬できているという評価であった。

さらに、このシミュレータ実験中、画像と同時に、別の CRT に、画像表示されているオブジェクトの光度を表示して確認をおこなった。例えば、表 5.1 の関門航路第六号灯浮標は、距離 2,500m で、大気透過率を考慮しないと、12.4 カンデラ、標準視程 10 海里で 8.3 カンデラ、5 海里では 5.5 カンデラのオブジェクトが表示されていることが確認でき、大気透過率の反映が意図した通りにおこなっていた。

5.8.3 背景光の表現の改良

この手法の有効性検証の第一段階として、基本モデルによる実験を実施した。

実験は、図 5.14 に示した概要を、そのまま操船シミュレータ上に再現した。背景光のデキスチャ付きのオブジェクトと比較のため表示した灯浮標オブジェクトを、それぞれ 1 つづつ 500m の間隔で並べて表示した。これらに対して、視点位置を 0m から 10,000m まで変化させ、灯浮標および背景光が、その距離に応じて、適応するオブジェクトに変換されることを確認できた。

背景光についても、オブジェクトの共通化をおこなうことは可能であり、対象海域の背景光の分布と光度に応じて、事前に簡便に背景光オブジェクトを生成し、シミュレーション中に距離に応じて変換させることにより、スムーズかつ灯浮標に対して相対的に正確な光度を保持した背景光が表現できる。

5.9 航路の視認性・識別性向上方策の評価

5.9.1 シミュレータ実験の概要

5.7 節で示した灯火表現手法の改良のうち、5.7.1 節から 5.7.3 節の「同期点滅・カスケード点灯等の簡便な設定」、「灯浮標・灯台等の灯火表現の改良」、「大気透過率の反映」の 3 つを、関門航路を対象として、船舶技術研究所の操船シミュレータ上で実現した。そして、航路の視認性を向上させる方策を検討する操船シミュレータ実験をおこなった。

5.9.2 シミュレータ実験の目的

拡幅、直線化がなされ、1996 年 1 月 6 日に多くの灯浮標の再配置が完了した関門航路は、以前の航路に比べて、操船者の評判が良い。しかし、特に枝航路が短くなったこともあり、関門航路および枝航路の視認性にはさらに改良の余地がある。また、改良案そのものが優れていても、現在の機器設計生産技術では実現できないものやコストパフォーマンスが悪いシステムでは改良案として成り立たない。

本実験では、大幅な機器の仕様変更および利用者への告知に関しても実現可能と考え策定した方策（5.6 節で示した方策）の基礎的な評価をおこなう。

5.9.3 シミュレータ実験の実験条件

- ①海域：六連島南端付近から巖流島灯台西付近までの間で、西行と東行の両方について航行する。
- ②時間帯：夜間
- ③自船：眼高 12m、総トン数 3,000 トン、船速 12 ノット
- ④他船：なし

⑤気象海象：晴天、無風、視程 10 海里

⑥背景光：5.4 節の実験時と同じ背景光オブジェクトを使用。よって、灯浮標等の視認を妨げるという目的で作成されているが、灯浮標等と相対的の光度は一致しない。

⑦評価者：海上保安庁灯台部および試験研究センターの航路標識担当者、計 10 人。

⑧対象標識：図 5.9 に示す対象海域内の全標識。

5.9.4 シミュレータ実験の内容

(0) 実験 0

比較のため、現行関門航路の航行。

(1) 実験 1

関門航路と枝航路（安瀬、若松、戸畑、境川、砂津）を別系統の同期点滅にする（枝航路同士は同じ系統の同期点滅）。その交互点灯タイミングの時間差を、0.1 から 0.5 秒の 0.1 秒刻みで 5 種類変化させる。

(2a) 実験 2-a

関門航路の直線部（図 5.9 の斜線部のみ）をカスケード点灯方式（図 5.9 に方向明示）にし、その順次点灯の時間差を 0.1 から 0.5 秒の 0.1 秒刻みで 5 種類変化させる。関門航路の曲線部と枝航路については現行通り。

(2b) 実験 2-b

関門航路全体（図 5.9 の太線全範囲）をカスケード点灯方式にし、その順次点灯の時間差を 0.1 から 0.5 秒の 0.1 秒刻みで 5 種類変化させる。枝航路については現行通り。

(3) 実験 3

関門航路全体をカスケード点灯、枝航路を同期点滅にする。

5.9.5 シミュレータ実験の手順

実験 0 から実験 3 の順番で実験をおこなう。前述した実験条件に従い、いずれも、東行、西行の順で航行する。航行中に、自由に船速を増減、停止できる。それぞれの実験の時間差は、最初 0.1 秒から始めるが、評価者の要求に応じて、ランダムに繰り返すことができる。実験中は、評価者同士で意見交換はせず、独自の評価をする。実験 0 では、次に述べるように自由討論による評価をおこなう。実験 1 から実験 3 では、評価者の独自の評価を、各自アンケート調査票に記入する。全実験終了後、アンケート結果について討論をおこなう。

(0) 実験 0

このシナリオに限り、実験中の評価者の意見交換を認め、現行の航路の確認をする。現行関門航路の航行環境を有しているかの評価もおこなう。灯火の表現手法の改良における効果については、5.8 節でおこなっているため、ここでは、5.4 節と同じポイントで評価を

実施した。評価のポイントを口頭で説明し、実験後に自由に意見を述べあう。

関門航路の灯浮標・灯台・導灯を評価する上でのポイントは次の通りである。

- ①シミュレーション中、一つの灯浮標・灯台が、同一のものであることを違和感なく判定できること。
- ②灯浮標・灯台の灯質と光度により、何号灯浮標であるかが認識できること。
- ③背景光によって灯浮標の見え方が妨げられること。
- ④各導灯の側面感が、航行する上で十分であること。

(1) 実験 1

関門航路と枝航路の交互点灯タイミングの時間差 5 種類について、同順位なしで 1 位から 5 位の順位付けをアンケート調査票に記入する。

(2) 実験 2-a および 2-b

東行航行時に、赤色灯浮標側の時間差 5 種類について、西行航行時に、緑色灯浮標側の時間差 5 種類について、同順位なしで 1 位から 5 位の順位付けをアンケート調査票に記入する。

(3) 実験 3

航路の視認性を向上させる方策として、いずれが優れているかを評価するため、実験 3 を実験 0 から実験 2 までの 4 つの実験と一対一比較して、同程度、実験 3 が優位、実験 3 が劣位かをアンケート調査票に回答する。

5.9.6 シミュレータ実験の結果と考察

(0) 実験 0

現行関門航路の航行環境を有しているかどうかの評価の結果は、10 人とも、評価ポイント①、②、④を満足し、関門航路の航行環境として、十分に実現できているという評価であった。③については、背景光が 5.4 節の実験と全く同じものであるため、同じ問題点が残る、視点位置から遠いところでは背景光が灯浮標の光度より相対的に暗く、近いところでは反対に明るいという意見が出された。しかし、目的は達して、関門航路の背景光としての航行環境を有しているという評価が全員から得られた。

よって、5.7 節で説明した、改良した操船シミュレータ上の灯火表現手法により、航行環境として十分なものが提供できていると考える。

(1) 実験 1

アンケート調査票を集計し、評価者のつけた順位の逆数を得点として、時間差ごとに合計したものを図 5.15 に示す。0.2 秒が僅差で最適という結果になった。0.1 秒と 0.4 秒については、1 位とした評価者はなく、0.2 秒 4 人、0.3 秒 3 人、0.5 秒 3 人が 1 位と評価した。

(2a) 実験 2-a

実験 1 と同様に順位の逆数を得点として集計した。図 5.16 および図 5.17 が示すように、赤色と緑色とも 0.3 秒が最適、次いで僅差で 0.2 秒という評価であった。

(2b) 実験 2-b

図 5.18 および図 5.19 に同様に集計した結果を示す。赤色では 0.2 秒が最適、次いで 0.3 秒、緑色では 0.2 秒と 0.3 秒が同得点であった。

実験 2-a と 2-b から、カスケード点灯は、0.2 と 0.3 秒の時間差が適切といえる。

実験 2-a と 2-b で、0.2 秒と 0.3 秒で逆転が見られることについて考察する。実験 2-b では、実験 2-a よりも、遠い距離までカスケード点灯を順次目で追っていくことになる。カスケード点灯が最後までいったところを一区切りとして捉えると、赤色の場合は、見えている範囲でのカスケード点灯の一区切りが、実験 2-a と 2-b とでほぼ同じとなり、カスケード点灯一区切りごとのリズムが、評価者にとって好ましいものであったことが要因ではないかと考える。一方、緑色の場合は、実験 2-a と 2-b とで見えている範囲の灯浮標の数が 1 つ程度しか変わらないことと、緑色が赤色よりも見えにくいことから遠くまで視線を伸ばして見るという点において、時間差があり、ゆっくり目で追っていける 0.3 秒の方が有利であることが、実験 2-a と 2-b での赤色と緑色との結果の差になったと考察する。

(3) 実験 3

実験 3 をその他の実験と一対一比較して、航路の視認性を向上させる方策（同期点滅のみ、カスケード点灯のみ、カスケード点灯と同期点滅。それぞれ実験 1, 2, 3）の有効性について、同程度、優位/劣位をアンケート調査票に記号で記入した。同程度の場合はそれぞれ得点 0、どちらかが優位の場合は、優位とした方を得点 1、他方を得点 0 として、アンケート調査票を集計し、最大値を 1 に標準化したものを図 5.20 に示す。この結果、実験 2 の関門航路のカスケード点灯のみをおこなう方策の評価が高いことが明らかになった。

5.9.7 シミュレータ実験のまとめ

アンケート調査票の集計結果と自由討論から、航路視認性向上方策のシミュレータ実験は次のようにまとめられる。

実験 3 の結果からは、実験 1 よりも実験 3、実験 3 よりも実験 2 の方が有効であるとの結果になった。これは、実験で航行した航路が関門航路だけであり、関門航路の視認性を高めるとい点においては、関門航路のカスケード点灯だけで効率よくおこなえるということを示している。実験後の自由討論においても、同じ意見が出て、そのことが裏付けられている。同期点滅よりもカスケード点灯の方が、有効であること理由として、カスケード点灯方式は、一斉点灯である同期点滅方式とは違い、灯火と灯火が接近または重なる場合においても視認でき、航路形態の把握に優れているからという意見が得られた。カス

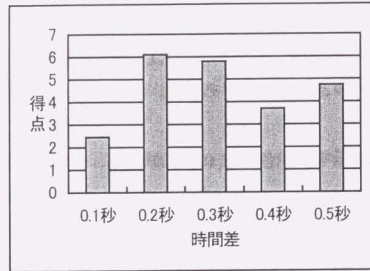


図 5.15 実験 1 交互同期点滅の最適時間差

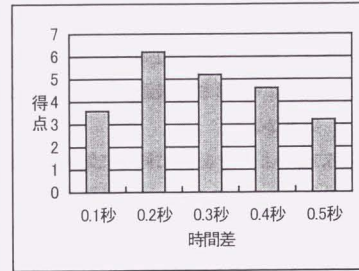


図 5.18 実験 2-b 赤色灯浮標カスケード点灯 (全体)の最適時間差

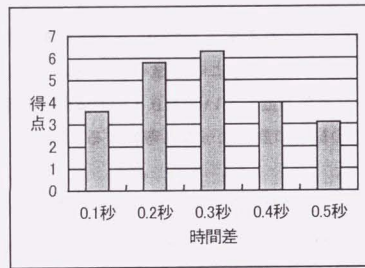


図 5.16 実験 2-a 赤色灯浮標カスケード点灯 (直線部)の最適時間差

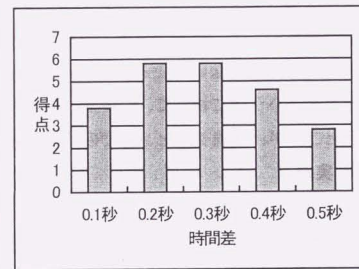


図 5.19 実験 2-b 緑色灯浮標カスケード点灯 (全体)の最適時間差

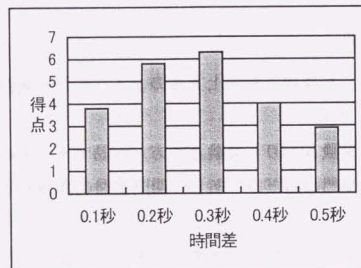


図 5.17 実験 2-a 緑色灯浮標カスケード点灯 (直線部)の最適時間差

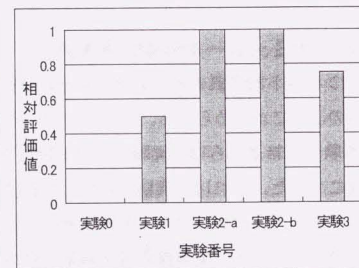


図 5.20 実験 3 方策の一対一比較

ケード点灯の時間差は0.2と0.3秒の評価が高かった。この間に最適値が存在するのかわかりについては、詳細な時間設定のシミュレータ実験を実施することにより結論が得られる。

海域全体の航路の視認性を高めるという意味では、枝航路の視認性を高めることが重要であるので、枝航路を航行するシミュレータ実験を実施することにより、関門航路と同様に方策を検討することが可能である。但し、実験3と実験2との差が小さいこと、現行の実験0よりも実験1が優れていることから、枝航路の同期点滅が有効と考えられる。これについては、実験後の議論でも、枝航路は現行では視認性が低く、同期点滅等の方策は必要であるとの意見が得られた。

以上のように、操船シミュレータを用いて、航路の視認性を高めるための方策の検討をおこなった。5.7節で説明している、改良した操船シミュレータ上の灯火表現手法は、本実験において有効に働き、このような検討をおこなうのに十分な実験環境を提供できるものであった。

5.10 前手法 (5.3節) の問題点の改善

5.3節で示した、操船シミュレータ上の灯火の表現手法では、次の2点が検討課題として残った。

- ① 灯浮標等における灯火の灯質の切れがよすぎること
- ② 背景光が、灯浮標等の灯火との光度比の模擬を実現できていないこと

5.7節で示している、改良した灯火の表現手法は、この課題に限らず、特に夜間における航路航行の安全性を高めるための検討をおこなうツールとして、操船シミュレータが必要とする、もしくは効果的に使用できる手法として開発した。5.8節では、シミュレータ実験による評価をおこない、改良後の灯火表現手法の有効性について述べたが、本節では、さらに、前手法 (5.3節) の問題点の改善についてまとめておきたい。

- ① 灯質の切れがよすぎること

5.9節のシミュレータ実験時には、実行しなかったが、5.7.1節に示した同期点滅・カスケード点灯等の簡便な設定の手法を用いれば次のように実現できる。例えば、3秒1閃の灯質を表現するのに、表5.2では、1行目のように、500milli-sec点灯2500milli-secとしている。これを、100milli-sec、300milli-sec、100milli-sec、2500milli-secと設定し、アルゴリズムも、現在のオン/オフから、ハーフ/オン/ハーフ/オフというものにする。ハーフでは、オンで表示されるオブジェクトの光度に対して半分の値を持つオブジェクトを表示する。これにより、灯質の立ち上がり等の切れがよすぎることを改善できる。また、このハーフに表示するオブジェクトは、前手法の「改良型 Level-of-Detail 手法」では、それぞれの灯浮標ごとに固有のオブジェクトを作成しなくてはならないが、さらに改良した手法である「改良型灯火の表現手法」では、オブジェクトの共通化をしてあるので、その

中から選択するだけでよい。

②背景光との光度比の模擬がおこなえていないこと

5.7.4節の、背景光の表現の改良で示した手法は、この問題点の解決を目的としたものである。方法については前述した通りである。その検証については、5.8.3節に示したように、簡単なモデルのシミュレータ実験でのみおこなっている。

5.11 結言

夜間においても、航路を安全に航行する使命を負っている操船者の立場に立ち、他船や陸上の灯火に惑わされることなく、航路の識別性を含む視認性を高めることのできる航路航行環境について検討すべきときがきている。その有効な検討ツールとして、操船シミュレータを用いることとし、航路を示す灯浮標を効果的に検討するために、一般的なCGIのポリゴンを用いたシミュレータ上での灯火の表現手法を考案した。

この手法を用い、関門航路の変更工事を竣工する前の段階で、操船シミュレータ上に変更後の関門航路をモデル化し、航路変更の効果について評価することができた。

さらに手法に改良を加え、操船シミュレータにおける灯火の効果的な表現手法について開発した。そして、改良後の手法を用いて、関門航路の視認性を高めるための方策を検討するシミュレータ実験をおこなった。本研究で開発した灯火の表現手法は、このような航路の視認性・識別性向上のための有効方策について検討をおこなうのに十分な実験環境を提供できるものであった。本研究で対象としたのは関門航路であるが、一般的なCGIのポリゴンにより灯火を表現する本手法は、関門航路に限らず、広く一般的な航路標識の灯火の表現に応用できるものである。さらに、船舶航行の分野だけでなく、灯火の光度および灯質が重要な情報となっている他の分野においても応用できる手法である。

6 総括的結論と今後の課題

6.1 総括的結論

地球規模の環境保護が世界の関心事になっている現在において、環境に多大な影響を及ぼす船舶航行の安全性をよりいっそう高めることは重要な課題である。海上交通の安全性を向上させるため、近年、参入が始まった高速船の航行安全の評価や、年々充実を図っている灯浮標および灯台等の航行援助施設の改善については、より効果的な方法が必要であるが、最近のコンピュータ技術の発展により、操船シミュレータがその有効な手段となる。本論文では、高速船航行を中心とした船舶航行の安全性を向上させ、航行援助施設の改善を図るための操船シミュレータによる安全性評価について検討してきた。

第1章では、船舶航行の現状と問題点についてまとめ、高速船航行の安全性評価と航行援助施設の改善の必要性と、それらの検討に操船シミュレータを用いることの有用性について述べた。そして、シミュレータが広く利用されている航空機分野のシミュレータの動向を概観し、本研究に用いた実験施設としての操船シミュレータを紹介し、海上交通ルールおよび管制についてまとめた。

第2章では、船舶航行の安全性評価手法として、船舶航行の安全とは、結果的に衝突を回避できたかどうかではなく、衝突回避の過程において、潜在的危険が顕在化したときに、その危険を回避できるかどうかで評価されるべきものであるという考えを示し、安全余裕による評価手法を考案した。そして、東京湾羽田-東京間のジェットフォイルによる操船シミュレータ実験に対して、距離としての安全余裕による評価を適用し、本評価手法の有効性を示した。さらに、航行安全の確保には、高速船側からだけでなく、一般船の側からの潜在的危険の評価をおこなって、どちらの側からも潜在的危険を排除することが必要である。そこで、操船者の感じる脅威が、操船者の危険回避能力や外乱を包括したものであるということ、さらに、操船シミュレータ実験をおこない、一般船側の操船者が感じる脅威が、潜在的危険を考慮した航行の安全を評価するための一般船側からの指標となることを示した。

第3章では、大型高速船を対象として、操船支援方法の効果に対する操船者の主観的な評価を客観的に解析する手法として主成分分析を用い、操船シミュレータ実験のアンケート結果から、各操船支援方法の効果について求めた。操船シミュレータ実験の特徴を活かし、アンケート調査および主成分分析を用いて、操船者の操船および安全航行に関する意見を収集して分析するという本手法は、ヒューマンファクターの調査および解析に適した手法であることも明らかになった。ここで検討した対象は大型高速船であるが、この手法自体は小型高速船、一般船にも適応できるものである。

一方、高速船同士の遭遇は、基本的には一般船同士の遭遇と同じと考えられ、従来の航法に則った避航方法が当てはまるが、高速で接近するので、安全余裕を保持するために避航開始を早い時期におこなうことが重要である。高速船の情報は、船舶搭載の支援機器（ARPA等）だけに頼るのではなく、通信および導入が検討されているAIS等の別の手段で入手できるようにする必要がある。

第4章では、テクノスーパーライナー実海域実験船「飛翔」（TSL飛翔）を用いた総合実験において、幅狭海域における高速船の安全な航行方法をモデル化することを目的としておこなった実海域実験と操船シミュレータ実験を解析対象として、各遭遇において操船者が感じる脅威や、高速安全航行に関する知識等を、操船者の所属するクラス間で解析することにより、TSL飛翔の安全な航行方法に関するデータや指針を獲得した。また、TSL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、安全な避航方法に直結する知見を得た。

また、実船実験とシミュレータ実験の結果について比較検討することにより、操船シミュレータが、操船者の情報収集、状況把握および状況判断のモデル化をはじめとする操船者の安全航行に関するヒューマンファクターの調査と、船舶航行の安全性評価に有用であることを明らかにした。

第5章では、高速船を含む夜間の海上交通の安全に欠くことのできない灯浮標等の航行援助施設が構成する航路航行環境を検討するための有効なツールとして、操船シミュレータの機能の開発をおこなった。すなわち、シミュレータ上で航路を示す灯浮標を効果的に検討するために、一般的なCGIのポリゴンを用いた灯火の表現手法を開発した。この手法を、関門航路に適用し、航路変更の効果を評価することができた。

さらにこの手法に改良を加え、関門航路の視認性を高めるための方策を検討するシミュレータ実験に適用し、有効な方策を明らかにした。本研究で開発した灯火の表現手法は、航路の視認性等、航路航行環境を検討するために十分な実験環境を提供できるものであり、本手法の機能を備えた操船シミュレータが、航行環境の評価を効果的にこなうツールとして有用であることが示された。本手法は、船舶航行の分野に限らず、灯火の光度および灯質が重要な情報になっている他分野のシミュレータのCGIにも応用できる手法である。

船舶航行は、操船者、船舶、環境から成り立っているシステムである。以上述べてきたように、操船シミュレータは、操船者を主とする人間が深く関係したヒューマンマシンシステムの検討に有効である。本論文では、船舶の高速安全航行および航行援助施設を対象にして、操船シミュレータを用いた評価手法について研究をまとめた。

6.2 今後の課題

操船は人間の要素が大きく関与するシステムである。今後、操船支援機器や情報支援体制がIMOの指導の元でも広く行き渡ろうとしている。そういった支援が有効に活かされ、効果的な内容が操船者にもたらされるためにも、操船シミュレータを有効に利用し、これらの支援機器や支援体制について、事前に評価したり、操船者に習熟させることが重要である。

本論文でまとめた安全評価手法は、海上交通の新たな体制が設けられたときにも、その安全の評価に役立てていくことが可能である。また、新しい支援機器や、情報支援の内容の有効性については、本論文で示した主成分分析による操船支援の有効性評価を直接利用することができる。さらに、操船シミュレータ実験と実海域実験の組み合わせによる有効な総合実験の形態、情報支援の内容の検討等においても、本論文は貢献できるものである。

今後は、操船シミュレータおよび本論文の手法を利用して、他分野も参考にしながら、操船者の知覚や認識について解明し、得られた知見を、さらに有効な操船支援機器や支援体制に反映させていきたいと考えている。

一方、現在、国内外から、操船シミュレータでの灯火表現手法等について協力を要請されており、操船シミュレータが航路の策定および改良、さらには港湾設計に果たす役割は今後も見込まれる。本論文で開発した操船シミュレータにおける灯火の表現手法は、直接、海上交通の安全性向上に反映され、これからも国内外の運輸行政に役立っていくことができる。

謝辞

本論文を終えるにあたり、御懇意なる御指導と御教示並びに貴重な御討論、御援助をいただきました方々に対して、著者の深甚なる感謝の意を表します。

本論文をまとめるに際しては、横浜国立大学工学部船舶海洋工学教室平山次清教授より、終始暖かい御指導と御鞭撻を賜りました。また、横浜国立大学工学部船舶海洋工学教室池畑光尚教授、井上義行教授、上野誠也助教授並びに馬寧助教授には、懇切なる御指導を賜りました。さらに、元横浜国立大学工学部船舶海洋工学学科教授寶田直之助博士、東京商船大学今津隼馬教授、神戸商船大学古荘雅生助教授より、懇切なる御指導を頂きました。

著者が、本研究に取り組むことになったのは、元運輸省船舶技術研究所システム技術部長村山雄二郎博士から、入省直後より、システム工学の基礎から御指導を頂いたこと、その後開始された高速船の研究において安全性評価を担当するよう御指導頂いたことによるものです。また、船舶技術研究所推進性能部長不破健博士（元システム技術部長自動化研究室長）から、著者の入省時佳境に入っていた知能化船プロジェクトにおいて、安全性評価を担当するよう御指導を頂いたことも、船舶航行の安全性評価の研究に取り組む動機付けとなりました。村山雄二郎博士には、その後も、本論文を書き始めるところから完成まで、暖かい励ましと御助言を賜りました。

本研究を遂行するにあたりましては、システム技術部長伊藤泰義博士、システム技術部長自動化研究室長沼野正義氏、船舶技術研究所装備部防災研究室長金湖富士夫氏（元システム技術部主任研究官）、システム技術部田中邦彦主任研究官、福戸淳司主任研究官、重点研究支援協力員の室原陽二船長並びにシステム技術部の諸氏より多大な御援助を受けました。特に、沼野正義室長には、著者の入省より現在に至るまで、研究全般に対して御指導を頂き、本研究にあたっては、航行安全の基本的な考え方についての御教示を頂くとともに、研究の節目ごとに貴重な御討論を頂きました。また、システム技術部長伊藤泰義博士には、出産、育児休業後も、研究を続けられるよう、常に暖かい配慮と励ましを頂きました。

以上の方々に、心より感謝を申し上げます。

また、本研究の各実験には、ベテラン操船者の方々、航路標識の専門家の方々に参加してくださいました。特に、テクノスーパーライナー実海域実験船飛翔の実験は大規模なプロジェクトであり、多くの方々の御協力を頂きました。横須賀水先区水先人岡村米作氏（元飛翔船長）、神戸地方海難審判庁米原健一氏（元銀河丸船長）、航海訓練所吉本誠義氏（元北斗丸船長）、航海訓練所磯崎道利氏（元汐路丸船長）並びに関係者の方々に心から感謝申し上げます。さらに、各実験に参加していただいた、航海訓練所有田彰男教授並びに池田重樹教授、海上保安庁宮崎信昭氏、海上保安庁福住克安氏、関東運輸局船員部甲斐斐利氏をはじめとする操船者の方々、航路標識担当の方々並びに関係者各位に、深い感謝の意を表します。

最後に、著者の本研究に取り組む姿勢に理解を示し、本論文を書くための時間を作り出してくれた夫恭さんと、本論文を完成させる気力を支えてくれた息子駿（1歳）に、心から感謝します。

参考文献

- (1)交通エコロジー・モビリティ財団、運輸省監修：環境と運輸—環境と調和した次世代の運輸交通システムを目指して—、1998
- (2)運輸省総務審議官監修：日本物流年鑑 1996、1996
- (3)海難審判庁：海難審判の現況平成10年度版、1998.9
- (4)Skorupka: Comfort inquiry and motion measurement during commercial passenger service on the French S.E.S. AGNES 200, Proceedings of the Second International Conference on Fast Sea Transportation, pp1-12, 1993.12
- (5)Holden: The Norwegian High Speed Marine Vehicle research programme, Proceedings of the Second International Conference on Fast Sea Transportation, pp71-81, 1993.12
- (6)Kraus: "SUS-A" - the state of the art of the German research program for catamarans, Proceedings of the Second International Conference on Fast Sea Transportation, pp213-222, 1993.12
- (7)例えば、Vermeer: International regulations based on a probabilistic approach of accidental outflow performance of oil tankers, International Conference on Technologies for Marine Environment Preservation '95, pp198-204, 1995.9
- (8)例えば、Claus: Innovative vessels of the German oil spill recovery fleet, International Conference on Technologies for Marine Environment Preservation '95, pp305-312, 1995.9
- (9)海難審判庁：旅客船海難の実態、1996.3
- (10)海難審判庁：内航貨物船海難の実態、1994.3
- (11)飯山：人間—機械系設計評価法の現状、人間工学第5巻第6号、1969
- (12)小瀬他：操船シミュレータ特集、日本造船学会誌 781号、pp2~43、1994.7
- (13)小林他：操船シミュレータ特集、日本航海学会誌 127号、pp1~45、1996.3
- (14)日本航海学会操船シミュレータ研究会：Marine Simulator Seminar 1997 セミナー—船舶操縦に関するシミュレータの活用—教育訓練と運航環境の評価—、1997.1.30
- (15)Barber: The need for improved curriculum development in marine simulation training, Marine Simulation and Ship Maneuverability '96, pp77-88, 1996.9
- (16)Wulder et al: Simulator time and its sea time equivalence (phase I and II), Marine

Simulation and Ship Maneuverability '96, pp109-124, 1996.9

(17)Iribarren et al : Safety analysis for the Port of Barcelona(flammable products basin) using a real time maneuvering simulator, Marine Simulation and Ship Maneuverability '96, pp21-26, 1996.9

(18)Gong: Development of harbor capability assessment simulation system by the application of fuzzy algorithm, Marine Simulation and Ship Maneuverability '96, pp161-167, 1996.9

(19)Cross: Methodology for bridge simulator skills assessment, Marine Simulation and Ship Maneuverability '96, pp145-151, 1996.9

(20)Ckemmensen: Cognitive aspects of the captain's work in a critical situation, Marine Simulation and Ship Maneuverability '96, pp177-189, 1996.9

(21)渡辺：飛行シミュレータと最近の視界装置、日本航空宇宙学会誌第42巻第491号特集「航空宇宙におけるシミュレータの動向」、pp2-9, 1994.12

(22)奈良崎：バーディゴ・シミュレーション技術、日本航空宇宙学会誌第42巻第491号特集「航空宇宙におけるシミュレータの動向」、pp17~22, 1994.12

(23)菅本：フライトシミュレーターユーザーから見た最近の焦点、日本航空宇宙学会誌第42巻第491号特集「航空宇宙におけるシミュレータの動向」、pp23~26, 1994.12

(24)菅本：フライトトレーニングシミュレータの近況、日本機会学会 No.96-73 講習会教材「航空輸送とエルゴノミクス」、pp17~22, 1997.2.6

(25)塩見：仮想現実感を利用した飛行場管制シミュレーション施設の構成と運用計画、日本航空宇宙学会誌第42巻第491号特集「航空宇宙におけるシミュレータの動向」、pp10~17, 1994.12

(26)金湖他：船舶航行システムの安全評価用シミュレータの開発、日本航海学会論文集第85号、pp17~24, 1991.9

(27)Miller: The potential of virtual reality based simulators to ship handling and marine operations, Marine Simulation and Ship Maneuverability '96, pp39-48, 1996.9

(28)海上保安庁警備救難部航行安全課監修：図解 海上衝突予防法、成山堂書店、1993.9.15

(29)海上保安庁警備救難部航行安全課監修：図解 海上交通安全法、成山堂書店、1992.5.25

(30)福井淡：図解 港則法、海文堂、1998.4.20

(31)巻幡竹夫・有山昭二：海上交通三法の解説、成山堂書店、1995.4.28

(32)日本船長協会事務局(神戸)：大阪湾における一般船舶と(超)高速船の出会いについて〔アンケート調査結果〕、船長第110号、pp.25~45, 1996.8

(33)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、1991.9

(34)今津他：変針行動による避航限界の研究、日本航海学会論文集第82号、1989.8

(35)(財)シップ・アンド・オーシャン財団：東京臨海部海上交通路用船舶の要求性能及び安全性に関する調査報告書平成2年度、1991.3

(36)福戸他：シミュレータによる高速運航の安全性評価について、第60回船研発表会講演集、pp.17~24, 1991.9

(37)(社)日本海難防止協会：狭水道における航行安全対策の開発に関する調査研究完了報告書平成5年度、1994.3

(38)福戸他：狭水道における操船時の余裕について、日本航海学会論文集第92号、1995.3

(39)沼野他：東京湾を例とした幅狭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、pp155~162, 1996.9

(40)(社)日本造船研究協会、(財)日本船舶振興会：高速船の国際基準に関する研究第7基準研究部会国際規則と船舶設計等との関連に関する調査研究報告書の別冊平成3年度、1992.3

(41)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、pp875~886, 1993.12

(42)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、pp893~902, 1993.12

(43)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、pp87~99, 1993.6

(44)伊藤他：幅狭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、pp163~170, 1996.9

(45)井上：航過距離に関する操船者の安全感覚—超高速船と一般船舶の意識の差異—、日本航海学会論文集第86号、pp.1~10, 1992.3

(46)甲斐他：超高速船(ジェットフォイル)操船者の見張りについて、日本航海学会論文集第86号、pp.123~130, 1992.3

(47)今津他：避航所要時間と避航限界、日本航海学会論文集第87号、pp.11~18, 1992.9

(48)(財)日本造船振興財団：関西国際空港海上アクセス用船舶の要求性能及び安全性に関する調査報告書昭和63年度、1989.3

- (49) (社) 日本旅客船協会：超高速旅客船の夜間航行の安全性に関する調査検討報告書、1991.3
- (50) (社) 日本造船研究協会、(財) 日本船舶振興会：高速船の国際基準に関する研究第 7 基準研究部会国際規則と船舶設計等との関連に関する調査研究報告書の別冊平成 2 年度、1991.3
- (51) (社) 日本造船研究協会、(財) 日本船舶振興会：高速船の国際基準に関する研究第 7 基準研究部会国際規則と船舶設計等との関連に関する調査研究報告書の別冊平成 4 年度、1993.3
- (52) 寺野：システム工学入門-あいま問題への挑戦-、pp81~87、共立出版、1985.3.20.
- (53) 村山他：船用機関故障の要因分析、日本船用機関学会誌第 11 巻第 1 号、pp77~86、1976.1
- (54) 村山他：船用機関故障のデータバンクとオペラビリティ向上に関する応用、日本船用機関学会誌第 14 巻第 12 号、pp7~19、1979.12
- (55) 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-操船者が感じる脅威-、日本航海学会論文集第 87 号、pp115-122、1992.9
- (56) 室原他：TSL 飛翔と一般船間の航行方法の検討、第 68 回船舶技術研究所研究発表会講演集、pp250~255、1996.12
- (57) 杓名景義著：海図の読み方、天然社、1980.3.20
- (58) 照明学会編：ライティングハンドブック、オーム社
- (59) 日本色彩学会編：新編色彩科学ハンドブック、東京大学出版会
- (60) 吉永弘編：応用分光学ハンドブック、朝倉書店
- (61) 坪内紀幸編：航路標識基礎理論、(社) 燈光会、1987.8.28
- (62) 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、日本航海学会論文集第 95 号、pp117~124、1996.9
- (63) Numano：Effective representation of light aids to navigation in ship handling simulator, Marine Simulation and Ship Maneuverability '96, pp13-20, 1996.9
- (64) 海上保安庁編：航路標識基礎理論光学編
- (65) 福田忠彦：生体情報システム論、産業図書出版、1995.10.31
- (66) 橋本進：視覚情報とヒューマンエラー、海文堂、1996.11.10

付録

第 4 章の実船実験参加船舶の主要目表

TSL飛翔の主要目等

項目	単位	仕様	
L×B×d	m	70×18.6×7.5	
総トン数	トン	1,427	
計画喫水	m	3.5	オフクッション
		1.1	オンクッション
最大縦距	p/s m	970/900	ノズル角30度、半載状態
最大横距	m	1,050/950	ノズル角30度、半載状態
最短停止距離	m	900	オンクッション→オフクッション、半載状態
最短停止時間	sec	64	オンクッション→オフクッション、半載状態
最大搭載人員	人	20	
最大速力	ノット	54.25	
主機関	ガスタービン：連続最大出力 各16,000ps 2基		
推進用減速機	スター型遊星歯車式 2基		
推進装置	後進操舵装置付ウォータージェットポンプ 2基		
浮上機関	高速ディーゼル×3、ガスタービン×1：連続最大出力 各 2,000ps 合計4基		
浮上ファン	両吸い込み遠心式送風機 8基		
スラスター	なし。但し、船尾は噴射ノズル角の変更で同役割可能		
汽笛	電気式サイレン		
いかり	緊急使用には難（高速実験船仕様のため）		
レーダ	3センチ波 2基		
ログ	EMログ		
双噴射流	双暗室的機能期待の使用はシークエンス上困難		

実験参加船舶の主要目等

船名	L×B×d	総トン数	最大縦距	最大縦距 所要時間	最大横距	最短停止 距離	最短停止 時間	速力
単位	m	トン	p/s m	sec	m	m	min-sec	ノット
5,000トン級 北斗丸	115×16×5.5	5,162	439/523	80~102	538/576	1,050	4-00	16
500トン級 深江丸	50×10×3.7	752	400/460	112/108	550/590	415	-	14

注：Lは全長、p/sは左旋回/右旋回、左時間は最短停止所要時間を示す。

