

1名当直を目指した操船支援システムとその評価

福戸 淳司* , 沼野 正義*, 宮崎 恵子*, 田中 邦彦*
伊藤 泰義†, 村山 雄二郎†, 下野 雅生‡, 松田 和生§

Development a navigation support system aiming at One Person Bridge Operation and its evaluation

by

JUNJI FUKUTO, MASAYOSHI NUMANO, KEIKO MIYAZAKI,
KUNHIKO TANAKA, YASUYOSHI ITOH, YUJIRO MURAYAMA,
NORIO SHIMONO AND KAZUO MATSUDA

Abstract

The number of active sailors is reducing constantly because of aging of active sailors and the lack of appeal for young people. Additionally, optimization of logistic and recession of heavy industries make work conditions of sailor worse. Therefore, we cannot stop the reduction of active sailors and the shortage of active sailors will become a serious problem to keep safe marine transportation.

As a solution, a navigation support system (NSS) with advanced automated function is introduced. However, as sailors should act main role of safety navigation, the NSS should be accepted. To get acceptance from them, the support system should reduce task load, establish acceptable human machine interface and. etc.

In this paper, first, we discussed the support ways for ship navigation based on human factors. Secondly, we proposed the method to evaluate operational safety of human machine systems with "Level of Safety". Finally, a navigation support system aiming at one person bridge operation(OPBO) is introduced. To develop the NSS, a series of simulator experiments were held in an open sea and in a narrow channel. From the results of the experiments and interviews to active sailors, sailor's demands to the NSS for OPBO were obtained. There are two major demands to the NSS. One is reliable automated function. The other is an effective man-machine interface for the NSS not to disturb watch for other ships.

The NSS was designed based on these demands. It adopted many automated functions such as an Electronic Chart Display and Information System (ECDIS), a TRACK PILOT, etc. The NSS also adopted a unique man-machine interface, "Speech Communication".

The NSS is well accepted by active sailors and 3 systems were delivered now.

*システム技術部

原稿受付 平成12年5月30日

審査済 平成12年9月13日

†元システム技術部

‡(株)共和産業海運

§三菱重工業(株)

目次

1	序論	2
1.1	内航海運の現状	2
1.2	研究の概要	3
2	操船支援のあり方について	3
2.1	操船支援の必要性	3
2.2	操船支援システムの要件	4
2.3	航海における作業の流れと支援の内容	8
3	人間を含むシステムの評価法	10
3.1	ヒューマン・マシン・システムの評価 の考え方	10
3.2	評価の手順	11
3.3	運転作業時の余裕の評価	14
3.4	操船シミュレータの役割	15
4	一名当直用操船支援システムの開発と その評価	16
4.1	内航近代化船開発の概要	16
4.2	一名当直に対応した操船支援システ ムの要求仕様の検討	18
4.3	操船支援システムの機能設計	23
4.4	操船支援システムの機能と構成	28
4.5	操船支援システムの評価	33
5	まとめ	46

1 序論

1.1 内航海運の現状

内航船員数は急速に減少すると共にその高齢化が進んでいる。現在、船員という職業は、いわゆる3Kの職場で若年労働者から敬遠されているため、人手不足と高齢化が進み、常に慢性的な労働者不足の状態にある。この結果、人手不足のみならず安全運航の前提となる技術の伝承の面でも問題となりつつある。

また、内航海運業界は、荷主等の他業種を含めた規制緩和の結果、鋼材や石油といった従来のメーカー物流といわれていた業界も競争が激しくなり、荷主同士の製品の相互供給による合理化と相俟って、サービスの向上、とりわけ用船料の引き下げの要求が強

まっている。さらに、今後、海上輸送へのモーダルシフトを進めるためには、用船料の引き下げの他、他の輸送機関との接続を考慮した定時性の確保や荒天による欠損率の低下等輸送品質の向上が望まれている。

この要求に沿って、用船料を引き下げるには、船の維持管理コストを見直す必要があるが、この中で船員費の割合の顕著な増加が着目され、昨今では50%を越えたとされている。現在、船員の時間当たりの経費は既に陸上と較べて10%位は低いとされており、さらに週40時間労働の実施が予定されていることから、事態は悪化の一途にある。このため、人件費の高い日本の状況を考慮して、情報管理や運営の合理化を主体とした一層の経営努力と共に、安全性を確保しつつ省力化された操船をいかに実現するかが重要である。

しかし、省力化の実態はすでに進行しており、事実上の一名当直が、何のサポートもないまま進んでいる状況にある。これは、船員へ過剰な作業負担を強いることとなり、結果として事故の増加を招く事になりかねない。

一方、海上輸送は、日本の経済成長に必要不可欠な物流を支えるために大きな役割を果たしてきた。特に、海上輸送は、比較的まとまった荷物を長距離運ぶ事を得意としており、鋼材や石油等工業原材料等の素材産業貨物のほとんどを分担してきた。また、今後も海上輸送は、大量輸送時の経済的利点や環境への影響の少なさから、物流の柱としての役割を期待されている。

しかし、日本海でおきたナホトカ号の事故や東京湾で起きたダイヤモンドグレース号の事故で、油による海洋汚染を直接経験した事により、航行の安全と環境汚染防止への関心が大きく高まった。

ここで、内航船の安全運航について考えると、現在までは熟練した船員の努力により安全性が確保されてきた。しかし、先に示したとおり省人化が進み、何のサポートもないまま多くの船で一名当直が行われているのが実態である。さらに、内航船における労働は連続して苛酷なもので、例えばある船では航海士3人が単独で4時間ずつ1日2直のワッチを交代で行う。特に、船長は、輻輳海域、港内等は、必ず船橋に詰めている必要がある。また、荷役は全員作業で、当直直前・直後の者にも荷役作業が求められる。さらに、バースの効率的使用が求められているため、荷役後は、すぐに出港しなければならない。

こうした全く余力のない少人数で連続して運航されることから疲労が蓄積し、ひいては事故を誘発しかねない状況にある。

こうした状態を無くするためには、人員の増加が望ましいが、昨今の経営状態からは、さらなる乗組員の人数削減が望まれている状態で、安全確保の観点からも、乗組員の過重な労働を軽減する支援の確立が早急に必要である。

1.2 研究の概要

従来、操船は、主として操船判断を行う船長、操舵を行う操舵手及び見張り員の役割を複数の当直員で分担して行われてきた。これらの役割の内、操舵については、オートパイロットが保針操船の支援に広く使われてきた。

こうした中、1980年代になると、海上物流の増加に伴う海上交通の輻輳化や船員の質の低下等が問題となり、航行の安全性確保を目的とした操船の自動化についての検討が、「高信頼度知能化船」のプロジェクト [1][2] として、1983年から88年まで実施された。このとき、著者等の研究グループは、多目的な船舶航行シミュレーションシステムを用いた自動航行システムの安全性評価手法の確立を担当した [3][4]。このプロジェクトでは、大洋航行から狭水域航行、離着岸操船、錨泊にいたる全ての操船作業に対しての自動化の可能性が検討された。

ここで検討された安全性の評価法は、人間を含む操船システムを評価の対象として検討が重ねられ、著者等は、操船時の余裕を指標値とした安全性の評価手法を提案した [5]。この後、この評価法を基に、1990年代に出現した40ktを超えるスピードで走る超高速船の輻輳海域や同じく超高速船の夜間での操船法及びその支援法についての検討 [6][7][8][9] や狭水道における航行安全対策の策定法の検討 [10] が行われた。狭水道における航行安全対策の策定法の検討において、著者らは狭水道航行時の各局面を網羅した作業分析を操船シミュレータ実験を通じて実施し、通航の安全に必要な情報を整理して安全対策を策定し、操船時の余裕を指標値としてその安全性を評価する手法を提案した。

一方、「高信頼度知能化船」のプロジェクトでは、完全な無人化はできなかったが、多くの高度な自動化技術が開発された。しかし、現実には日本での自動操船技術の実務への適用は遅々として進まなかつ

たといえる。その理由としては、経済的・制度的理由の他、信頼でき必要な精度のあるセンサーと実作業に即したヒューマン・マシン・インタフェースの不備があったと考えられる。

1990年台半ばから、GPSと呼ばれる測位技術、計画航路に沿った船位誘導技術、海図情報のデジタル化等色々な要素技術が発展し、操船の自動化を可能にする条件が整ってきた。

こうした状況の中、船員の不足及び高齢化による質の低下への対応並びにコストダウンの要望に応えるため、航行の安全性を確保した上での一名当直を可能にする操船支援システムの開発が各方面で検討され、1990年代後半には、一名当直による運航を目的とした2隻の近代化船が建造されるまでに至った [11][12]。著者等は、この内航近代化船の開発・評価に携わり、一名当直での問題点と安全な航行に必要な要件の抽出、操船支援システムの基本設計及び乗船調査を通じた有効性・安全性の評価を行った。

また、海外においても、操船の安全性の向上を目的として、先進的な制御機能と有用なヒューマン・マシン・インタフェースを統合した運転支援システムが構築されるに至り、著者等は、運転支援システムの要件についての情報交換をすると共に、その開発手法を共同で検討すべくスウェーデンのSSPAと「先進的運転支援装置のヒューマンファクターに関する研究」と題して共同研究を行った。

本報告では、著者等が実施した一名当直を目指した操船支援システムの開発評価を行う上で検討された、操船支援法、人間を含むシステムの安全性評価法及び操船支援システムの開発及びその評価について述べる。

2 操船支援のあり方について

2.1 操船支援の必要性

船舶を操船する状況をモデル化する時、その主要要素としては、運航者、船舶及び各種航行環境要素が挙げられる。このうち、運航者と船舶は、それぞれ対となる関係として「船舶運航システム」と定義する。一方、航行環境要素は、自然・地理的環境、各種陸上支援施設及び複数の船舶運航システムから構成される交通環境から成り、これらの要素を含むシステム全体を「船舶航行システム」と定義する。また、船舶運航システム以外の全ての要素を、「航

行環境」と定義する。

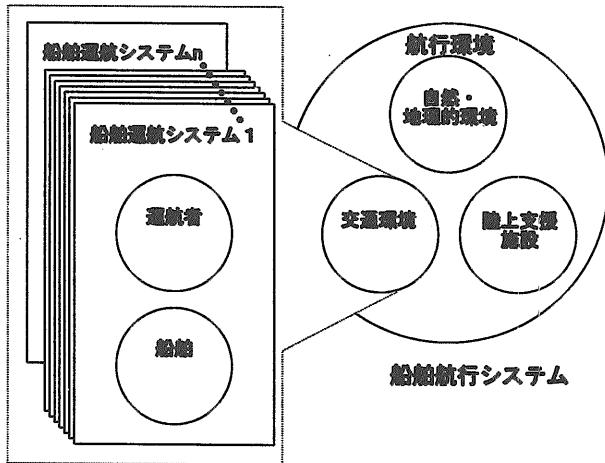


図 1: 船舶航行システム

従来、船舶航行の安全性は、この船舶航行システムの各要素が、適正に機能することにより、確保されてきた。

航行安全の責任に関しては、運航者に負うところが大きいのが現状である。船舶は一度港を離れると独立した船長の意志で動くものと考えられてきたことから、航行の安全に対する責任は全て運航管理の中核である船長に負わされてきた。特に荒天遭遇や機関故障等何が起こるかわからない状況下で、船橋内の限られた情報により運航判断を行わなければならないため、運航者には細心の注意と経験に基づいた的確な判断及び献身的な努力が求められてきた。こうした努力は、長い乗船経験から得られる船舶の運航管理のノウハウ、相互に意志疎通を図り必要な場合には補充し合うという船員間のチームワーク及び航行の安全を保つという強い信念に立脚したシーマンシップというベースがあつてはじめて成し得たことである。

しかし、近年の海運界を取り巻く状況は大きく変化しており、従来の船舶航行システムに大きな影響を及ぼしてきた。現在、外航船舶は東南アジア諸国の外国人船員を多数採用した混乗船が一般化している。また、内航船においても慢性的な船員不足及び高齢化が急速に進んでいる。このため、船舶の運航、維持、管理といったノウハウの伝承及び船員の育成や船員同士のコミュニケーションに深刻な問題が発生しており、現状のままでは船舶の安全運航のペー

スとなるシーマンシップの維持・形成が困難になりつつある。また、物流量の増大に伴い、港湾や狭水道における船舶の輻輳の度合いは増しており、現在のような情報の少ない状態での運航は、輸送効率を低下させるのみならず、衝突や座礁の危険までも増大させており、運航者を取り巻く状況は、悪化する一方である。

こうした中で物流の担い手としての船舶への要求と航海の安全性のさらなる向上を両立させるためには、現在の船舶航行システムの機能及びその構成要素である運航者、船舶及び航行環境の役割の見直しが必要である。今後熟練者の確保が難しくその負担が大きくなると予想される船員については、技量の低下及び就業者の減少が避けられないものと仮定し、小人数かつ熟練を要しない人員での安全運航を可能にするため、現在熟練操船者が行っている作業の一部を船舶の機能及び陸上で明確に分担し、安全な運航を可能にするシステムの構築を進める必要がある。このためには、船舶が持つ操船支援機能については、ハードウェアのみならずソフトウェアも含めた対策が必要で、一名当直による操船を前提として、操船作業を単に支援するのではなく、利用できる情報処理及び自動化技術を駆使して作業の一部を完全に分担するという考えの基に、操船支援システムの構築を行う必要がある。

2.2 操船支援システムの要件

近年の科学技術の進歩は目覚しく、航海機器の分野に関しても多くの自動化された機能が開発・提案されてきた。これらの機能は各時代の最新機器の目玉として次々追加されてきた。

一方、使用する船員の方はこれら機器の使い方を習熟する時間は少なく、使えるようになったとしても、その機能を使うための負担の多さから負担の軽減感が少なく、結果として使われない高価な機器が船橋に鎮座している状況が多々見受けられた。つまり、負担軽減に繋がる便利な機能を持ちかつ操作が容易であるか、規則等によって必要に迫られない限り、最新機器でさえ使ってもらえない。

このため、実際に使われる有効な操船支援システムの要件について、今までの操船シミュレータ実験及びインタビューで得られた熟練船員の意見を基に考察する。

2.2.1 操船支援システムと当直者の役割分担とその明確化

著者等が高速船の安全航行や内航船の近代化の研究のために実施してきたシミュレータ実験の被験者の意見として、特定の作業を信頼して完全に任せられる事が支援システムの機能を使うための条件として挙げられた。つまり、操船支援システムを使用する上で、不十分な機能であったり、効率が悪く使用方法が難解であったりした場合、これらの機能を使用するために人員を貼り付けなくてはならず、作業負担の軽減には繋がらないので結局その機能は使用されない。従って、支援システムには簡単で単純な機能でも良いから、その機能で人間が行っている作業を完全に分担し、実際に当直員の負担軽減に繋がる支援機能を持つ事が求められる。このため、操船支援システムと人間の適切な役割の分担の考え方が重要となる。

現在、操船支援システムには自動船位誘導機能(トラックコントロール機能)等多くの、そしていろいろなレベルの自動化機能を付加することが可能になってきた。自動船位誘導機能は本来操舵員が行っていた操船作業を完全に分担するまでに至っており、当直者の負担軽減、ヒューマンエラーの排除、操船精度の向上等多くの利点をもたらし、一名での操船を可能にする大きな原動力になっている。

しかし、ただ闇雲に可能となった機能を人間に押しつけての自動化では、本当の意味の安全性の確保は困難である。例えば、当直者にとって負担の少ない状態で、自動化機能が正常に機能してもあまり負担の軽減効果は感じられず、輻輳海域での避航操船等状況が複雑で操船の作業負担が大きい場合にこそ機能を発揮して、作業負担がピークに達するところでの負担軽減が望まれる。特に少人数での運転の場合、作業集中時の作業負担を適正にする事は、運転の安全性を確保する上でも重要である。しかし、往々にしてこのような場合、自動化機能が機能しなかったり、再設定のために複雑で多くの操作が要求され、更なる負担を負わせる事となり、結局その機能を使用されなくなるケースが多く、支援機能が使用される全ての状況を考慮した自動化機能の設計が重要である。このため、人間が操船の中心的役割を果たすのだという考えに基づき、人間の特性を考慮して、人間と支援システムの役割分担を明確にし、それに基づいた設計及び評価が行われる事が今後操船支援

システムに求められる。

自動化機器との役割分担の考え方 役割分担は課せられるタスクの量にも関係があるため、主要な作業の分析を行い、ワークロードが大きい時には負担を軽減して妥当な作業量にするための支援をすることが必要である。一方、負担が少なく当直者への刺激が少ない場合は、航行の安全に支障のない程度の作業を当直者に与えて覚醒度のある程度以上に上げてやると共に、作業経験を積む事も重要で、当直者の選択によりある範囲で作業を分担できる事も重要である。

Price[13]は、人間と自動化機器の役割分担の決定手順として、以下の4つの手順を提案している。

Step1:Mandatory allocation

システム要件、環境条件、安全要件等から、人間にしかできない機能は人間に、自動化機器にしかできない機能は自動化機器に振り分ける。

Step2:Balance of value

明確に分担が決められなかった機能については、人間と機械の有効性を比較して、有効な方を選択する。

Step3:Utilitarian and cost-based allocation

効率及び費用の面から、前ステップまでの分担を見直す。

Step4:Affective and cognitive support allocation

Affective support 及び Cognitive support の両面から、分担を見直す。

Affective support は人間の感情面の要求事項で、やっている仕事に価値があり、挑戦しているんだという自己の存在感をアピールする目的で、意識的に一部の意味ある作業を人間に分担させるものである。また、Cognitive support は人間の制御対象に対する認識の形成に関するもので、作業のメンタルモデル及び状況判断の為の知識形成に必要な作業を人間に分担させるものである。

この人間と機械の役割についての判断は、その時の技術レベルや雇い入れることのできる運転員のレベルにより変わるものであり、運転支援システムの導入時期の状況に合わせて十分吟味が必要である。

ここで例として、人間と操船支援システムの役割分担をその特徴を考慮して考察する。

一般に、人間は、パターン認識、情報の統合と演繹、学習、適応という能力に長けており、状況認識、行動判断、大局的な操作指示を受け持つことを期待されている。

また、機械は、疲れない、飽きない、エラーが少ない、記憶容量が大きい、情報処理能力が高い等の長所を持っており、単調で定型的な作業や高速演算処理に向いている。

このことから、自動化機器と人間の役割分担は、

人間側：

状況認識、行動判断、操作指示

操船支援システム側：

情報収集、大量情報の加工、

操作指示の実行

と考えられ、当直者は状況認識や行動判断といった判断作業が中心となり、情報収集や操舵操作等直接的な作業を操船支援システムで受け持つことが望ましく、この環境を実現することを目的とした技術開発が進められるべきである。また操船支援システムは当直者の状況認識や行動判断のための情報を負担無く的確に伝達できることが求められる。

システムの透明性 運転員が自動化機能を使用して運転作業の一部を任せる条件の1つにシステムへの信頼感がある。この信頼感には2つの意味がある。1つは作業を任された運転支援システムが常に間違いなくその作業を実行できる事である。もう1つは、運転支援システムに任せられた作業が、支援システムによって正しく行われている事が容易に理解でき、なおかつ、正しく実施されていない場合は、容易に介入したり従来の方法に戻す事ができる安心感である事が熟練操船者へのインタビューから判った。このことから、操船支援システムを構築する際には、各機能に対する信頼性向上はもちろんの事、システムの構築をできるだけ単純な機能の組み合わせとして構築し、各機能の動きが理解でき、さらに異常を検知した場合には容易に介入できる機能が必要である。

2.2.2 支援機能の統合と集中配置による作業負担の低減

現在、自動化機能を含む多くの操船支援機器が開発されているが、従来それらの機器は単独で機能す

るように作られており、その使用方法も統一されていなかった。しかし、近年これらの情報を有機的に組み合わせることにより、より新しく高度な機能を提供できるようになってきた。例えば位置のセンサーである DGPS と操船系の自動化機器であるオートパイロット及び電子海図表示装置 (ECDIS) を組み合わせることにより、計画航路に沿って船を自動的に航行させる自動船位誘導機能 (トラックコントロール機能) が開発された。このように、機器単独ではなく、機器の有機的な結合により新しい機能を実現し、機械側の役割を広げるための支援機能の統合が今後進められる。

一方、省人化が進み一名での操船が求められた場合、従来通り機器が分散配置されている各機器の操作が不可能になるばかりでなく、情報を得るために大きな負担が強いられる。また、操船結果の最終チェックは今後とも目視によって成されると考えられるので、目視による監視をできるだけ妨げないよう、全ての情報と必要な操作端末を1ヵ所に統合して、分かり易い表示と容易な操作の実現が必要になる。さらにこれらの機器を使う上でその使用方法の統一・標準化を進めて、メーカーや機種毎の使用法の違いを是正する事が、作業負担の軽減及びヒューマンエラーの防止に有効である。

2.2.3 人に優しいヒューマン・マシン・インタフェース

具体的な操船支援システムの設計する際、当直者の作業分析、特に人間の作業である状況認識、行動判断、操作行動の過程を分析・評価し、その過程で出てきた問題点や人間の特性を考慮に入れて、必要なヒューマン・マシン・インタフェースの機能を洗い直し、円滑な作業が実行できる事を確認する必要がある。特に、この際、必要な機能を列記するだけでなく、実際にその作業を人間が行う事ができるかどうかという観点から行動の時間軸での分析を行い、少ない負担で運転作業ができていないことを確認する必要がある。

これにより、操船支援システムを使う際の当直者の負担を評価する事ができ、作業集中時の作業負担が許容値まで低減されているかの確認が可能となる。こうしたヒューマン・マシン・インタフェースの不備や使い難さは、操船支援システムが普及しなかった大きな理由として挙げられる。

例えば、一名当直時の避航操船を従来の操船支援システムを用いて行う状況を考えてみる。避航の対象となる他船の情報は、目視による見張りと同様のレーダまたは ARPA(自動衝突予防装置)機能の付いたレーダから得られる。ARPA 付きのレーダではさらに対象船のデータは数値化されて操船支援システムに送られて処理され、危険判定や避航方法の提示等の避航操船判断のための支援情報として用いられる。この ARPA 機能が他船の数値情報を計算する際には、レーダ画像の中から対象船を示す光点(エコー)を特定し、そのエコーを捕捉するよう指示して初めてデータが得られる。このエコーの捕捉には、ガードリングによる自動方式と手動方式がある。手動方式は人間がレーダ画面を見ながら、トラックボール等のポインティングデバイスを操作して、対象船にカーソルを当ててクリックしなければならず、目視による見張りと同様に並行して行うのは現実的ではない。一方、自動方式は捕捉自体は自動的にある程度できるが、捕捉の解除は人間に任されている他、陸岸付近や輻輳海域では補足の誤りが多い。さらに一度捕捉した船も光点を見失うロスト現象等が発生し、他船の捕捉作業を任せることはできず、動向の知りたい船の再捕捉や不要になった船の捕捉解除等、レーダ画面上での追加作業が発生するため、特にこの機能が必要な沿岸域で使用されない状況である。さらに、操船支援システムから情報を得る際も画面を操作し情報を得る事になり、目視による見張りのための時間はどんどん短くなる。

こうした状況に対処するためには、人間の行う作業を考慮して人間の特性と作業内容にあったヒューマン・マシン・インタフェースを工夫して、操船支援システムを利用する際の負担を軽減する必要がある。

認知機能の重複回避 認知機能の重複回避は、機械とのインタラクションにおいて使用する人間の感覚器及び認知機能の重複を避けるよう設計する事である。

例えば自動車を運転しながら電話をかける場合を考えてみると、自動車を運転しながらプッシュボタンを押すのは容易ではなく危険でさえある。これは両方とも目という感覚器を使用し、さらに自動車の運転と電話番号どおりプッシュボタンを探して押すという空間的認知機能を同時に要求されているからである。この空間的認知機能とは物と物との相対位置やそれぞれの動きを認識する能力で、避航操船の

場合、相手船との相対位置と相対速度から衝突の可能性を認識する能力などがこれに含まれる。

一方、自動車を運転しながら電話で話をすることは比較的容易にできる。人間は空間的認知機能と言語的認知機能を持っているとされており、これらの認知機能は並行して機能するからである。言語的認知能力は記号や言葉の意味及びそれを用いた論理を理解する能力である。つまり、電話で話をする場合、目を使わず、主に言語的認知能力を使っており、運転操作における空間的認知能力と併用でき、人間のリソースをうまく使っている例である。

このように、認知機能の重複を音声などを利用して回避できれば、ヒューマン・マシン・インタフェースの使用上の作業負担は低減できる。このため、少なくとも通常行われる作業について、支援機器の使用を前提にした作業分析を行い、認知機能を有効に活用した機器設計が必要である。

機器操作の標準化 支援機器使用上の作業負担を減らし、ヒューマン・エラーを低減させるもう1つのポイントとして、標準化された操作法を採用することが挙げられる。これは使用方法の誤りや遅れによるヒューマンエラーの低減に繋がる他、操作の習熟も容易となる。操船支援システムの習熟作業の低減は、支援システム導入における大きな要望事項の1つであった。現在同じ船社の船間であってもメーカーや型式の違いによる使用法の違いがある他、比較的短い周期での船の乗り換えが日常化しており、乗組員はその度使用法の再修得が必要となるため、結局その機能は使われなくなる場合がある。

このため、修得が容易で思い出し易い操作法を設計し、その標準化を進めることが重要である。

2.2.4 操船支援システムによる運航を支える支援体制

当直体制 操船支援システムの利用を推進する上で、装備の近代化と船員制度との関連を明確にする事は重要である。どのような操船システムを搭載したとしても、同じ資格の船員が同じ数だけ配乗される必要があるのであれば、装備に要する経費分だけコスト負担が大きくなり採算に合わない。船と人間とで安全に操船するために必要な機能を備えるという立場から考えると、一名当直用の新しい操船支援システムを搭載した際それに応じて船員数や重複する

機能を持つ他の機器の削減が可能となれば、トータルな運航採算という立場から近代化装備の採用が促進される。この目的のためには船橋内の仕事はあらゆる操船環境下において一名で可能という条件を満たすためのシステム設計を行い、検証する事が必要になる。

また、現在ある航海部員と機関部員の作業の平均化も必要な改革の1つといえる。機関部門はMO化が進み、昼間に行われるMOチェックを昼間の定時に行えば、大きな故障が起きない限り負担は少ないと言って良い。さらに多くの機関モニター機器は船橋にも配置されている。一方、航海部員は連続した航海当直と事務処理を任されており、作業のアンバランスは明らかである。こうした航海部員と機関部員の役割分担の改善や部員の統合を実現するためには、機関部の信頼性向上の他、陸上からの技術的支援方法を確立し、機関に対して経験が少ない航海部員でも対応できるような体制を作る必要がある。

航行環境の整備 交通の要衝である狭水道や航路交差部においては、潮流等の自然環境や地理的環境条件の影響により、操船者にとって困難な状況になりがちである。さらに海上輸送量の増大や輸送の効率化を目的とした船舶の大型化が進むに従って、これらの海域を安全で効率的に運用するための支援が必要になってくる。特に日本では航路と漁場が渾然一体となって存在し、漁労作業が必要以上に優遇されているため、海上交通の障害にさえなっている。このため少なくとも今後の海域の安全で効率的な利用を進めるためには、漁場と航路の分離のための法的整備を進める必要がある。

また、安全航行に必要な情報の提供は操船支援システムの利用推進のみならず、従来の船舶にとっても重要な支援となる。特に操船支援システムを実用化する際、自動化機能に入力される情報提供は必要不可欠であり、電子化された海域情報提供のためのインフラ整備は航行の安全性向上及び船舶の大型化等による輸送効率の向上のためには重要である。

2.3 航海における作業の流れと支援の内容

航海における作業は、航海計画の策定とそれに基づく当直作業の2つに大別できる。

航海計画は、目的港や荷役時間、自然環境情報及び過去の経験から、利用する航路や主要な地点での

大まかな通過時刻を計画するもので、様々な情報を基に計画される。

一方、航海当直作業は当直者が与えられた航海計画と遭遇する環境に合わせて自船の行動を判断し制御するものである。

その過程は、図??に示す通り、

- (1) 自船及び航行環境の状況認識、
- (2) 認識された状況に基づく行動判断、及び
- (3) 行動を実現するための操作指令及び機器操作の各作業の階層的なループとして表現できる。状況認識は判断結果や操作結果の確認として常に行われ、認識結果に変化があった場合、行動判断を行い、必要に応じて操作指令を行う。このように当直時には、状況認識作業、行動判断作業、及び操作指令といった作業が渾然一体となって行われてきた。しかし交通流の増加による遭遇船舶の増加に少人数の当直者で対処するためにはこれらの作業を分離し、その一部を情報処理能力の高い機械に分担させる必要がある。特に従来は当直者の長年の経験や操船感覚に基づく勘によって安全運航が保たれてきたが、船員の陸上勤務の増加や船員数の低下による熟練者の不足を考えると、熟練を要さない普通の人々が安全に運航できる操船システムの枠組みの構築が急がれる。以下に、各作業の現状と求められる支援内容を概説する。

航海計画策定 航海計画は出発港から目的港までに遭遇する航行環境を考慮し、大まかな行動計画を立てるものである。この作業で必要となる情報は、目的港の情報、他、荷役関係の情報、航行が予想される海域の海図及び水路情報、気象・海象に関する情報及び過去の航行経験が挙げられる。航海計画はこれらの情報を基に主要通過点のリストとその点の通過予定時間の形で表現される。この計画策定は船長が行い、他の船員への細かい操船指示はそのリストや口頭での指示で伝えられているため、船長の負担は非常に大きい。この負担を軽減するためには、航海計画を効率的に策定し他の船員に効果的に伝える支援が必要である。

こうした支援のベースはコンピュータを使用したシステムに移行する流れにあるため、電子化された情報の作成は必要不可欠となる。航海計画策定は当直作業と異なり時間的制約は少ないのですが危険な状況に陥る事はないが、計画航路を作る際の情報支援と間違いない入力のための支援及び座礁等の危

険のチェック機能が必要である。さらに一名当直時や熟練度の低い船員による当直の場合は、適切なアドバイスや航行上の注意事項を与える事も安全性確保には効果的で、著者等により計画航路にこうした情報を取り込む試みもなされた [14]。

状況認識 状況認識作業は、情報収集とその情報に基づく状況の認知に分けられる。

情報収集は直面する環境条件を正確に把握するため、最新情報を収集することが不可欠である。その情報ソースとしては目視による見張りや航海計器からの情報が挙げられるが、その信頼性と即時性の良さから現状では目視が重要視されており多くの労力が目視による監視作業に費やされている。今後高度な自動化機器を採用した操船システムが実現した場合にも、操船状況の直接的な最終チェックとしての目視による見張りの重要性は変わらないと思われる。

航海計器は近年その性能は向上しており、情報収集作業の内 DGPS による船位決定作業等は操船支援システムが役割を分担できるまでになっている。一方他船情報については、レーダ/ARPA によりある程度電子データとして収集は可能であるが、特に ARPA については手動による捕捉及びその解除作業が必要な他、ロストや乗り移りによるデータの信頼性の低さから、輻輳海域等最もその支援が必要なところで十分に機能していない。また、狭水道等ではレーダ波が届かない島影等の船は検出できず、操船判断を難しくする大きな要因になっている。今後操船支援システムで他船情報を扱うためには情報の電子化と情報収集の自動化が必要不可欠であり、他船情報や狭水道航行時の自然環境情報等の収集については、陸上施設を含めた情報支援や現在設置義務化が進んでいる船舶自動識別装置 (AIS) の積極的利用が望まれる。

状況認識は当直者が目視によって得られた状況のイメージに収集された情報を組み込むことによって、近い将来の状況を予想するベースを作るものである。これにより衝突や座礁の危険を推測し、行動変更の必要性を認知する。特に状況認識においては空間的な認知能力が重要であり、この意味で目視情報が現在まで主に使用されてきた。状況認識の際に使用される情報としては、目視情報の他、自船位等の自船航行状態、他船動向、潮流等の自然環境情報、地理的環境情報等が挙げられ、当直者の支援においてはこれらの情報を過不足なく適当なタイミングでしか

も容易に理解できる形で提供する事が求められる。

行動判断 行動判断は、認識された状況と自己の判断基準に基づいて航海計画を変更する形で行われる。状況認識において、航海計画通りの操船が安全上問題無いと判断された場合その計画に沿った操船が選択されるが、他船との衝突等の危険があると判断された場合は、その危険を回避する行動が選択される。回避行動の判断に際しては、自船回りの地理的環境、潮流等の自然環境、他船の状況、衝突の危険のある相手船との離隔距離、計画航路からのずれ、航行規則等の知識を基に総合的に判断される。

危険回避の判断時に当直者が注目する計画航路内での横方向の位置や相手船との相対関係といった情報は、目視とレーダ等から得られる限られた情報を当直者が処理して得ているのが現状である。こうした情報処理は計算機をベースとした支援システムで実施した方が精度が高く効率的であるため、当直者が望む形で処理結果を表示して当直者の理解を促すと共に、回避法の提案も含めた情報支援が有効である。

さらに認知の際に得られた情報が必ずしも十分で無い場合過去の経験や知識から安全側の判断が行われるが、この際経験等に基づくアドバイスが重要な支援項目となる。

また、行動判断結果として得られた操船操作による状態の予測も行動判断上有効である。操船操作による状態の予測は、従来、操船者の経験から導き出されていたが、特に複雑な推進器を持つ船の操船や経験の少ない船員にとって、その予測は困難であると共にその精度にバラツキがある。スウェーデンの SSPA では、こうした状況に対応して、操縦運動モデルに基づいて操船操作結果を予測し、操船者に効果的に伝える機能として "Predictor" と呼ばれる機能を開発しており、実船に搭載され航海の安全性向上に大きく寄与しているとの評価を得ている。

操船実行 操船指令及び操船操作は、計画航路または危険の回避行動判断結果に沿って自船を誘導する作業である。船舶を誘導する際の問題点としては自重の大きさに比べてアクチュエータの能力が低いことから来る運動の時定数の大きさが挙げられる。このため、屈曲した航路に沿った操船や避航操船においては、操作に対する運動の遅れを補うため適切なタイミングで操舵を開始する必要がある。この操舵時

期の決定は、特に変針角度が大きく変針頻度の多い狭水道域では非常に重要で、熟練者の経験と勘に頼ってきたのが現状であり、有効な支援が望まれる。

こうした操船作業の自動化は、船位情報や自船の運動モデルの高精度化及び制御技術の向上の結果、自動船位誘導技術として実用化の段階にあり、当直者の負担軽減と操船精度の高度化を目的として積極的に取り入れるべきである。また操船支援システムへの指令については、咄嗟の状況変化に対応した直接的な操船指令から危険回避判断結果に基づく前広な設定航路の変更までを考慮して、指令し易く信頼性の高い指令方法を確立する必要がある。

3 人間を含むシステムの評価法

3.1 ヒューマン・マシン・システムの評価の考え方

システムにはその使用者のニーズに基づいた目標がありその目標に沿って絶えず変化する。図2にシステムのライフサイクルの概略図を示す。広辞苑によると、システムとは「複数の要素が有機的に関係し合い、全体としてまとまった機能を発揮している要素の集合体、組織、系統」と定義されている。つまりシステムの開発は複数の要素を組み合わせることで使用者のニーズに合った機能を実現する過程である。この際、目的を達成できる複数の案が提案され、その中から最適なものまたはできるだけ多くの関係者に受け入れられるものが選ばれシステムとして構築される。

こうして開発されたシステムは運用に移り、使用者はシステムによってもたらされる高度な機能を享受して、そのニーズを満たすことができる。しかし、エネルギー事情等の社会環境の変化や技術革新によりシステムに求められるニーズは変化し、新しいニーズが生まれ、それに基づいたシステムの再構築が行われる。

このシステムのライフサイクルにおいて、システムの評価はそれぞれの段階で実施される。例えば、システム開発においては、システム案の比較評価や製品の機能テスト、運用時には使用者のニーズの充足度評価、さらにニーズの変化に対応したシステムの改修・再構築の必要性の判断がそれにあたる。このため、システムの評価法を確立することは、システムの有効性を維持する上で重要である。

また、システムに対する命題は与えられた達成す

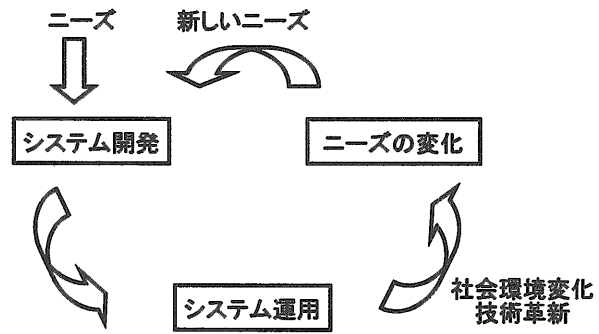


図2: システムのライフサイクル

べき目標となる状態にシステムを保つことである。このため、システムはその目的を達成するために必要な機能を持ちその機能を必要な期間維持出来なければならない。

一方、操船支援システムに代表される運転支援システムの運転対象は、船舶の操船を含めて巨大で複雑であると共に、一度事故を起こすとその影響は非常に大きく、システムを評価する上でその安全性の確保は大きな評価項目となる。このためシステムの構成要素に不具合があった場合、それを検出し、機能回復や代替手段等の対策がそれぞれ準備されており、その対策が余裕を持って実行できることが必要となる。

システムを評価する場合、目的を達成するための機能を生み出すシステムの構成要素の特性を把握することは重要である。構成要素が機械系や電子制御系の機器の場合、過去のデータの蓄積や機器の仕様から、その性能や信頼性は比較的明確に把握することができる。しかし、構成要素が人間となるとその扱いは難しくなる。

人間と機械の関係は職人と工具の関係に始まり、動力を伴う機械が出現し、一部作業の自動化により人間と機械が仕事を分け合う分業が進んだ。さらにこうした機械の能力は向上すると共に、機能統合が進み大規模化・複雑化し、人間の介入を極力減らすことを目的に完全自動化をも視野に入れた検討がなされた。しかし、完全自動化は現在の技術をもってしても実現にはまだ隔たりが大きいと、人間と自然な協調を実現できる運転システム設計が求められた。

大規模で複雑な運転システムの中に人間を入れる目的は、コスト的に自動化は見合わない、現在の技術では自動化が難しい、あるいは必要な情報が不足したり、不確かな情報での判断が求められる複雑な

状況に対処することであった。これは人間の長所を駆使した微妙で複雑な状況認識及び運転判断を期待するものである。しかし、これに伴い思い込み等によるヒューマンエラーを引き起こす機会を残す事となった。このため評価においては、人間の長所を生かし、欠点を補う支援方法について十分考慮する必要がある。

さらに人間をシステムの構成要素として考える場合、その機能を維持させる事が重要である。従来、航海機器を設計する際は、人間は十分に訓練されており、常に設計時の思想通りに動くものと仮定していた。しかし、実際には色々な要素が影響を与えていることから、人間の機能維持についても十分考慮がなされなければならない。例えば、作業中に感じる疲労や作業負担及び作業時の心理的状況は、人間の機能維持に大いに影響を与える。特に、運転支援システムと人間の組み合わせである機能を担保している場合、運転支援システムの機能が十分であると共に、それが十分人間に受け入れられ、実際に使われることを確認しなければならない。

このため、システムの評価においては現実に実施される主要な作業を時間軸に沿って解析し、疲労や負担、使い勝手がその作業を継続的に行うにあたって許容できるものかどうかについて検討することが必要である。また、運転支援システムの一つの機能として、支援機能を十分活用できると共に、使用時の負担を許容される程度小さいものにできるヒューマン・マシン・インタフェースの開発が必要である。

3.2 評価の手順

システムを評価する際は、まずシステムの目的を明確にし、その目的に合致しているかを判断する。判断の結果、合致していない場合は、その問題点を洗い出し、問題を解決する対策案を検討し、現行のシステムと対策案を含む新しいシステムを比較評価し、最適な策を選ぶ事となる。この際の評価のポイントとしては、

- (1) 目的達成のための機能が備わっているか?(機能の充足)
- (2) 人間も含めて必要な期間その機能を維持できるか?(機能の維持)
- (3) 人間を含めた構成要素に不具合があった場合、許容できるレベルの安全を保つことができる

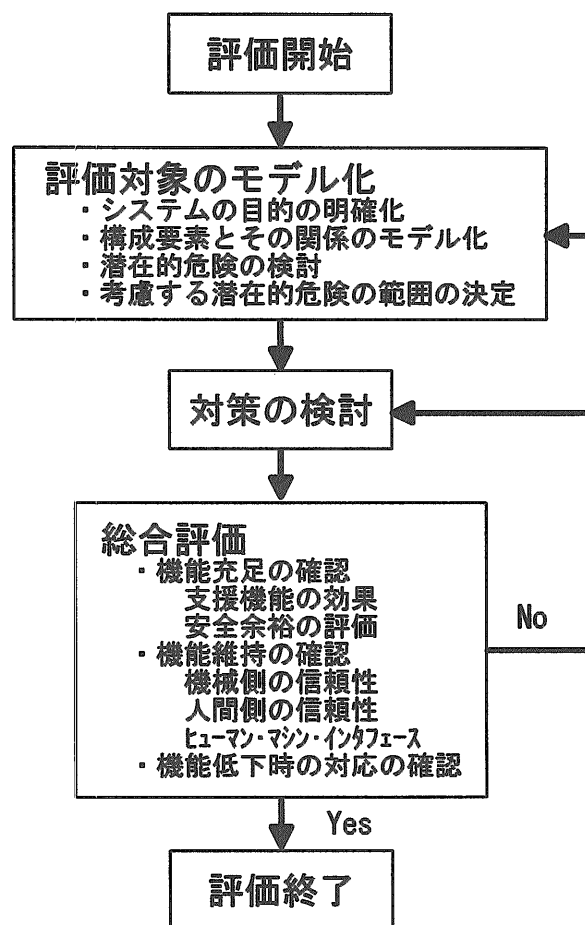


図 3: システム評価の手順

か?(機能低下時の対応)

が挙げられ、対策を施したシステムでの作業全体や非常時の対処を運転員が許容できる負担で実施できる事の確認が重要である。

以下に、この考えに基づいたシステムの評価の手順を操船支援システムを例として示す。図 3 に、評価の流れを示す [15]。

3.2.1 評価対象のモデル化

システムの目的の明確化 評価においては、まず評価対象となるシステムの目的を明らかにする必要がある。本論で扱う操船支援システムの目的は、操船に必要な情報及び操船制御機能を適切に提供し、操船者と協調して安全で合理的な航行を実現する事にある。

(1) **構成要素と要素間の関係のモデル化** 操船支援システムの評価は従来の操船作業との相対評価となるため、まず現状の操船作業及び評価対象となる操船支援システムを用いた作業の分析が必要で、機器及び人員の構成や環境条件等運転に影響する要因を洗い出し、システムの全体像をモデルとして作成する。システム構成及び機能については、船自体の特性や従来からの航海情報機器の他、操船系機器、操船者や当直体制等の人的要素を洗い出し、それぞれの機能と役割を明らかにする。この際、人間を含むシステムであることを考慮して、操船者が実際に行っている各種作業についても解析を行い、作業上の問題点や改良のポイントを洗い出し、次の対策案の策定につなげる。

潜在的危険の検討 環境条件はシステムが動作する環境というのみならず、システムの動作を阻害する要因である潜在的危険として検討されなければならない。総合評価の際には、この潜在的危険に対応したシステムの機能の充足度が評価のポイントとなる。

潜在的危険は何かの事象により顕在化する可能性を持っており、その顕在化によりシステムの価値に影響を及ぼす可能性のある事象で、いろいろなレベルのものがある。例えば、隕石に当たるといったほとんど有りそうもないものから、漁船の思わぬ方向への突然の変針等日常的に起こりうる事象まで全て潜在的危険である。潜在的危険には外的要因及び内的要因がある。操船支援システムの場合、外的要因としては、衝突危険船の接近、浅瀬への接近、風や潮流等外乱による操船への影響等が、内的要因としては、居眠り等による当直員の意識の低下、当直員への作業の過度の集中、機器の故障等が挙げられる。

こうした潜在的危険の検討は机上での思考実験や熟練者に対するインタビュー及び実際のシステム運転状況の観察によってその大部分を抽出できる。しかし、ヒューマン・マシン・インタフェースについては現実に即した作業を体験することが必要不可欠で、その不具合による潜在的危険を見つけ出す事もシステム評価において重要な要素である。特に新しい機能を搭載したシステムの評価をする場合、その機能を実際に使用した運転作業を経験する事は、新しい機能の使用法を提供するヒューマン・マシン・インタフェースを評価する際に非常に重要である。操船シミュレータはこうした新しいシステムの運転の体験を可能とし、インタフェースや作業内容を把

握するための有用なツールである。

評価時に考慮する潜在的危険の範囲の決定 最後に評価時に考慮する潜在的危険の範囲を固める。本来全ての潜在的危険について検討する必要があるが、全ての危険を網羅する事は時間的にもコスト的にもその実現は難しい。実際、原子力プラントの安全性評価では、航空機等の衝突や地震も潜在的危険として想定しその評価が行われているが、船舶についてそのような状況を考えるのはナンセンスである。このため、システムを開発・評価する際には潜在的危険の発生頻度とその危険による影響を考慮して、評価の際に考慮する潜在的危険を選定する。また、それ以外の潜在的危険については適宜当直者が対応することが期待されているので、評価時には考慮されない潜在的危険を考慮した余裕の評価を行うこととなる。これにより評価者及び当直者は航海支援システムがどの程度の潜在的危険まで考慮されているかを明確にでき、それ以外の危険に対処するために必要な余裕の感覚と操船時の心づもりができる。

3.2.2 対策の検討

先に選定した考慮する潜在的危険や作業上の問題点の影響を十分に抑制、除去するための種々の対策が検討され、新しいシステムに取り入れられることにより、より良いシステムとなることが、システム評価の大きな狙いである。

対策案の策定にあたっては、潜在的危険の性質や影響を調査し、具体的な機能にブレイクダウンして対策案を策定する。このブレイクダウンの際には、危険や不利益に対して、(1) 危険や不利益が発生する誘因を除去する、(2) 顕在化した危険から事故等深刻な事態に至るパスを切断する、(3) 事故の影響を抑制するといった観点から対策案の検討を行う。特にヒューマン・マシン・インタフェースの検討では、各作業局面で作業上必要となる情報の収集、状況を認識するための情報処理、認識された情報に基づく行動判断及び具体的な操作指令や実操作での機能や利便性について、実務者による要求仕様の抽出を行い対策案として具体化させる事が継続的に支援システムの使用してもらう上で重要である。

次にその対策案に利用できる既存の技術を調査し、その技術の組み合わせで実現可能かどうかを検討する。この際既存の技術が利用できない場合、その機

能は開発要素となる。

3.2.3 総合評価

総合評価は、現状を含む複数のシステムに対する相対評価となる。評価の項目としては、3.1節で述べた(a)機能の充足、(b)機能の維持、(c)機能低下時の対応が挙げられる。

機能充足の確認 機能の充足については、操船支援システムが潜在的危険が顕在化した場合に当直者と協調して、安全かつ余裕を持って対応できたかどうかで評価を行う。この際、各危険についての対策案による危険回避の確認とその時に必要な余裕が確保されているかの確認がなされる。その方法としては、机上での検討の他、評価者が実際に対策案を施した運転を体験して評価することが望ましく、実システムまたはシミュレータで模擬運転を行う事となる。特に危険な状況における安全対策の動作確認のために実機を用いる事は安全上困難である他コスト面でも無理があるため、シミュレータが用いられることが多い。

一方、考慮されなかった潜在的危険や作業上の問題点については、操船時に適宜当直者が対応する事となる。このため、これらの考慮されていない潜在的危険が操船作業時に顕在化する可能性を考慮して、操船作業においてある程度の余裕を確保する必要がある。この余裕の評価は操船経験や安全感覚によるところが大きいため熟練者の主観による評価が不可欠である。以上述べた通り、機能充足の評価は考慮された潜在的危険が顕在化した時の危険回避の確認と、その他の潜在的危険の可能性を考慮した余裕の評価によってなされる。

機能維持の確認 機能維持については、機械側の信頼性と人間側の問題に分かれる。機械側の信頼性については、一般の工業製品の考え方と同様の評価となる。人間については、操船支援システムが当直者に受け入れられるかどうかと、操船作業時の疲労や作業負担が適切であったかが評価のポイントとなる。

一般に操船支援システムの導入は人員の削減等のコスト削減案と合わせて実施されるため、適切な支援がなければ1人当りの作業量は増えることになる。操船支援システムを導入するポイントとしては、操船支援システムが有効に使用され、その働きにより

1人当りの作業量が許容範囲内にまで減ることが求められる。さもなければ、支援システムは使われず当直者の負担が今より増す事になる。運転支援システムを受け入れてもらうためには、利便性の向上と信頼性を確保し、それを操船者に理解してもらわなければならない。

利便性には2つの意味があり、1つは省力化機能の採用による作業自体の負担の軽減、もう1つは良好なヒューマン・マシン・インタフェースの採用による支援システムとのインタラクションの負担軽減である。省力化機能の採用による負担については、支援機器との役割分担の考えに基づいた適切な分担がなされているかどうかで評価される。支援システムとのインタラクション時の負担の軽減、つまりシステムの使い易さの評価については、使い方の覚え易さ、利用時の使い方の思い出し易さ、効率の良さ、従来作業との親和性、疲労低減の項目が挙げられ、好ましさと併せて実務者による主観的な評価が必要となる[16]。

また、2章でも述べた通り信頼感にも、2つの意味があり、1つは機器自体が持つ信頼性で、もう1つはその機器が不具合になった時に、当直者が自分でその機能を代行できるという自信である。Moray等[17]も、自動化機能を持つ支援システムを使い始めるための条件として、飛躍的な信頼の獲得(Leap of Faith)を挙げており、信頼感を得るためのファクタとして、試行錯誤の経験及びシステムに関する理解の向上を挙げている。また、支援機能の動きが理解でき、いつでもその機能を代行が可能であるという操船者の自信も機器使用を促す意味で重要である。

機能低下時の対応の確認 システム機能低下時の対応については、操船支援システムと人間との間で異常を相互に検出し、対策を講じる手段を持つ事及びそのシステム異常対策機能が当直者の負担にならないように構築できる事が必要である。このため、評価においては、各機器及び当直者の異常状態を洗い出し、それぞれの状態における対処方法を示すこととなる。

最終評価 最後に、上述の潜在的危険に対する機能の確認、操船時の余裕、支援システムの利便性・信頼感及び機能低下時の対応状況、さらには、トータルコスト等を考慮に入れて、評価者間での合意が形成される。

3.3 運転作業時の余裕の評価

総合評価においては評価者間での合意を得る努力が払われるが、立場の違いによりそれぞれの評価者は利害関係が異なる。即ち、船舶の運航を例にとると、操船者には常に安全性と合理性を求められ、能力の範囲内で最も安全かつ合理的な操船を行っている。船の利用者は高度な安全性と適切な運賃を求め、運航会社は十分な安全性を考慮しつつ、運航の経済性をも考慮した運営を行っている。

このように立場の違う者が航行の安全性のような主観的価値観の評価を行う場合、その合意を得るには共通の基準を設定し、それを基にお互い合意できるかどうかを互いの立場を理解し評価を行う必要がある。

著者等は、安全性を評価する基準としてシステムの有効範囲にあたる「考慮すべき潜在的危険」とその他の潜在的危険を考慮した「安全余裕」を提案している [5]。つまり、評価者はシステムの設計・開発時にどの程度の潜在的危険まで考慮し、その危険に対してどのような対策が立てられ、どの程度の余裕を見込んでいるかを評価者間で互いに認識した上で、安全についての合意を行う事となる。

潜在的危険は安全運航に悪影響を及ぼす可能性のある事象で、それが顕在化した場合、その危険を検出し、適切な回避動作を行う必要がある。こうした危険回避機能の確認にシミュレータ実験が用いられる事がある。しかし評価の際実施されるシミュレータ実験や訓練で結果としてその危険を回避できたとしても、これで安全であったと評価することはできない。つまり潜在的危険が顕在化した時にその危険を回避できる機能を持つ他、その危険の検知から危険回避行動を終了するまでの一連の動作の中で、他の不具合事象によって生じる事態、即ち”危険回避時の潜在的危険の顕在化”にも適切に対応できる余裕があって、はじめて安全であると評価できる。例えば、避航操船中にさらなる衝突危険船との遭遇に対応するためには、新たな危険船との遭遇を見越した余裕を常に確保した操船を心掛ける必要がある。この時の余裕を「安全余裕」と定義し、その安全余裕の大きさにより安全を評価する事ができる。

安全余裕は、潜在的危険の種類に応じて、衝突までの時間や変針による避航操船のためのルーム、多重系で構成されるシステムにおける代替手段への切り替え等様々な形態で表現されるため、直接安全余

裕を単一の指標で数量化することは難しい。また安全余裕を評価する際、考慮されない潜在的危険の影響については、熟練者の経験を基に安全感覚としての彼らの主観を入れざるを得ない。

著者等はこの運転員の主観値である安全余裕を測る方法として、「安全のレベル」を提案している [15][18]。運転員は確保する安全の内容に応じた安全のレベルを階層的に持っており、運転時の余裕に応じてその安全レベルを変えて作業を行っていると考えられる。つまり、非常に緊迫して余裕が無い時はとりあえず最低限の安全を確保する作業に集中し、余裕を創出しようとする。一方余裕のある場合は大局的な判断によるより安全な判断が行われ、複数の状況やそれらに対応した対策を想定した操船判断が行われると考えられる。例えば、輻輳海域を航行する高速船の操船時の余裕評価の際に用いた安全のレベルを以下に示す。また、図4に安全のレベルと作業時の余裕の関係を示す。

- レベル1 衝突は起こらなかったが、相手船に脅威を与えるような操船法を用いざるを得ない状況
- レベル2 衝突も起こらず、相手船にも脅威を与えない状況
(相手船への配慮ができる余裕がある。)
- レベル3 事前の大局的な判断により、衝突になる見合い関係を回避できる状況
(大局的な判断ができる余裕がある。)

図の縦軸は評価対象作業を、横軸は作業量を示し、一点鎖線は人間に可能な単位時間あたりの作業量を示す。この図では安全を3つのレベルで表現しており、1番上のバーグラフは各レベルの凡例で、横縞のハッチ部分がレベル1の安全を確保するために必要な作業量、斜め十字のハッチ部分がレベル2の安全に対応した作業量、十字のハッチ部分がレベル3の安全に対応した作業量を示す。ここで、安全のレベルを高速船の例で説明する。作業aを非常に輻輳している海域を支援情報無しで操船する作業、作業bを通常海域を支援情報無しで操船する作業、作業cは通常海域を支援情報を用いて操船する作業とする。

輻輳海域を支援情報無しで操船している作業aでは、レベル1の安全である自船の危険回避はできているが、相手船に脅威を与えるような避航操船をし

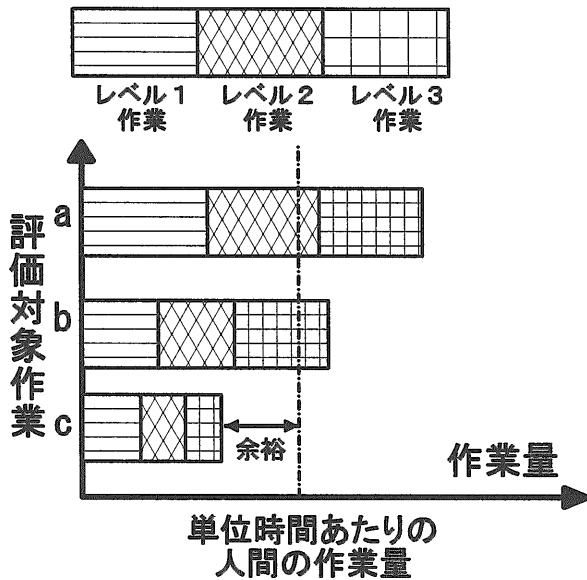


図 4: 安全のレベルと余裕

ている。作業 b はレベル 2 の安全である周囲の船に対する配慮はできているが、支援情報に基づいて前もって衝突の危険を回避するといった大局的な判断はできていない状況である。また、作業 c は大局的な判断ができ、なおかつ作業量の余裕をもっている状態である。従って、求められる安全性がレベル 3 の作業ができることであれば、作業 c の状況になることが求められる。また、全体の作業量は航行環境が困難な場合には増え、支援内容が充実すれば減ることとなるので、この余裕の評価法で航行環境の困難さや支援の効果を加味した余裕の評価ができる。

従って、熟練者が運転経験から取得する安全のレベルを定義し、主要作業がどのレベルで行われているかを示すことにより、実現できた安全レベルを尺度として余裕を評価できる。表 1 に、操船における安全レベルの概念を示す。

表 1: 安全レベル

レベル 1	作業に集中することによりその作業が実行可能。
レベル 2	不測の事態を考慮に入れた操船が可能。
レベル 3	危険を前広に予見でき、大局的な判断に基づいて回避可能。

実際の評価においては、ここで提案した安全のレベルの考え方を基に、運転のエキスパートと評価者が運転時の知識や経験及びシミュレータ実験等での運転体験を基に安全のレベルの定義を行い、評価対象の運転作業がどのレベルで行えたかを主観的に評価することによって運転時の余裕を評価する。この際、各安全レベルを担保するために必要な注意点等から物理量として指標値を求めることができる場合、その指標値は、評価対象作業がどのレベルにいるかを評価する上での有効な判断材料となる。

3.4 操船シミュレータの役割

従来操船支援システムの開発・評価はシステムの開発者主導で行われてきた。まず開発者は熟練船員からニーズを聞き、そのニーズを解釈し、自身の持っている技術と照らし合わせて新しい機能を仕様として固めて製品化してきた。しかし、開発者自身が操船に関する知識や経験を持っている場合は少なく、熟練者の言葉では表してはもらえない常識を含めたニーズを十分理解できないまま支援システムの開発が進められ、操船者に十分に受け入れられないケースが多々あった。特に新しい機能を用いて行われる主要な操船作業(以下、要素操船作業と呼ぶ)については操船の状況を開発者自身で観察・体験し、言外の常識も含めたニーズを自分で理解して取り込む事が重要である。実際、現実に開発者が操船状況の観察や体験をする機会は少なく、調査する機会があったとしても必要な全ての状況を短時間になおかつ主体的に観察・体験する事は難しい。操船シミュレータはこうしたシステム開発者と熟練船員とのコミュニケーションツールとして非常に有効で、必要な要素操船作業をシナリオとして取り込み、短時間かつ効果的にシステム開発者と熟練船員による現状の問題点及び開発する新機能に関する共通の理解が得られる。さらに、開発者と熟練者がシステムの可能性を違った立場から体験を基にプレーストリーミングする事によりさらなる新システムが創出される事が期待できる。

一方、従来の操船支援システムはあくまで操船の支援という立場で開発されており、支援システムを用いた作業に対する責任は使用者である操船者に任されていたため、機器自体の信頼性については検討されてきたものの、その支援システムを用いた作業についての安全性の評価がなされることは少なかつ

た。しかし、今後操船支援システムによる作業分担を進めていく場合、操船システムを用いた作業の安全性確保とその評価が重要となる。

安全性の評価においては、3.2項で述べた通り、各要素操船において、操船に必要な機能が揃っていること及び人間を含むシステムの機能維持及び機能低下時の対応が確認できることが必要な他、不測の事態への対応のための安全余裕の評価が必要になる。この安全余裕の評価は、熟練者の経験と支援システムを用いた操船作業の体験を比較し、その熟練者の安全感覚に基づいた主観的評価に頼るしかない。このため、安全性の評価においては、各要素操船について必要な機能の動作確認と余裕の評価を操船シミュレータまたは実船実験による作業体験から求める必要がある。

最終的な安全性評価は、プロトタイプとして実物ができたものを実船試験する必要があるが、仕様の段階での安全性評価では、操船シミュレータの利用が効率的と考えられる。しかし、操船シミュレータによる実験も、実船試験に比べて時間的拘束力もなく、多くの場合費用も少ないが、実験は実時間で行われるため、実験件数には限りがある。このため、問題点の抽出や対策案としての新機能の提案は、できるだけ机上での思考実験や人間の簡易モデルによるシミュレーションを用いて検討を事前に行い、実験に際しては、要素作業の問題点に対する各支援機能の寄与を確認することと、新たな代替案によるシステムのブラッシュアップをシミュレータ実験で検証できる実験計画を立てる必要がある。

4 一名当直用操船支援システムの開発とその評価

4.1 内航近代化船開発の概要

500総トンクラスの貨物船の一般的な乗組員数は、5-6人である。6名乗船の場合を例にとると、その構成は船長を含む航海士が3人、機関担当が2人(機関長、機関士)、司厨長1人である。航海当直は、航海士の3人が交代で1人で当直を行う。(例:4時間ずつ2直/1日)また、荷役は全員作業で、当直直後の者も含めて総出の作業である。このように全く余力のない少人数で運航が続くため、疲労が蓄積される事により、潜在的な事故発生確率は高くなると考えられる。特に、内航船の場合、寄港間隔が短く、離着岸・荷役作業が頻繁にあるため、疲労を残した

まま夜間当直をする場合もある。

また、海難事故の発生原因はその約8割がヒューマンエラーであると言われている。海難のヒューマンエラーとしては、見張り不十分、船位不確認、操船不適切、気象海象不注意、居眠り運航、機関取り扱い不良、積載不良、火気可燃物取り扱い不良等挙げられ、純粋な機器故障や不可抗力等を大きく上回る。

これらの遠因としては、1つは、長時間の一名当直の影響による注意力の低下や居眠りが挙げられる。表2は、当直人数と海難事故の発生割合を示している。一名当直で操船されている船舶の割合も関係するので一概にはいえないが、一名当直時に海難事故の3/4が起きており、一名当直時の当直者のヒューマンエラーや注意力の低下及び居眠りを起こさせないための支援及び、当直者のエラーを検知し、そのエラーに対して的確に対策を講じる事ができる支援システムが望まれる。

表 2: 当直人数に対する海難事故の割合 [19]

当直人数	海難事故の割合
一名	74%
二名	17%
三名	7%

こうした状態に対処するためには、乗組員の増員が望ましいが、昨今の経営状態からは、さらなる乗組員の削減が迫られている状態で、現状維持がぎりぎりである。このため、航海関係に関しては、操船支援システムを用いた乗組員の作業負担の軽減が有力な解の1つと考えられる。

船舶技術研究所と全国内航タンカー海運組合は、慢性的な船員不足の状況での運航の安全性確保に対応するため、内航タンカーを対象とした近代化船の開発に関する共同研究を1993年から実施した。この研究は、少人数でも安全に運航でき、なおかつ若年労働者にとって魅力ある職場とするために行われた研究で、航海関係の他、機関関係、荷役関係、居住区の近代化について検討された。

本操船支援システムの開発とその評価もこの研究の一環として、当直業務を一名で十分に余裕を持ち、操作も容易にでき、当直者の作業軽減が図れる操船支援システムの開発[20]を目的として実施された。特に、開発・評価に際しては、積み荷の危険性を考慮して、社会からはより一層の安全性の向上が求め

られる事を認識し、安全性の確保を最優先の課題として、設計段階から乗船調査による実機の運用結果に基づく評価等も含めて検討を行った。

この操船支援システムの初号機は、広島県大崎上島の佐々木造船所で建造された共和産業海運(株)所有の「新ぶろばん丸」に実船搭載され、1997年の9月1日に竣工した。また、本操船支援システムを搭載した船は、現在まで3隻就航している。

4.1.1 開発・評価の概要

操船支援システムの開発評価は、図5に示す手順で行った。

開発にあたっては、まず最初に、内航船の航行における問題点の抽出とその問題を解決するために必要な対策案の検討を同時に行うため、輻輳した狭水道の航行及び沿岸海域における長時間の一名当直の状況を船舶技術研究所のシミュレータ [21] で再現し、それぞれの状況で、操船支援システムが当直者に提供すべき情報、支援機能及び要望事項をまとめた。

問題点の抽出については、事前に調査した問題点となりそうな事象をシナリオの中に取り込み、操船シミュレータ実験を通じてその影響と対策を検討すると共に、考慮されなかった操作上の問題点の洗い出しを行った。

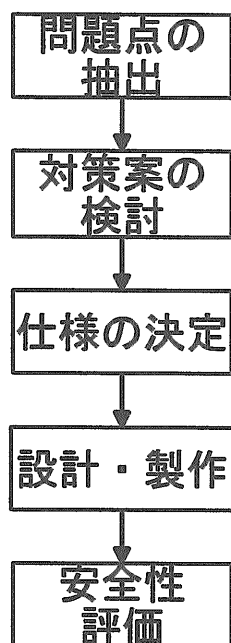


図 5: システムの開発手順

これら支援機能と要望事項に基づく仕様の検討にあたっては、必要と思われる支援機能を組み込んだ支援システムのプロトタイプを用いた一名当直の操船シミュレータ実験や現役船員のインタビューを行い、作業の流れとその際に必要な情報及び提供方法等作業分析を行い、要素機能としてのみではなく統合されたシステム機能として検討した。さらに仕様の検討に際しては、現在の技術レベルを被験者が認識した上で、役割分担を決定する事が重要であるので、作業をイメージして支援機能の仕様が十分であるかを、プロトタイプを使った操船作業を体験する事により確認した。

こうして得られた結果を基に、操船支援システムに関する要求仕様を作成した。

次に、この要求仕様に基づいて、操船支援システムの設計製作を行った。一名当直操船を前提としたシステムの設計及び製作において、当直者を含めた操船システムの安全性は重要である。特に一名当直の場合、当直者側に冗長性を持たせる事ができないので、操船支援システムと当直者が協調して、衝突の危険等の外乱及びヒューマンエラーを含むシステムエラーに対処する必要がある。また、運航の安全は社会的に許容される必要があるため、操船支援システムを設計する段階から安全目標を具体的に定め、これに従った評価を総合的に実施しながら開発を進めていく事とした。本システムの開発にあたっては、確保すべき安全の定義として、3.1項で示した以下の3件が守られる事とした [22]。

必要な機能の充足 一名での運航の安全を担保する機能が、当直体制と操船支援機器で構成されるシステムで備わっている。

システムの機能維持 一名で当直する間、システムの機能が、人間を含めて維持される。

機能低下時の対応 当直中に、人間を含むシステムの機能低下があった場合、それを検出でき、機能回復や代替手段等の方策が講じられる。

このため、まず具体的な設計に先立って、要求仕様に基づいた支援機能と定義した安全性を確保するための機能を組み込んだシステムの概念設計を行い、この後その概念設計に基づいて詳細設計及び製作を行った。

実際の機器開発は、この概念設計を基に航海機器メーカーを対象として行った設計コンペティションに

勝ち抜いた三菱重工業（株）が行った。

最後に実際に搭載された操船支援システムについて、乗船調査を実施し、その有効性と本システムを用いて実施された一名当直作業の安全性の評価を行った。

4.2 一名当直に対応した操船支援システムの要求仕様の検討

4.2.1 操船シミュレータによる検討

一名当直時の問題点を明らかにすると共に、その対策案である一名当直用操船支援システムの要求仕様を明らかにするために、一名当直作業を対象とした操船シミュレータ実験を実施した。操船シミュレータ実験は、3章で述べた安全に対する考え方を考慮して以下の順に行われた。

手順 1. 危険事象とその誘因及びその危険事象への対策としての操船支援機能を、熟練船員への事前調査やシミュレータによる体験を基に洗い出し、シナリオを作成する。

手順 2. 作成されたシナリオに基づいた操船シミュレータ実験を実施する。

手順 3. 操船シミュレータ実験とその後の被験者へのインタビューを通じて支援機能の効果を評価する。

手順 4. 当直者及び支援機器におき得る障害とその対策及び更に考慮すべき危険やその誘因を洗い出す。

手順 5. 1 から 4 までの手順を可能な限り繰り返し仕様を固める。

航海に係る危険事象としては、衝突と座礁が挙げられた。「海難審判の現況」[23]によると、衝突及び座礁事故の原因の8割が、見張り不十分であった。さらに、山崎氏による衝突事件の海難審判録の調査[24]では、見張り不十分となった理由として、当直中の雑作業 38.2%、居眠りを含む気の緩み 16.7%、他の船等に気を取られた 19.5%、死角で見えない 10.6% が挙げられていた。これらの調査結果と操船熟練者である被験者への事前のインタビューにより、事故の誘因として、居眠り、当直中の雑作業、見落とし、誤判断、機器故障の5点を選定した。これらの事故誘因への対策として、就労監視システム、

オートパイロット、電子海図、座礁及び衝突危険警報、ARPA(自動衝突予防装置)、自動ログ記録システム等が考えられ、これらの機能を可能な限り模擬した操船支援システムのプロトタイプを用いた操船シミュレータ実験を実施した。

具体的には、居眠りや集中力の低下が心配される長時間の一名当直航行実験及び頻繁な操船判断が求められる輻輳した狭水道における航行実験を行った。

4.2.2 長時間航行の操船シミュレータ実験

長時間航行の安全性を操船シミュレータを用いて検討し、長時間航行における当直体制、備えるべき支援機器の機能等、長時間航行の安全を担保するための方策について考察した [25]。

(1) 実験の概要 長時間の一名当直航行実験は、3,000 トンの内航タンカーを対象とし、長時間の一名当直に必要な支援機能や妥当な当直体制を検討するため、比較的出会う船や変針等操作の少ない状況で3時間の一名当直を行う形で実施した。

長時間航行の安全性評価は、3.3 項の考え方に基づき以下の条件を満足させるための条件について、検討を行った。

(1) 必要な機能の充足

(2) システムの機能維持

(3) 機能低下時の対応

(1) の操船システムの具備すべき機能については、航行の安全を阻害する外乱の検知 (遭遇する船や航路逸脱等の検知)、外乱の影響を避けるための判断 (避航判断等)、外乱の影響を避ける操作 (避航操作等) が、当直の間に適切な余裕を持って達成できる事で確認した。

(2) の機能維持については、機能維持に必要な支援機能を被験者の知見から抽出するため、居眠り等で問題となる刺激の少ない状況での長時間の一名当直作業を再現し、その条件を求めた。

(3) の機能低下時の対応については、実験の終了後インタビューを通じて (1) の機能をバックアップするための支援内容を抽出してまとめた。

シナリオ設定 長時間航行の操船シミュレータ実験を行うため、20km × 50km(約 11 マイル × 約 27

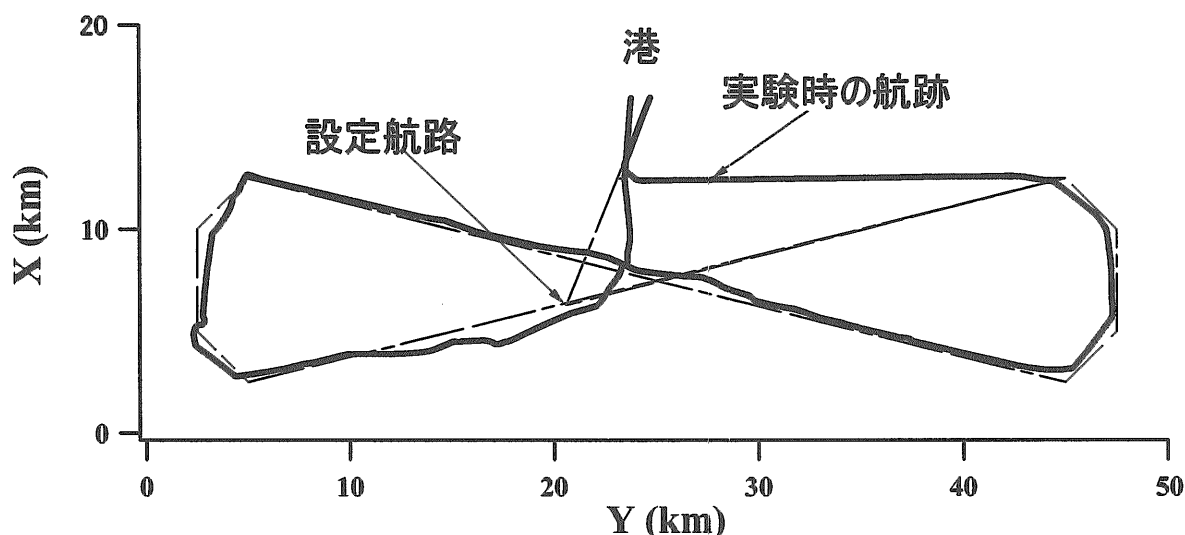


図 6: 長時間航行実験の航路設定と実験時の航跡

マイル)の海域に8の字航路を設定して実験を行った。図6に実験海域と設定された航路を示す。

実験時の支援機能としては、簡易電子海図機能、ARPA機能及び就労監視機能を模擬したものを使用し、操船モードとして、手動操船、オートパイロット及びトラックコントロールの3モードを用意し、当直者が適宜選択して用いる事とした。

また、航行の安全を阻害する外乱として、実験実施者が別室から任意に発生・操船できる貨物船を発生させて任意の見合い関係を作り、必要に応じて避航せざるを得ない状況を作った。この実験で得られた航跡を図6中の太線に示す。

実験の手順 長時間航行の操船シミュレータ実験は、次の手順で行った。

1日目に慣熟運転を行った後、2日目は昼間、3日目は夜間の状況での実験を行った。

当直は1人で3時間とし、前半の被験者は出港から次の当直引継までを、後半の被験者は当直引継から入港までを行った。

各被験者には、実験終了直後に疲労度のアンケート調査と、操船内容及び欲しい支援内容等についてのインタビューを実施した。

被験者は2人で、内航タンカーの経験が豊富な船長であった。

(2) 長時間航行の安全評価と支援策について 安全性確保のための3つの条件に対して、実験から得

られた当直体制及び支援機器についての検討結果について述べる。

(a) 航行の安全を担保する機能が当直体制と操船支援システムに備わっているか?

当直体制についての検討

作業量の検討:

通常海域を航行する際の当直作業は、直接的な操船作業の他に、海図への位置の記入等の間接的な操船作業がある。当直中にはさらに日誌の記帳のように航行と直接関係の無い雑作業がある。一名当直の際には、作業時間の不足や雑作業に気を取られたがために必要な操船作業を怠る事が問題になるので、当直中の雑作業及び間接的操船作業の一部の見直し、軽減、省略、廃止等の検討が必要である。

また、直接的な操船作業において、その占有時間の長さでは見張り作業が大きい、作業の集中度では判断作業が大きく、その両者の支援が長時間の一名当直の成否を左右するものと考えられる。さらに、一名当直の場合、当直者に期待されている見張り及び操船判断と操船操作を並行して行うのは困難であると思われる。

就労監視:

一名当直体制で考慮しなければならない事に当直者の不在や居眠りがある。いずれも就労監視システムの導入等で検出可能であるが、この検出技術の他当直者が機能していない場合に機械側がどのように対処するかをあらかじめ検討し、システムに組み入れるべきである。例えば被験者の一人の提案である

「警報無視の時には、船速を下げてゆく。」などの対処案の安全性を検討し評価する必要がある。

支援機能の検討

自動制御機能：

実験で使用したオートパイロット機能とトラックコントロール機能は十分にコース保持性能を発揮した。他船接近警報やトラックコントロールの変針点接近警報は、操船支援システムに組み込んであり、十分有効である事が確認できた。また現在普及している航海機器に備わっている自動制御系及び警報等のしきい値による判断系の機能も、当直者の航行上の危険を含むイベントの検出作業と操作作業を軽減したとの評価であった。

ヒューマン・マシン・インタフェースの検討

表示・操作系：

計器類の表示はデジタルよりもアナログの方が直感的であり、疲れないと評価された。特に CRT 上のデジタル表示は字が小さい、ちらつく、必要な情報の場所が分かり難い等の理由で歓迎されなかった。また CRT を使用する場合は、画面を一瞥して必要な情報を入手するための画面構成の工夫が必要である。

操作支援はオートパイロットとトラックコントロールで機能的にはほぼ十分と考えるが、トラックコントロールの操作方法はまだ標準的なものがないため、一名当直に適した方式を検討する必要がある。

一方、本実験で使用した支援機器でその機器とのインタラクションで時間的に間に合わない状況はなかった。なお ARPA 等判断支援機器の情報表示更新速度は早すぎない事が重要である。これは CRT 上の表示情報を基に判断作業を行うためには、ある程度の間表示が更新しない事が必要なためである。

必要機能についてのまとめ

通常海域の航行ならば、実験に使用した程度の機能によって、短時間であれば、一名当直体制で航行安全は確保できる事がわかった。さらに、以下の支援をする事により、疲労も少なく、長時間の一名当直が可能である事がわかった。

危険を含むイベントの検出作業の自動化

トラックコントロール機能

避航判断支援機能

当直員不在の対策

(b) 一当直の間に航行の安全を担保する機能が維持されるか？

人間側の機能低下

実験後のインタビューから、両被験者共 3 時間の一名当直中に、情報収集、状況認識、操船判断、操船指令の各能力が鈍くなってきたとは感じていないと申告していた。実験者側からの観察でも、疲労はあるが判断機能は落ちていないと判定できた。これに加えて、急病や居眠りで就労監視機能からの警報に反応しない時の対策が十分に講じてあるならば、長時間の当直による疲労の影響は少ないと考えられる。

機械側の機能低下

機器の故障等による機能低下は、人間に比べて少ないとは言え、完全に防ぐ事は困難である。このため、人間の場合と同様、(c) 項で述べる故障の検出とその対策の確立が重要となる。

人間機械系の機能低下

長時間の航行による意識低下や慣れや思い込みによる過誤(うっかり)、強い刺激による注意の乗っ取り、短絡的行動等のヒューマンエラーは実験においては見られなかったが、これらの誤りの発生は確率的にあると考えねばならない。これらのヒューマンエラーの検出は一般に難しい。この対策は、

- 1) 航海機器の表示、操作方法を誤り難くする。
- 2) 誤りの結果として出てくる現象を検知し、誤りを訂正する。

の二つが主となる。

機能維持についてのまとめ

機械側の機能維持については検討していないが、現状の航海機器が有している信頼性が有るならば、故障時の対策を合理的に立てる事で航行の安全は保てる。人間側の機能維持については、3 時間の一名当直における疲労の影響は従来の 2 名当直時の状況と比較して小さくなく問題ないと考えられるが、さらに支援機器または当直者不具合の時の支援体制を組んであれば、通常海域の一名当直の機能は十分維持できると評価できた。

(c) 機能低下が検出でき、機能の回復手段を講じる事ができるか？

人間側機能低下時の対応

人間側機能の低下の検出は、次の三つの場合を考えねばならない。

- 1) 作業集中による機能の低下
- 2) 当直者の不在
- 3) ヒューマンエラー

作業集中による機能低下は、通常予想される作業について支援機能でほとんどカバーできた他、十分な余裕を持たせる事が出来たので特に問題はなかった。

当直者不在は呼びかけに対する応答の有無で検出でき、その対策が講じられるならば大きな問題はない。

ヒューマンエラーの問題は一名当直だけの問題ではなく、これから検討を進めなければならない大きな問題である。基本的には、操船支援システム側に船舶、航海機器及び人間の特性を模擬する機能を持たせて、予測・診断を行いそれに基づいて検出、判断すべき性質のものであるが、こうしたシステムはまだ実現されていない。

機械側機能低下時の対応

航海機器に限れば、両被験者は経験と訓練を積み、異常は検知できると考えている。さらに、航海機器システムには、自己診断機能及び警報機能が不可欠である。また、異常が検出された場合は、従来のシステムに切り替えて複数人当直体制を取り、システムを復旧する、という手順で対策がとれる必要がある。

機能低下時の検出と対策についてのまとめ

機能維持を保証するためには機能低下時の検出と対応策の実行は不可欠で重要である。一般に新しいシステムの開発では、必要機能の実現にだけ力を注ぎ製品として世の中に出してしまいがちであるが、機能維持の検討と機能低下時の対応の考え方とその保証が安全性を考える上で重要である。

4.2.3 狭水道の操船シミュレータ実験

狭水道航行における適切な支援のあり方を明らかにするために、来島海峡を対象とした操船シミュレータ実験を行った。この実験では比較的作業負担が多い輻輳した狭水道という状況で一名当直を行い、操船支援システムとの役割分担について検討した。具体的には、想定される操船支援装置のプロトタイプを用いた操船をシミュレータ上で再現し、その結果を踏まえて支援機能に適宜改良を加える形で適切な支援装置の機能を求め、その支援装置を用いた一名当直の評価を行った [26]。

(1) 実験の目的と概要

実験のシナリオ 実験海域として、強潮流、屈曲航路、航路の交差及び横切り船等多様な外乱がある事を考慮して、来島海峡を選定した。海岸線や島影等の船橋からの景観は、海図及びビデオ撮影画像を基に、昼間及び夜間の両方について作成した。潮流や船舶交通流は、実測値及びそれに基づいた交通流シミュレーション結果から再現した。

図7に、来島海峡の様子と実験結果の一例として自船の航跡を示す。

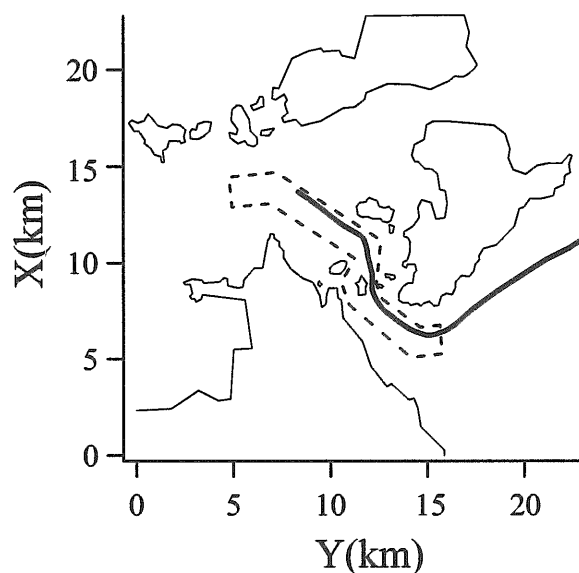


図7: 実験海域と西航時の実験例

実験の方法 実験は来島航路の通航経験がある熟練船長2人に交互に3,000GT相当のタンカーを単独で操船していただき、その経験に基づいて操船支援装置の操作性や提供情報のあり方について意見を出していただきそれを集約した。これらの意見は、適宜操船支援装置の機能として組み込むと共に、実験期間中に組み込みが難しい仕様については補助者がその機能を代行する事で等価的に再現した。こうした実験と支援装置の改良を繰り返し、最終的に狭水道航行における運航支援に必要な機能を明らかにした。以下にその主な検討過程と改良点を示す。

(a) 操作入力：支援機器への指示は当初キーボード入力であったが、これをマウスで選択する方式に改めた。しかしマウスも煩わしく、タッチスクリー

ンによるワンタッチでの操作も検討されたが、その実現には、ボタンの位置、大きさ、表示形式等にさらに配慮する必要があった。また実験の最終段階では補助者を介した音声入力が用いられ、その有用性が確認された。

(b) 情報の表示法：CRT を用いた情報表示については、基本的にはターゲット船の情報を優先する事が重要であり、必要なときに、海岸線、目標航路等の表示を重ねる仕様にする必要が指摘された。実験においては、相手船以外の表示輝度を下げると共に、変針点での目標方位等の数値情報は必要な場合のみ表示する事とした。

(c) 表示情報の内容：強潮流時においては対地船速ベクターの表示が有用であるとの指摘があり、自船の対地船速ベクターを明るく表示し、船首方位は輝度を下げて表示した。また、予定航路上の変針点で運航支援情報を提供するだけでなく、熟練者の知識や経験に基づいた注意事項を必要な地点で当直者に通報する事も経験の伝承という意味で有用であるとの指摘があり、実現すべき重要な機能として採用した。

(2) 狭水道航行における当直体制と役割分担 従来、狭水道航行での当直作業は、主に船長、操舵員、レーダ監視員の3つの役割を当直チームで分担して実現していた。船長は全ての操船判断を行う判断決定者で、操舵員は船長の指令通りに船を操縦し、レーダ監視員はレーダを操作して他船や自船位置を確認し、必要に応じて船長及び操舵員に報告する。この3名の役割は、表3のようにまとめる事ができる。

表 3: 狭水道及び輻輳海域における当直モデル

職名	作業名
船長	航海計画、気象海象把握、目視による見張り、自船位認識、航路標識等航行情報の認識、操船判断、操船指令、避航判断
操舵員	操船、目視による見張り、自船位認識、自船状態報告
レーダ監視員	レーダによる見張り、測位、他船状況把握、航海日誌記帳等雑作業

ここで操船支援システムを用いて一名で当直する場合、操船支援システムと人間で上記の役割を2.2.1

項の考え方に基づいて分担を明確にして人間の作業量を適切に設定しなければならない。この役割分担の考え方からすると、船長の作業である航海計画や状況認識、操船・避航判断と目視による見張りについては人間に任せるべきである。また他の操舵員及びレーダ監視員の仕事である情報収集、各種警報機能・判断支援機能及び操船機器操作は、操船支援システム側に移行されるべきである。この考えに沿って操船支援システムの機能設定を行った。

(3) 狭水道航行における支援装置の機能仕様 実験の結果から狭水道航行における支援装置の機能として、長時間の当直時に必要な支援の他、以下の要望があった。

(a) 操作性

狭水道においては、見張りに専念するため支援機能の操作を音声によるノータッチ、または一瞥で可能なワンタッチ操作で実現できる事が必要であった。特に多数のメニューやキーから操作に必要なボタンを選択する事は望ましくない。

(b) 情報表示

必要な情報が他の情報に埋もれないように航行の各局面毎に必要な最小限の情報を表示する。付加的な表示を要求する際にも、操作性の要件を満たす事が必要である。

(c) 支援機能

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

具体的な意見として、強潮流下でも有効なオートパイロット、ARPA のシミュレーション機能、予定航路上の各時点における適切な支援情報、例えば変針後の他船との見合い関係に関する情報の提供の必要性が述べられた。

4.2.4 操船支援システムへの要望事項

2つの実験及び実験後の被験者へのインタビューから、操船支援システムへの要望は、機能、ヒューマン・マシン・インタフェース及び安全への視点から以下のように整理できた。

1. 支援機能

- (a) 操船支援(トラックコントロール機能を含む。) 想定される潮流等の外乱に対応できるオートパイロットまたはトラックコントロール
- (b) 衝突・座礁危険警報
- (c) 避航判断支援 衝突危険船の警報と避航航路の提案、避航操船シミュレーション
- (d) 当直に直接関係ない雑作業の支援 見張り作業を妨げないための、海図上への位置の記入や航海日誌の記録等のデスクワークの省力化
- (e) 経験に基づく操船上のアドバイス 法的及び経験的アドバイスの提供

2. ヒューマン・マシン・インタフェース

- (a) 見張りを妨げないアイフリー操作 見張り業務を妨げない目視を必要としない操作
- (b) 簡単に習い易いヒューマン・マシン・インタフェース 使用方法の習熟し易さ
- (c) 迅速で信頼あるヒューマン・マシン・インタフェース 迅速で信頼性のある反応
- (d) 必要最小限の画面表示 航行の各局面毎に情報を取捨選択し、必要な情報のみを集中表示する。但し、舵角等従来から頭上に計器表示しているものは、違和感を削減する意味も含めてそのまま残す。

3. システム異常対策

- (a) 当直者の異常対策の確立 居眠りや卒倒等当直者の異常を検出して警報を発すると共に、対応策を講じる安全管理機能
- (b) 操船支援システムの異常対策の確立

4.3 操船支援システムの機能設計

4.3.1 一名当直時の人間の役割と支援機能

本システムの機能設計においては、当直時の作業量や実現できる支援機能及び人間の担うべき責任を考慮して、操船支援システムで船長以外の操舵員及びレーダ監視員の役割を主に分担する事とし、当直者に船長の役割である航海計画、状況認識、操船・避航判断等の安全に関わる最終判断作業及び目視に

よる見張りを主に任せる事とした。

以下に操船支援システムが受け持つ役割を示す。

1. 操舵士の役割として、当直者の指令に基づく針路保持、航路保持、避航操船の実施機能を持ち、当直者との意思疎通及び誤り訂正機能が加わる。
2. レーダー監視者の役割として、他船航跡のプロット、衝突危険船の検出と当直者への報知、座礁危険の報知、当直者の要請に応じた詳細情報の提供機能を持ち、さらに当直者との意思疎通機能が加わる。
3. 当直者の判断を支援するための役割として、操船局面に応じた情報表示モードの自動選択や目標航路と現状の比較表示の機能を持つ。

以上の検討から、操船支援システムの持つべき支援機能は、当直時の要素作業毎に表4のようにまとめられる。

これらの機能は、当直者が見張りに専念できるようにアイフリー操作と状況に応じた情報提供を基本とする。また一名で当直を行う事によって生じる誤判断や誤操作を防止する手段も講じる。

表 4: 操船支援システムの支援内容

作業名	支援内容
航海計画作成作業	過去の航行データベース 海図情報 水路誌、航行警報等航海情報 気象海象長期予報
自船状態把握作業	自船船位決定 自船状態情報収集表示
操船作業	計画航路表示 航海情報表示 航路逸脱・座礁警報 自動誘導、オートパイロット
他船動向把握作業	他船情報収集表示
避航操船作業	衝突危険警報 避航判断支援
自然状況把握作業	気象海象状態収集表示 気象海象予報収集提供
雑作業	海図取替えや航海日誌記帳 気象海象予報提供

4.3.2 音声入出力を主体としたヒューマン・マシン・インタフェース

操船支援システムのヒューマン・マシン・インタフェースに対する要望としては、

- (a) 見張り作業を妨げないアイフリー操作。
 - (b) 簡単で習熟し易いヒューマン・マシン・インタフェース。
 - (c) 迅速で信頼あるヒューマン・マシン・インタフェース。
 - (d) 必要最小限の画面表示。
- であった。

アイフリー操作は、操船支援システムの操作を、操作卓を見る事無しにできる事を意味する。これは、現在、遭遇する他船の適確な情報を自動的に得る事ができない事及び判断の最終確認には目視による確認が最重要である事から、見張り作業を何よりも優先されなければならないため要求された。

また、特別なトレーニングやマニュアルの精読は、内航船の乗組員の労働環境から難しく、少なくとも日常作業については、実作業を通して容易に慣れる事ができる事を求められた。

さらに、迅速性と信頼性及び最小限の画面表示は、危険に遭遇した場合に、迅速かつ間違いのない操作が求められるため必要であるとされた。

これらの要求に応えるため、操船支援システムのヒューマン・マシン・インタフェースとして、音声入出力を積極的に採用した。音声入出力を用いる事により、アイフリー操作を実現できる他、通常使っている言葉を入力に使用する事で、機器操作に関するトレーニングやマニュアルの精読を最小限に軽減できる。また、シミュレータ実験を通じてその有効性は確認されている。

そこで本システムには、音声入出力による以下の機能を組み込む事とした。

1. 操船支援システムへの操船指令
2. 操船支援システムへの情報要求
3. 操船支援システムからの情報の受取り
4. 操船支援システムへの音声で提供される情報の制御
5. 衝突等の危険に対する警報
6. 船舶の状態の定時報告
7. 海域に応じたアドバイス

図8に、音声による操船の様子を示す。コンソー

ル正面にマイクがあり、このマイクに話しかける事により、操船指令や情報の問い合わせができる。



図 8: 操船の様子

定時報告は、最長でも12分毎(船長の設定による)に行われる。これは現状の報告だけではなく、操船支援システムが正常に機能している事を当直者に知らせると共に、就労監視システムとしても機能する。

また情報の種類によっては、画像による表示の方が判り易いものがある他、迅速な操作が必要な場合には、音声入力では対応できない可能性がある。そこで、本システムでは、情報表示画面としてタッチパネルスクリーンを採用し、タッチパネルによる指令も可能とした。画面上の表示は電子海図を基本とし、メニューにより全ての機能の操作を可能にしている。また、いくつかの機能については状況に応じてポップアップメニューが現われるようにし、短時間の目視による迅速な操作(ワンルック操作)を可能とした。

この音声入出力とタッチパネルスクリーンの組み合わせにより、目視による見張りを妨げない実用的なノーラック・ノータッチ操作を負担なく、的確に実現できるヒューマン・マシン・インタフェースとして構築できた。

4.3.3 一名当直に対応した安全対策

安全対策については、4.1.1項で述べたシステムの機能維持及び機能低下時の対応の考え方にに基づき、操船支援システム側及び人間側について、起こり得る異常状況とその検知法及び対策について検討した[14]。

(1) 操船支援システム側のシステム異常への対応

(2) 構成要素の異常への対応 操船支援システムは、複数のセンサー、データ入出力装置及び各種コントローラから構成されるため、異常の発見は簡単ではない。特に異常なセンサーの情報を基に制御が行われる場合警報も無いため、運転員が知らない間に重大な事態に陥る可能性がある。また1つの機器の不具合が他の機器に影響してはならない。このため、各機器を独立に構成し、それぞれ健全性をチェックする機能を持つと共に、機器間で相互にチェックし合うようシステムを構築した。

また、システム異常時の対処としては、

- ・運転員に異常を知らせる。
- ・操船支援システムの機能を従来のシステムに切り替える。

- ・システムを回復させる。

の3つがある。

以上のニーズから、操船支援システムは、以下の機能及び構成で、設計・開発を行った。

(a) 重要機器の独立化 コントローラ等システムを構成する機器をそれぞれ独立化し、どれが故障しても他に影響を与えないように、LANを用いた分散構成とした。

(b) 機器の健全性の相互チェック システムを構成する機器間で受信した情報をチェックして、他の機器の健全性を相互チェックし、異常時には音声や画面表示で運転員に報知する機能を設けた。

(c) 運転モードの手動へのワンタッチ切り替え 操船支援システムが異常をきたした場合、ワンタッチ操作で、手動での操船に切り替えるスイッチを設けた。

(d) システム回復手順の確立 操船支援システムは、オートパイロット等従来の操船システム上に構築した。このため、従来の操船システムの回復手順は従来と同じである。また新たに加えられた操船支援システムの回復はシステムのリスタート操作のみででき、数分で現状復帰できるようシステム開発を行った。

音声入出力に対する安全対策 本システムの大きな特徴である音声入出力機能は、多くの利点を持っている反面、航行安全に影響を与える可能性のある以下の特徴も併せ持つ。このため、これらの特徴に対しても、以下の対策を講じた。

(a) 音声認識の迅速性及び信頼性の確保 操船指令時の音声認識の遅延と誤認識は、船を座礁等の事故に導く可能性がある。認識の迅速性と信頼性を向上するため、操船支援システムに対する指令に使用する言葉は、従来船員間で操船時に用いられてきた言葉と関連付けられた限られた言葉のみに限定し認識時間の短縮と認識率の向上を図った。また、指令時の語順についても固定した。例えば、コースを330度に変更する場合、「コース」、「330」と指令する。これにより、指令者のコツの習得と相俟って、実用上十分なレベルの速度と認識率で認識できるようになった。

(b) 認識チャンネルの制限への対応 人間は、音声認識のためのチャンネルは耳から入る情報のただ一つしか持っていないので、多くの情報が集中したり、情報の出力中に指令の必要性が出た時には、重要な情報の認識及び操船指令の遅延が生じる恐れがある。このため、指令者の命令及び音声出力に対して優先度を以下のように規定し、この優先度に基づいて音声処理を行う事とした。また、音声による情報提供は音節単位とし、情報の提供途中でも中断して当直者の指令を受け付けるようにした。

1. 指令者の命令の認識
2. 警報の発声
3. 一般報告の発声

これにより、いつでも音声により操船指令ができる他、重要でないと思われる情報をスキップしたり、重要な情報を聞き返したりする事ができる。

(c) 誤認識、誤指令への対応 航行の安全を確保する上で、当直者の誤指令及びシステムの誤認識への対応は重要である。この誤指令、誤認識に対応するため、システムへの指令は、以下の手順とした。

この手順では、各指令は指令内容の復唱に続いて、操船者に指令内容の確認を要求し、確認後に指令内容が実行される。この時点で指令の誤認識を確認できる。指令内容の実行後は、指令内容によって引き起こされる状態変化が報告される。例えば、変針の場合、「船首が右に向きます。」等指令に用いた言葉と違う言葉で報告を受け、当直者が誤指令に気づくチャンスが与えられる。

また、操船指令等の制御に関わる音声入力機能が含まれているため、航行の安全性を損なわないように、手順の確立の他、次の対策を施している。

- 音声による指令、制御中断については、他の音声出力中であっても優先的に処理されるよ

うにする。

- 指令、確認については、音声入力の外、タッチパネルによる画面操作で実行可能である。
- 自動操船実行中の場合でも、優先的に別置きのオーバーライドレバーによる手動操作で緊急操船を実施可能とする。

(3) 人間側の異常への対応 人間の異常は完全に避けられるものではなく、起こるものとして対策を考えなければならない。また、これらの異常は、事故の起因事象にはなるものの、必ずしも重大事故に繋がるものではなく、早い段階で発見し、適切な処置を行えば、事故は防止できる。

人間の異常に対する対策としては、

- ・ 異常が起こり難い環境整備
- ・ 異常の検出とその対策の確立
- ・ 異常による事故の進展の阻止と被害の低減とまとめる事ができる。

(a) エラーが起こり難い環境整備 異常が起こり難い環境整備については、作業負担の軽減・適正化と良好なヒューマン・マシン・インタフェースの採用が挙げられる。これら2点の対応としては上述の通り、従来からある各種航海計器を電子海図を中心に統合して自動化を進めると共に、そのインタフェースとして音声入出力を積極的に採用する事で対応した。

これにより、当直者は当直作業に専念できると共に、状況に応じて見張りをしたまま情報を受け取る事が可能となり、避航時等相手船の目視と操船支援システムからの情報収集を同時にしなければならない時の労力を低減した。

特に情報要求及び操船指令のための音声入力に対しては、指令に用いる言葉や語順を固定化して誤認識の防止に努めた他、電子海図画面についても、各当直員が重要視する情報を自由に強調して表示できるようカスタマイズ機能を設け、各人の表示レイアウトをファイルで保存できるようにした。

(b) 異常の検出とその対策の確立 人間の異常としては、昏倒や不在・居眠り等による機能不全といわゆるヒューマンエラーが挙げられる。

(b-1) 人間の機能不全の検出 人間の機能不全の状態である不在や居眠り・急病等の検出は、音声による就労監視システムを利用して実現した。

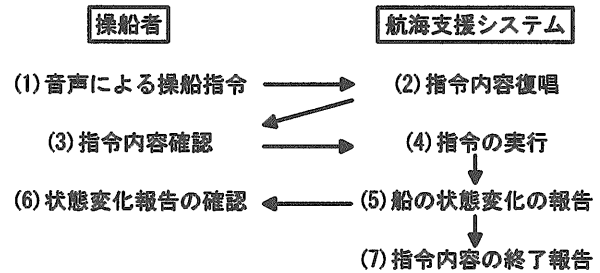


図 9: 音声による指令の手順

この就労監視システムは操船支援システムの音声入力機能を利用したもので、情報要求、操船指令及び各種報告に対する音声による受付確認等音声入力の有無で当直者の健全性を確認する。各種報告の内、定時報告については船長の判断で報告インターバルを変更でき、最低でもこの定時報告のインターバルで当直員の健全性の確認が可能となる。

従来の就労監視システムは定期的にボタンを押したり、頭の動きをモニターしたりするため、余分な負担を強いたり、動きが拘束されたりしたため、船員には受け入れられなかったが、本操船支援システムでは通常の業務を行う過程で就労監視も併せてできるため受け入れられた。

(b-2) ヒューマンエラーの対策 ヒューマンエラーの痕跡はエラーによって引き起こされた操作にしか現れないため、その検出は非常に困難である。そこで間違った操作と判定できるものに対する警報機能と誤りである事を連想させる機能を組み込む事とした。

ヒューマンエラーは、大きく分けて、コミッションエラーとオMISSIONエラーに分けられる。コミッションエラーは、間違った行為を行ったエラーで、オMISSIONエラーは、行わなければならない行為を実施しなかった場合のエラーを言う。

コミッションエラーについては、当直者が行った行為が対象となるので、指令内容についてのチェックが主なものとなる。指令についての対応としては、操船支援システムへの入力に対する図9に示す手順の内、(1) 指令内容復唱、(2) 指令内容確認受理、(3) 指令実行による船の状態変化の報告、(4) 指令内容の終了報告の段階でチェックが行われる。その内容を、表5に示す。

危険船の見落としや指令忘れ等オMISSIONエラーへの対応としては、航路監視機能による航行上の各種イベントの事前通報、操作要求及び警報と操船判

表 5: 操船指令時のヒューマンエラーの防止手順

指令入力の手順	エラー低減の効果
(1) 指令内容復唱	音声認識での誤認識の検出 この時点で、音声認識での誤認識及び自分の意図した指令であるかどうかのチェックを促す。
(2) 指令内容確認受理	指令実行時期の適正さの確認 指令内容が当直者の意図と合っている事及び指令実行時期が適正であることを確認する。この際、指令内容を不適と判断した場合は、音声またはタッチパネルからキャンセルできる。
(3) 船の状態変化の報告	指令内容を実行する事により生じる状態変化を報告する。 指令により生じる状態変化を指令とは別の言い方で報告する事により、思い込み等による間違っした指令のチェックを促す。
(4) 指令内容の終了報告	指令内容が目標に達した事を示す。 これにより、指令していた機能が動作しなくなる事を報知する。

断上のアドバイスとしての音声メモで対応した。

航路監視機能は、主に航行状況の定時報告、衝突・座礁航路離脱に関する注意報・警報、変針点到着等のイベント予告からなり、当直者の見落とし、これから起こるイベントの予告等による必要の操作のチェックを促す。

複数人での操船の場合、当直者同士が誤りや注意点をアドバイスとして伝え合う事が、エラーの防止に有効である事がわかっている。このアドバイスの機能を、操船支援システムに音声メモとして加えた(自動情報提供装置として特許出願中 申請番号A009605830)。この音声メモは、過去の経験から得られる航行上の注意点を計画航路データ上に位置情報と共に保存し、その地点通過時にアドバイスメッセージとして当直者にアナウンスするもので、注意するポイントや今後の行動予定の確認を促す。図10に東京湾から千葉港に入港する際の音声メモの例を示す。

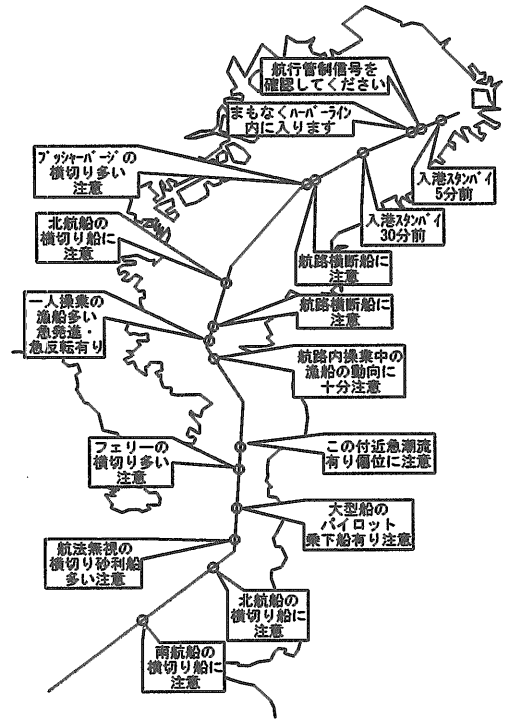


図 10: 東京湾入港時の音声メモの例

(c) 当直者異常による事故の進展の阻止と被害の低減 操船支援システムで当直員の機能不全が検知された場合は、まず船長等他の船員に警報で知らせる。これにより、他の船員が船橋に上がって事態に対処する。また、他の乗組員も反応しない場合は、警笛を鳴らしつつ船舶を自動的に減速させる。

4.4 操船支援システムの機能と構成

4.4.1 システム構成

システム全体の構成図を図 11 に示すと共に、以下に各システム構成要素の概要を紹介する。

(1) 操船支援システムコンソール 操船支援システムコンソールは、航海情報処理部とタッチスクリーンによる電子海図表示装置を含む情報表示部で構成される。図 12 に操船支援システムコンソールの写真を示す。航海情報処理システムは、I/O インタフェースを通して、必要な情報を収集・処理を行って、音声及び CRT で情報を表示し、操船指令を操舵及び推進制御器に出力して操船を実現する。

電子海図表示装置は、計画航路、トラックコントロール、変針/変速確認、航海情報表示、電子海図表示、座礁/衝突予防避航操船支援、航海記録等の主要機能全ての表示、処理、操作に用いられる。図 13 に実際の航行状況の電子海図表示画面の写真を示す。

電子海図表示装置はその入力手段としてタッチパネルとトラックボールを併用しており、数値・文字入力はメニューボタンの押下で実施可能としてキーボードレス化を図り、コンピュータに慣れていない人でも扱い易いシステムとなっている。

(2) 航海情報入出力インタフェース 操船支援システムとセンサやオートパイロット等アクチュエータを接続する装置で、いろいろなプロトコルで提供されるセンサデータを船内 LAN 経由で操船支援システムに送信すると共に、操船指令をアクチュエータに送信する。

(3) 音声入出力装置 音声入出力装置は、当直者の発声した音声を命令として認識しシステムコンソールに送ると共に、人工音声で当直者に情報を提供する [27]。表 6 に音声入出力装置の仕様を示す。

(4) 気象・海象データ通信装置 気象・海象データ通信装置は、船舶電話を通して陸上の気象海象情報提供機関 (ハレックス (株)) から最新の気象・海象データを受信するための装置である。この装置から任意の海域の波/風データ (現況/予報)、天気図、台風接近情報等の FAX データや風浪等の電子化された予測データが受信可能である。

表 6: 音声入出力部仕様

音声認識部	
認識方式	音声パターン逐次比較
話者形式	不特定話者
認識対象	単語列 (半音節認識)
認識語数	最大 10 万語、5 行 (連続数字: 桁読み)
認識速度	約 0.3 秒
発生形式	離散単語発声、連続数字発声
耐騒音性	最大 85dB (暗騒音除去差分方式)
音声合成部	
出力方式	波形編集方式
出力仕様	男声及び女声 (切り換えは不可)
数字出力	桁読み、棒読み

(5) 航海情報モニタ 任意の二港間の距離表、特定海域の潮汐推定データ、信号表、目標変針点/最終目的地の ETA (到着予想時刻) 等の航海に役立つ情報を表示するためのタッチパネルモニタである。

(6) 船長居室モニタ 船長居室モニタには船橋の電子海図表示装置に表示される主要な情報 (電子海図、自船位置、他船位置、航路データ、航海情報、航跡等) が全て表示されるため、船長は居室で航海状況の監視ができる。また船橋でオートトラッキング機能を働かせながら、船長居室において計画航路の修正/編集を行う事ができる。但し、安全面を考慮し、船長居室で航路保持、船速計画、避航操船等の操船制御に関わる機能は実施できない。

(7) 船内機器 重要な船内機器は、操船支援システムとは独立に操作/動作が可能で、万一操船支援システムが異常となっても個別に機器を操作する事により、緊急時の危険回避のための操船や、当面の船舶運航には支障のないように構成/配置した。

4.4.2 システムの機能

本操船支援システム機能は、NK/BRS1A (日本海事協会: ワンマン操船対応の船橋設備規則) に適合するように設計されている。以下に、本操船支援システムの特徴的な機能を示す。

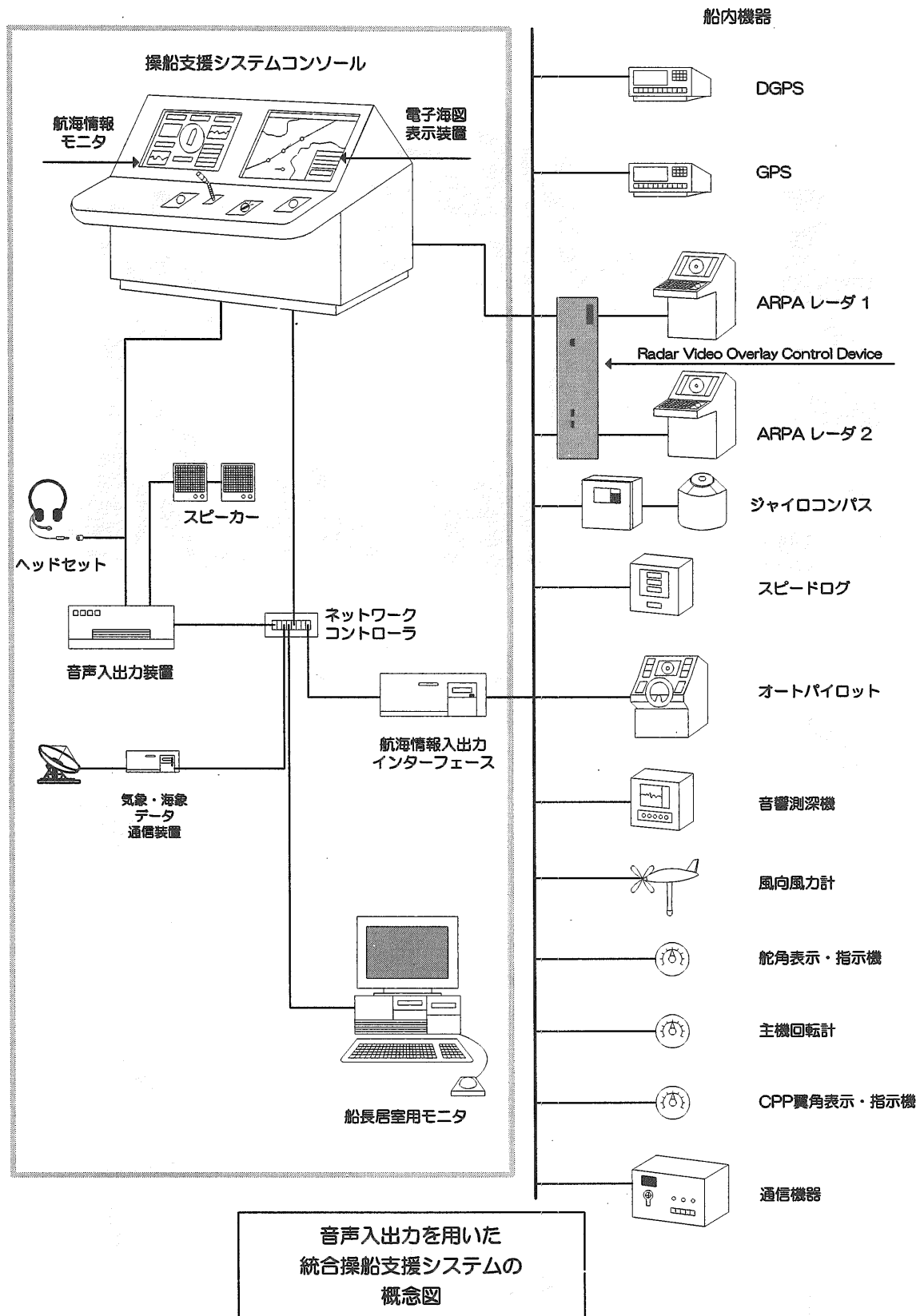


図 11: 操船支援システムの構成

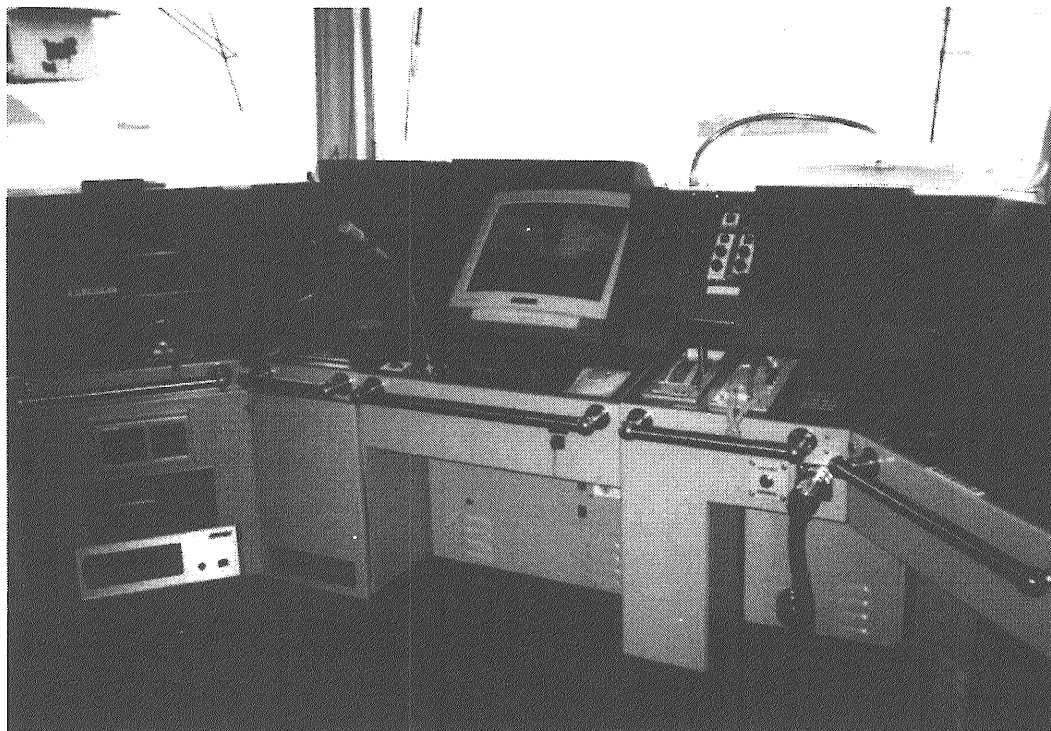


図 12: 操船支援システムコンソールの写真

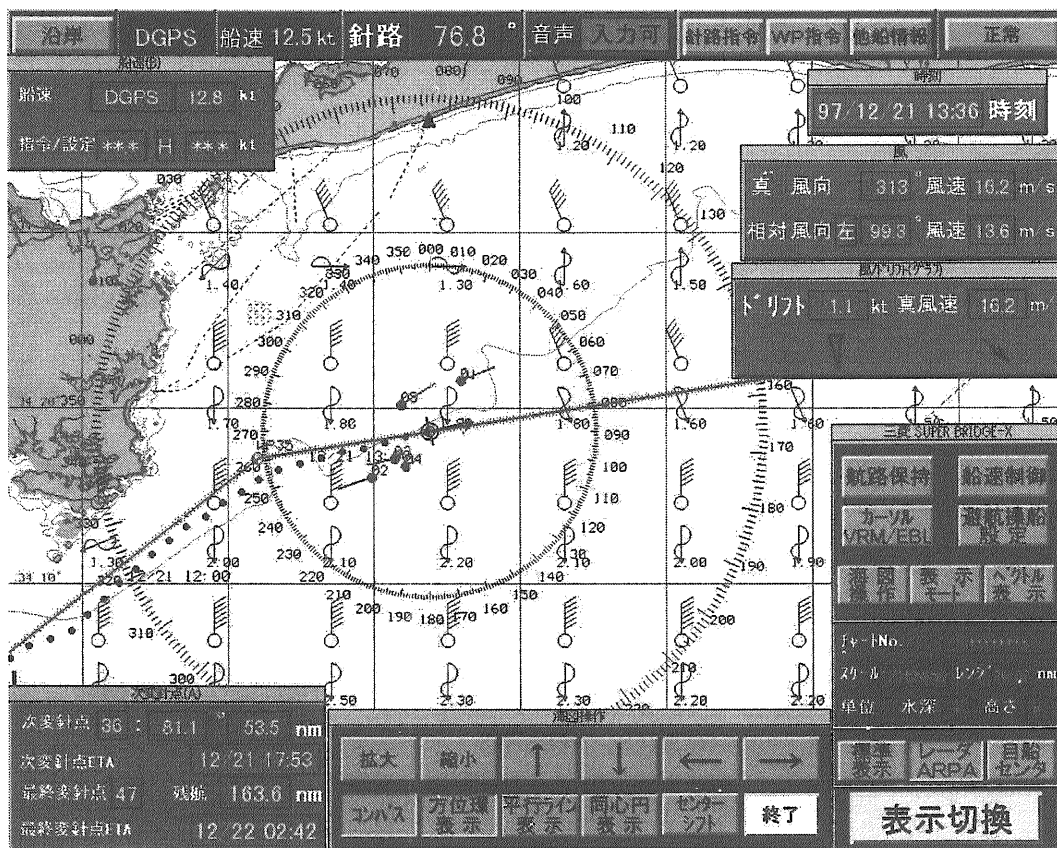


図 13: 電子海図表示画面

(1) **航海計画作成** 計画航路は複数の変針点から構成されたデータ群で、このデータには各変針点の座標の他、次の変針点までの航行モードや指定航路幅、ETA等の情報が含まれる。航行モードは港内、狭水道、沿岸、湾内の4つのモードが有り、このモード毎にデフォルトの危険判断のパラメータが設定できる。

計画航路の座標編集機能として、電子海図上のポイントをタッチまたはトラックボールでのクリックにより変針点を指定できるヒューマン・マシン・インタフェースを導入し、計画航路の作成及び修正を容易にした。さらに、航行モード等変針点間のデータを編集するため、変針点リストの表示機能を設け、リスト上でもデータを修正できる(航路設定機能)。

一度作成した計画航路データは、複製、他の航路との結合、反転等の編集が可能で、フロッピーディスクに保存して再利用する事ができ、航路計画作成の大幅な省力化を図っている。

さらに、航路分析機能により計画航路に対する所要時間の試算や座礁危険のチェックが可能で、計画船速に基づくETA推定及び到着予定時刻を指定する事による船速推定機能も持つ(船速計画機能)。

(2) **気象海象データサービス** 船舶電話経由で陸上の気象海象データサービスから最新の気象海象データを取得できる。情報は従来からの天気図等のFAX情報の他、波/風に関しては現在の状況及び短期予測データをデジタル値で入手し海図上に表示でき、航路分析における船速推定計算にも利用される(気象海象データ表示機能)。

(3) **自船状況認識支援** 自船状況把握に必要な各種情報は、自船位置決定表示機能及び自船状態報告表示機能により提供される。

自船位置決定表示機能では、船位情報を複数のセンサ(DGPS, GPS, ロラン)から得て、利用できる最も精度の良いものを選択し、電子海図上に自船位として表示する。この他、電子海図上には、現針路、計画航路、気象・海象情報が表示される(計画航路表示機能)。これらの表示は、カスタマイズ可能で、各航行モード毎に各人でレイアウトを作成・保存できる。

また、自船状態報告表示機能では、舵角やエンジン回転数等自船状態量を、電子海図上及び従来通りの頭上の計器に表示する。電子海図上への表示は、

電子海図を見易くしたり、自社の他の船の当直作業との親和性を考慮して、各人でレイアウトをカスタマイズできる。

さらに、従来船員同士で交換していた情報については、音声により要求・受信できる。音声により提供される情報及び要求できる情報は以下の通りである。

表 7: 音声による情報提供項目

音声によって提供される情報	航行状況の定時報告、衝突注意報・警報、座礁警報、航路離脱、航路復帰、変針点到着予告・到着・通過、避航計画開始、操船モード、測位装置異常・復旧
音声による問い合わせができる情報	航行状況(針路、船速、ドリフト、次変針点、操船モード)、交通状況(他船、衝突危険船、座礁危険)

(4) **操船支援** 本操船支援システムは、操舵モードとしてINSモード、オートパイロットモード及び手動モードを持っている。INSモードでは操船支援システムのコントロールにより操船指令が決められ、オートパイロットを経由して実行される。さらにINSモードにはトラックコントロール機能と音声による操船機能が設けられている。

トラックコントロールには、目標針路からのずれと横方向の偏位に対するフィードバック制御と、風や潮流の影響を計測しその影響を補償する制御機能を持っており、操船の目的により使い分けられる。このトラックコントロール機能により操船作業は省力化が図られ、当直者の操船作業の負担は軽減された。

変針点到着時には事前に音声により予告する他、次に採るべきコースを当直者に提示し、確認を得てから変針動作を実施する(航海情報報告表示機能)。コースは音声及びモニタ画面上に表示され、その確認は、音声または画面上のポップアップボタンのクリックで行われる。指令操作の実行は、当直者による確認後、設定針路がオートパイロットに送信され自動操舵が実行される。

避航操船等により計画航路から離れる場合には音声による操船(音声による操船機能)も可能で、船長が操舵員に指令するのと同じ感覚で操船指令ができ

る。音声による操船は、先にも示した音声による指令手順に従って当直者からの操船指令を受け内容の確認後、オートパイロットを介して操舵が実行される。音声によるコース指令としては、絶対コース(0～359度)、相対コース(右89度～左89度)、現針路保持(「ステディ」)、航路シフト、航路復帰の指令が可能である。航路シフトは、計画航路から任意の指定距離分平行移動させて航行させる機能で(航路シフト機能)、輻輳海域における避航操船によく用いられた。

また電子海図上で自船を向きたいポイントを画面上でタッチする事でその方向へ自船を変針させる機能もあり、目標物へ向かう変針に利用できる。

本システムにより操船制御を実施している間も、当直者がオーバーライドレバーを使用すれば、緊急操舵が可能である他、操舵モード切り換えスイッチにより容易にオートパイロットまたは手動操船(手動操船機能)に切り換えられる。

一方、船速も計画時の設定船速が当直者に提示されるので、針路と同様、当直者の確認後、主機遠隔制御装置を通じて設定される。また、音声でも船速指令が可能で、針路指令と同様に音声による指令手順に従って、船速の変更が可能である。

(5) 衝突／座礁危険予防・避航操船 衝突の危険検知については、ARPAのターゲットデータ、座礁の場合は電子海図の水深データを基にその危険を計算し設定値を超えた場合、音声及び画面上のポップアップメニューによって警報を発する(衝突危険警報機能、航路逸脱・座礁検出警報機能)。当直者は、画面上でもこれら危険関連の情報を参照できる他、音声により危険の内容を問い合わせる事ができる。

避航操船支援としては、避航方法提案実行機能を有する。この機能は、まず当直者に衝突・座礁を回避する避航航路を提案・表示する。この避航航路は海上衝突予防法等の法規及び船長の避航に関するノウハウを使って、操船支援システムが自動的に探索し作成する。

作成された避航航路はCRT画面に表示され、当直者の指示を待つ。当直者がそれを採用すると、その避航航路を追従するようにトラックコントロール機能が設定され、当直者は変針時に確認を行うだけで避航操船が可能となる。避航航路航行中も衝突・座礁危険は常時監視しており、新たな危険が発生すると避航航路を破棄して新しい避航航路の作成を始

める。

システム管理者である船長は避航航路探索に関わるパラメータを設定できるようになっており、航行モードに応じて避航のタイミングや避航パターンの調整が可能である。避航航路の作成が困難な場合には、当直者にその旨を伝え指示を待つ。

(6) 就労監視 一名当直において、航海当直員が何らかの原因で業務ができなくなった場合、他の乗組員がいち早くそれを知り、バックアップできるようにする必要がある。

当直員の就労状況のチェックは、本人に負担がかからないように通常業務の中で自然に行えるように考慮した。具体的には、システムからの音声による定時報告や重要警報に対し、当直員は音声等で確認を返すよう求められている。この確認が無い場合には、システムは確認を促すメッセージを3回繰り返し、それでも確認が無い場合には、船橋内で警報を発生させる。更に一定時間経過しても何のアクションも取られない場合には、居住区に船内指令装置を介して音声延長警報が発せられ、最後には汽笛吹鳴の後に自動減速を行う。

(7) 航海記録 操船支援システムは、航海日誌の代わりに主要な航海データを定期的に自動保存する事ができ、それらのデータは航海記録として保存される。

記録される項目は日時、船位、針路、船速、真風向/真風速、CPP翼角、主機回転数、主機負荷、ドリフト、大気温度、航程、変針点通過で、保存周期は10分、20分、30分、60分、120分、180分、240分から選択できる。

航海データの記録はEXCEL形式で行い、他のパソコン等で容易に参照可能としている。

(8) システム自己診断 システムを構成する装置及び機器の状態は常時監視されており、異常が検出されたら電子海図表示装置及び船長居室モニタ上での表示または音声により警報を発生させる。また、接続されている外部装置及び機器の接続状況を監視し、接続異常時には電子海図表示装置及び船長居室モニタ上に警報表示を行う。

4.5 操船支援システムの評価

一名当直用として開発された操船支援システムについて、当直業務を十分に余裕を持って行えるかどうかの評価と、さらなる改善及びそのための研究目標を明らかにする事を目的として、その安全性及び有用性について評価を行った。

操船支援システムを使用する第一の目的は当直者である人間がそのシステムと協調して安全な航海を実現する事であるので、人間と支援システムで構成される操船システムの安全性が評価されなければならない。この安全性は当直者から操船支援システムが有用で信頼できると評価され実際に使われると共に、システムの機能不全時への対策が立てられ、その対策が確実に機能している事で確保される。

このため操船支援システムには、操船支援機能の有用性、それを用いた要素操船作業の信頼感及び良好なユーザビリティが確保される必要がある。

支援機能の有用性については、熟練乗組員の使用経験に基づいて有用性及び信用度を主観的に求める事とした。また支援機能を用いた作業の信頼性については、人間は元来間違いを犯すものと考え、人間及びシステムそれぞれが間違いを犯したり機能不全になった場合にシステムとして対応できているかどうかでその安全性評価を行った。ユーザビリティについては、各要素作業毎に作業内容と支援機能との関わりを分析し、従来の作業量との比較及びヒューマン・マシン・インタフェースの有用性を作業時の余裕を含めて主観的に評価した。

具体的には、まず操船シミュレータ実験及び乗船調査の結果から在来船舶の航海における主要な作業内容を要素作業に分類し、各要素作業における作業内容を支援システムとのインタラクションを中心に分析した後、各要素作業について主観的評価を行った。

これと併せて、操船支援システムを使用した当直時の精神的負担と音声による支援の有効性の主観的評価を、就航時から継続的に計測し、習熟に必要な時間についての検討を行った。最後に近代化船の操船支援システムによる役割の分担状況を確認した。

4.5.1 要素作業の評価

(1) 評価の概要 主要要素作業に対する評価に際しては、乗船調査を通じて航海における要素作業について支援機能の使われ方及びその作業に対するシ

ステムの有用性の主観的評価を行った。乗船調査は就航後3ヶ月が経過した1997年12月から翌年2月にかけて3回実施された。被験者は内航船3,000GTタンカー、999GT LPG船(現在、売船済)に交互に乗船していた6名の船員とした。操船支援システムの有用性の主観的評価は、各要素作業に対して、情報収集、判断及び操作作業についての作業負担、全体の作業量、支援の有用性、操船支援システムに対する信頼感について行った。この評価に際しては従来の当直状況を基準に、下記の5段階の評価で、主観的評価を行った。評価を実施する際は、在来船での2名当直の状況と本操船支援システムを用いた1名当直作業を比較する形で評価を得た。従って、例えば作業負担の評価の場合、3以上の評価を得た時従来2名で行っていた作業よりも負担が少なかった事を示している。

主観的評価の尺度

- 5:十分に良好であり、改良の必要を感じない。
- 4:従来より、良好である。
- 3:従来と変わらず。
- 2:従来より、負担。
- 1:従来より負担が大きく使えない。

評価対象作業は、表4の内容に基づいて自船状態把握作業、操船作業、他船動向把握作業、避航操船作業、自然状況把握作業、航海計画作成作業と狭水道及び輻輳海域における航海当直作業について評価を行った。また、ヒューマン・マシン・インタフェース全般及びシステム異常時対処についても、同様に5段階評価及びコメントの形で評価を得た。実際の評価は乗船調査の際に被験者に集まっただき、その総意としての主観的評価値と自由意見の形で得た。

以下、要素作業に対応した作業内容と支援機能の使用状況を示した後、各作業についての評価結果を考察として述べる。

(2) 自船状態把握作業

作業内容と支援機能及びその有用性の主観的評価結果 自船状態の把握作業は、コースや船速、舵角といった自船の状態量の把握と船位の把握が主な作業となる。在来船では自船の状態は操舵手が主として把握しており、当直者は見張りや航海全体の行動判断を行いながら必要に応じて直接計器を見るか、操舵手に質問して自船情報を得ていた。船位については海図やレーダを用いて確認する作業が必要であっ

た。一名当直で自船状態を把握しようとする場合、見張りと自船情報の収集及び操舵手が行っていた操船作業を並行して行う必要がある。

これに対応するため自船状態把握作業についての支援機能としては、自船状態報告表示機能及び自船位置決定表示機能を設けた。

自船状態報告表示機能では自船の状態量を従来の計器表示の他、電子海図の表示を主とした主表示画面（以下、主画面と呼ぶ。）に表示し当直者はいつでも容易に確認できる。また見張り等の作業に集中して主画面を見たくない場合にも、音声による質問と定時報告により、必要な時に見張りを中断する事なく情報を得る事ができる。

船位についても、DGPS 測位システムを利用した自船位置決定表示機能により、正確な位置を電子海図上に常に表示する。これにより位置決定作業が自動化され、自船位置の情報を得る作業はレーダまたは主画面の一瞥のみで可能となった。

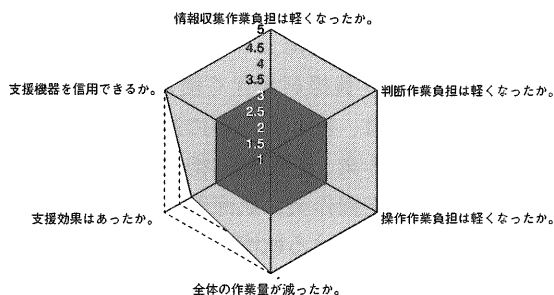


図 14: 自船状態把握作業の主観的評価

図 14 に自船状態把握作業に対する評価結果を示す。この図では、5段階評価の1である図の中心から外に行くに従って評価が良い事を示しており、一番外側が5段階評価の5を示す。また図中の濃いハッチ部分は在来船の評価値である3を示しており、薄いハッチ部分は本システムの評価値を表わしている。以下、他の要素作業の主観的評価についても同様のグラフを用いる。

図 14 から、作業負担の軽減、支援の有用性及び支援機器の信用度の全ての項目について良好な評価が得られている事が分かる。

考察 従来の自船状態把握作業と比較して、特に海図を利用した位置の決定作業が事実上なくなったの

は作業負担低減に大きく貢献しており、その面で良い評価を得ている。また船位決定に際して DGPS に全幅の信頼がおかれており、DGPS サービスが全国に展開されている現状では船位決定に関して問題はなかった。但し、船長の言によると、DGPS での船位決定において一時的に数百 m のずれがあった事も経験しており、DGPS の信号自体に問題があるような場合の対応が今後求められる他、DGPS に大きな誤差が含まれる可能性がある事を当直者に周知徹底し、見張りによるチェックの徹底と対処方法を明確にしておく必要がある。

(3) 操船作業

作業内容と支援機能及びその有用性の主観的評価結果： 操船作業は計画した航路通りに船を安全に導く事であり、当直者による操船判断と操舵手による操舵及び船速のコントロールにより行われてきた。当直者は航路標識や周囲の状況から計画航路に対するずれを検出し、次の行動を判断してきた。操舵手は当直者の判断による操船指示に従い、操船を行ってきた。

本システムでは、当直者への操船判断作業の支援と操舵手の作業を代行する事により、当直者への作業の集中を軽減した。操船判断については、計画航路表示機能、航路逸脱座礁検出警報機能及び航海情報報告表示機能の3つの支援機能、操船支援については、音声による操船機能、トラックコントロール機能及び手動操船機能を備えている。

計画航路表示機能は自船位と計画航路を主画面上に表示する機能で、自船の計画航路に対するずれや次の変針点及び航路情報の提供により大局的な操船判断を支援する。

航路逸脱座礁検出警報機能は、計画航路に設定されている航路幅の外に出た場合及び電子海図上で座礁の危険がある領域に接近した場合、音声及び主画面上に警報を出し、当直者に報知する機能である。

航海情報報告表示機能には大きく分けて2つの機能がある。1つは各変針点における通過予定時刻(ETA)や潮汐データ等が表示される補助モニター、もう1つは航路上の特定の場所での注意事項や航行情報を提供する音声メモ機能である。

本システムでは、操船の大部分はINSモード内のトラックコントロール機能により計画航路に沿って自動的に行われる。INSモードとは本システムの操

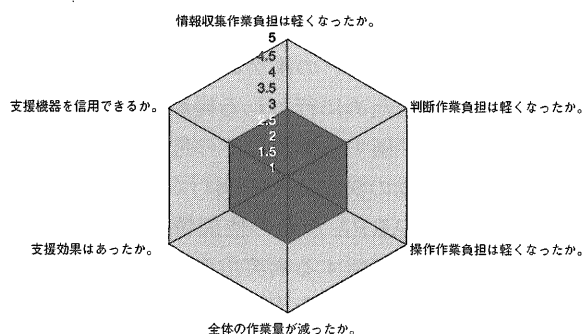


図 15: 操船作業の主観的評価

船支援機能を使用する操舵モードで、このモードではトラックコントロール機能と音声による操船機能が使用できる。トラックコントロール機能では風や潮流等の外乱によるコースからのずれを認識し、その量を補正する事ができるため、外乱の影響を低減し計画航路に沿って船を航行させる事ができる。船速についても、音声により設定する事ができる他、目的地に対して設定された ETA に従って必要船速を計算し、船速を自動的に調整する事ができる。

また当直者の判断で追い越しや計画航路のショートカット等を行う場合には、音声による操船機能及びワンタッチで切り替えられる手動操船の機能が利用可能である。音声による操船ではコースや相対針路を直接指示できる他、計画航路から一定の距離を離して航行させるシフト操船や計画航路から離れている場合の復帰操船等、マクロな操船命令にも対応している。

手動操船はシステムがダウンしたり、緊急な回避行動が必要な場合に使用される。手動操船は操船支援システムから完全に独立した操舵系で、ワンタッチで切り替える事ができる。この場合、操船はオートパイロットまたは操舵ダイヤルによる操舵とエンジンテレグラフの操作で行う事となる。

図 15 に操船作業に対する評価結果を示す。負担の軽減、支援効果及び信用性等全ての項目で最高の評価が得られている。乗船調査においても、操舵手の行っていた作業は全て操船支援システムに移行されており、明石海峡等の狭水道においても本システムを使用して信頼感を持って一名当直が実現されていた。

考察： 操船シミュレータ実験や現役船長に対するインタビューから得られた操船作業に対して求められる支援は、当直者に対する航行局面に応じた適切な情報提供と操舵手の役割である外乱下での針路及び航路の保持であった。一名当直の場合に必要な操船関係の情報支援としては、計画航路に対するずれと航行上の遵守事項や注意事項があった。これらの情報については計画航路表示及び航海情報報告表示機能により電子海図上に表示して提供している他、見逃した場合にも音声警報により報知される。また航行上の注意事項は計画航路作成時に航路上のポイントに音声メモとして登録されており、そのポイント通過時に音声で通知される。これにより一名当直時に陥るかもしれない航路逸脱や遵守事項の忘れ等の当直者のヒューマンエラーの防止に役立った。

操船自体の支援に対しては、外乱に影響されない計画航路に沿った自動航行の実現と、自動航行から手動操船及びその逆への簡単な操作での切り替えが求められた。INS モードではトラックコントロールにより風や潮流等の外乱に対応したドリフト補正による自動航行ができる他、必要に応じて音声により自由な変針及び自動航行への復帰が可能であった。またシステム自体の異常を検知した場合にも、オーバーライドレバーやモード切り替えダイヤルによるワンタッチ操作で操船支援システムとの接続を断ち直接操舵できるようになっており、当直者に安心感を与える事ができ、高い使用率に繋がった。

以上の結果より、操船作業に対する支援については支援効果が十分あり、一名で従来以上の余裕を持って当直作業が実行できたと結論づける事ができる。

(4) 他船動向把握作業

作業内容と支援機能及びその有用性の主観的評価結果： 他船動向の把握作業は他船情報の収集と認識からなる。基本的には他船の発見と認識は目視によるが、本システムではその支援として 2 台のレーダ/ARPA が装備されている。レーダ/ARPA には性能基準があるためその基本機能は従来のままであるが、補助機能として残像表示機能を有している。また実際の操船においては 2 台のレーダ/ARPA を遠近 2 種のレンジに使い分けて有効に使用して、他船情報の収集に役立てていた。ARPA のターゲットデータは操船支援システムに送られ主画面上に表示される。これらのデータは音声による警報または問

いかけに対する応答の形で随時当直者に提供される。

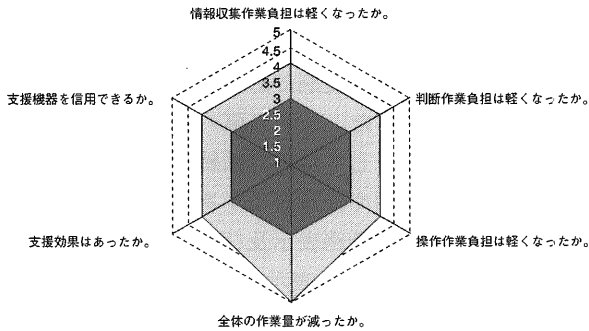


図 16: 他船動向把握作業の主観的評価

他船動向の把握作業に対する主観的評価結果を図 16 に示す。一名当直を仮定した全体の作業量については良好な評価を得ているが作業負担、支援効果及び機器に対する信用度については、従来よりも良いがまだ十分とは評価されていない。

考察： 一名当直の場合、外の見張りとレーダ画面からの他船捕捉作業は並行してできない。従って、他船情報の収集と表示が自動的に為される事及び主画面等の情報端末を短時間見ただけに必要な情報取得や操作ができる工夫が望まれる。実際、輻輳度の少ない広い海域では 2 種類のガードリングによる ARPA の自動捕捉機能により効果的に他船を捉える事ができた。しかし支援が最も必要な狭水道や輻輳海域においては捕捉可能な数の制限と通過船の削除等の処理が自動的に為されないため、頻繁にターゲットフルとなって必要な情報が得られなくなる他、陸に近い沿岸域や内海では陸地を船と認識してしまうなど、捕捉されたデータの信頼性の低さと警報の多発や操作の多さから実用的ではなかった。さらに ARPA からのターゲットデータは対象船の変針の検出に数分程度の遅れがあり、ターゲットと比較的近い位置での避航操船判断には使えなかった。ARPA から得られるターゲットデータは次に述べる衝突危険船の判断及び避航航路計画の基礎情報となるため、今後他船データ収集に関する技術の向上が望まれる。

また実際の航行ではレーダに付属する残像表示機能が移動物標の探知に有効で、輻輳海域及び沿岸域においても他船の探知に多用されていた。

(5) 避航操船作業

作業内容と支援機能及びその有用性の主観的評価結果： 避航操船は他船との衝突の危険があった場合その危険を避けるために行われる操船行動で、衝突の危険を検出・評価する事及びその危険を未然に防ぐための回避行動の決定とその実行が求められる。

本システムは ARPA からの他船情報に基づき衝突の危険を判定し警報する衝突危険警報機能及び避航行動を提案しその実行を支援する避航方法提案実行機能がある。

衝突危険警報機能は ARPA からのターゲット情報を基に衝突の危険を計算し、ユーザにより設定されるパラメータに基づき音声及びポップアップメニューで警報を発する。避航方法提案実行機能は警報された衝突危険船及び自船周りの他船を考慮した避航行動を避航航路として提案し、トラックコントロール機能による避航航路への自動誘導を行う。またこの際当直者の判断で作成された避航航路にとらわれず音声等を用いて操船できる。

図 17 に避航操船作業についての主観的評価結果を示す。本評価は、他船情報が ARPA から自動的に確に入っている事を仮定して評価を行った。一連の作業負担については、十分余裕を持って作業できたとの評価を得ており、支援効果については、従来よりは向上しているが、信用性及び支援効果においてまだ発展する余地が有るとの評価であった。

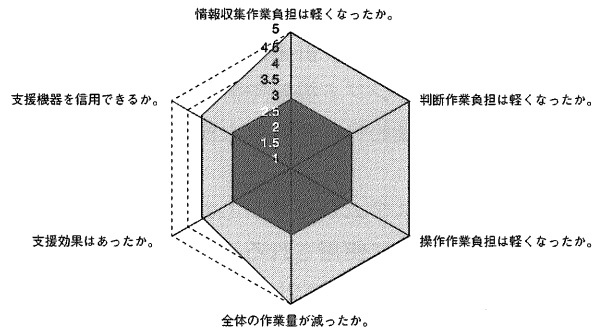


図 17: 避航操船作業の主観的評価

考察： 衝突危険警報機能については、ARPA で捕捉された船について必要に応じて警報が音声で発せられるため、輻輳していない海域で自動的に捕捉できるような状況では注意喚起となり大変有効な支援であった。

避航方法提案実行機能についても、ARPA から適切に情報が送られてきた場合には当直者に受け入れ

られる適切な避航方法と操船支援が行われた。狭水道における複数隻との遭遇等システムが避航方法を提案できない場合には、提案できない事を当直者に十分な余裕を持って報告している事も確認できた。但し、避航中の相手船の微妙な行動変化の検出は依然として当直者の目視に依存している事、当直者の感覚にあった避航方法を得るためには輻輳度や水路の状況に即した避航関係の設定パラメータのチューニングが必要である事の2点で減点があったものと思われる。しかし、本システムの考え方である、目視を中心にした一名当直における避航支援は十分有用であったと評価できる。

(6) 自然状況把握作業

作業内容と支援機能及びその有用性の主観的評価結果： 自然状況の把握作業は気象・海象の現状の把握と今後の予測とからなる。

従来、気象・海象の把握と気象予測は気象通報や気象FAX、自船回りの状況から、船長または当直者の経験に基づく判断により行われてきた。この現状把握と予測の作業は情報収集、天気図作成及び経験に基づく高度な判断が必要な事から、労力の掛る作業の1つであった。

このため、自然状況把握作業の支援機能として、気象・海象データ表示機能を設けた。これにより、風向風速、潮流速、大気温度が従来通りの計器により船橋内に表示される他、主画面にも表示される。また予報データとしては最新の天気図、一週間先までの予想天気図及び航行が予定される海域の風速、風向、波高及び波向の予測データが簡単な操作で民間気象情報提供会社よりFAXまたはデジタルデータとして必要に応じて随時得られる。これにより、精度の高い予測データを少ない作業負担で得られるようになった。

図18に自然状況把握作業についての評価結果を示す。判断作業の負担と支援効果は判断自体が当直者に負うところが多いため多少減点されているが、一名当直に十分対応している事がわかる。

考察： 気象・海象の把握と予測は航海当直中の重要な作業の一つであったが、情報の収集及び天気図作成等情報加工作業を自動化できたため大きな作業負担低減となった。また船長は当直以外の時間においても、船長室のモニタで気象及び航海関係の情報

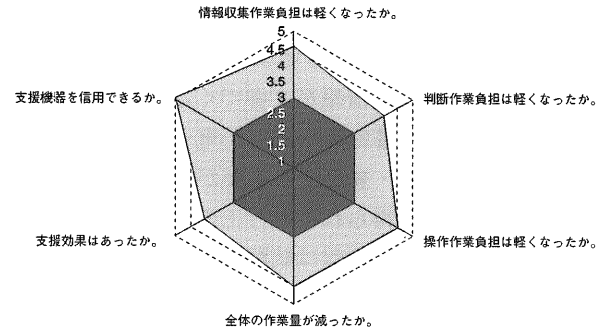


図 18: 自然状況把握作業の主観的評価

が確認でき、船長の監督作業の負担も低減させる事ができた。

(7) 航海計画作成作業

作業内容と支援機能及びその有用性の主観的評価結果 航海計画の作成作業は船長の職務であり、その作成及び変更は船長によってなされる。この作業は当直時に行われるものではないため、一名当直時の評価には直接関係ないが、安全な航行のための事前準備として重要な作業である。

計画航路の作成においてはその構成要素である変針点情報の他、港湾や航路に固有の航海関係情報、荷揚げ先等の代理店情報及び潮流情報を含む気象・海象予測情報が必要となる。

変針点の編集は航路設定機能で支援している。計画航路を新規に作成する場合、電子海図上でのマウス操作または緯度経度の数値入力により順次変針点を設定できる。ここで作成された変針点情報はシステムに登録できる他、ファイルとして保存できる。ここで保存したファイルは将来の航海に再利用できる他、編集が可能であり、継ぎ足したり変更を加える事で既存のファイルから新しい航路データを作成できる。内航の場合、船会社によって目的港が限定されるので、船会社毎に主要な目的港間の航路データをデータベース化しておけば、多少の変更のみで全ての航路をカバーできるようになる。

さらに本システムは船速計画機能を有しており、船速を設定する事により各変針点の通過予定時刻を設定できるため、荷揚げ時刻に合わせた航海計画の設定や狭水道における潮流影響の予測が容易にできる。

港湾や航路に関する情報は主に水路誌や海図、NAV-

TEX等の放送から得られる。荷受け代理店の情報はFAXや船舶電話により提供される。さらに海図情報は定期的に改補情報が文書でくる。これらの情報の内、現在航行警報等一部しか電子化されておらず、手作業で収集・登録する必要がある。また今までの航海経験から得られた航行上の注意事項も重要な情報で、これらの情報は航路上の音声メモとして計画航路データに登録する事ができる。気象予測情報に関する支援としては、(6)項で示した気象予測データ表示機能の他、指定した地点の潮流データの時間変化をグラフで表示する潮汐データ表示機能を備えている。

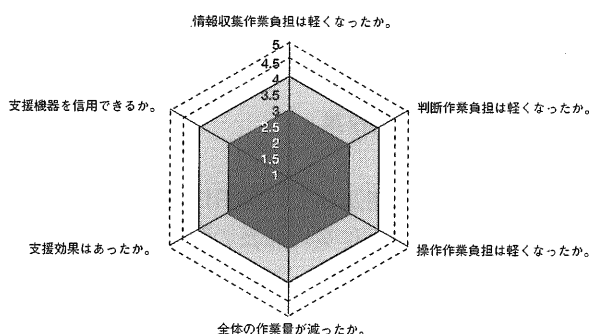


図 19: 航海計画作成作業の主観的評価

図 19 に航海計画作成作業についての評価結果を示す。他の作業の評価に比べて作業負担や支援効果の評価が低いものの、在来船よりも良いと言う評価を得ている。これは計画航路データの作成とシステムへの入力という作業が従来の作業に付加される作業であり、港湾や代理店の情報収集やシステムへの入力の支援が少ないためと考えられる。

考察： 航海計画の作成支援では、データの作成支援と必要情報の収集表示支援が必要である。

データ作成については、GUI(Graphical User Interface)とマウスによる容易な入力、ファイルによるデータ管理とデータの再利用が可能だったので機能的には十分との評価であった。ただし、操作性については画面のスクロール速度や登録航路数等問題点も指摘された。またこれらの編集操作は主画面の他船長室のモニタでも可能で、航海当直と並行して実施できるので、航海計画の作成作業が航海当直に影響を与える事はなかった。

今回の評価は比較的コンピュータ操作に明るい船

長によって行われたため、初期の変針点データの新規入力はスムーズに実施された。しかし船長によってはコンピュータの使用を負担に感じる方もいるので、システム納入前に主要航路のデータベース化も行われているが、更に自動的に入力を促すようなガイダンスシステムも今後検討を要する。

港湾や航路に関する情報や航行上の注意事項は、航海計画時の他、航海当直時にも必要であり、情報を容易に収集管理できる機能が望まれた。港湾や航路に関する情報の内、航行警報はデジタルデータとして民間情報提供会社から受信可能で、警報対象地点が主画面上に表示される。航行上の注意事項は航路計画時に作成された航路上のポイントに音声メモとして登録できる。その他のデータについても情報が電子化されておらず、手作業による検索が必要となる。今後、水路誌や海図の改補情報の電子化、音声メモのデータベース化が進められる事を期待する。

(8) 狭水道及び輻輳海域における航海当直 狭水道及び輻輳海域における操船で特に重要となるのは航路保持と避航操船である。航路保持については、自船状態把握作業及び操船作業の評価で述べた船位の決定、電子海図上への表示、トラックコントロール機能による計画航路に沿った航行の各機能が有効に働いており、他船のいない状態では狭水道においても十分有効である事が確認できた。

避航操船の支援は他船動向把握作業、避航操船作業及び操船作業で述べた支援機能が有効に働く必要がある。他船動向の把握支援はレーダ/ARPAによるデータの収集が基本となるが、狭水道または輻輳海域では陸地の捕捉、ターゲットフル、ロストの多発のため、必要なデータが自動収集できない状況であり、一名当直の状態では継続的に他船情報の収集を行う事は出来なかった。

しかし現実の航海では、(1)目視とレーダの残像表示機能を有効に利用して他船動向の把握を確実に行う。(2)当直スケジュールを調整して、狭水道及び輻輳海域では経験豊富な船長が必ず操船を行う。という対応により、他船情報収集機能及び避航支援機能の不備を補っていた。この際、航路逸脱警報機能及び音声による操船機能が有効に働いており、当直者が見張り及び避航判断を含む操船判断に専念でき、明石海峡等の輻輳する狭水道においても経験豊富な当直者であれば一名当直も可能であった。

但し、今後熟練した船員数の大きな減少が予想さ

れる事から、今回実現できなかった輻輳した狭水道での他船情報収集の自動化及び信頼性の向上は鋭意進めていく必要がある。

4.5.2 人間を含めたシステム異常時の対処の確認

(1) 評価の考え方 システム異常時には最低限従来の方法に移行して運航できる事が必要である。このため異常検出とその対処が円滑に行えるかどうかの評価が必要である。さらに人間とシステムの相互の異常検出とその対処について評価する。

(2) システム異常時に対する対処法の確認 異常の検出は操船支援システムと当直者の健全性の相互チェックにより実現された。さらにシステム側は複数のサブシステムに分かれているので、それぞれの間での相互チェックが行われていた。

操船支援システム内の相互チェック機能は設計通り機能しており、操船支援システムコンソールと音声入出力装置や DGPS、レーダ/ARPA 等センサーとの間で正常な情報が送られてこない場合にはその異常を当直者に通報した。またシステムコンソール自体が異常になった場合も、それとは独立した構成になっている音声入出力装置が音声で警報を出した。

当直者とシステムとの相互チェックは、音声による情報のやりとりの有無により実施されており、どちらかの応答が無い場合には相手側に異常があると判断できた。この方法は通常の当直作業でのやりとりを検出手段としているので当直者に特別な負担を強いる事がなく、人間性を損なわずに就労異常の検出が可能となった。

システム異常時には本システムを操舵系機器から切り離して、直接ダイヤルによる舵角指示及びエンジンテレグラフによって操船できる事が確認できた。操舵系機器は操船支援システムとは独立しており、手動操船のための操作パネルは別途コンソール上に集中配置されているので操作は円滑に行われた。

船橋無人状態、火災、ガス検知及び主機異常時には独立の警報システムや操船支援システムからの情報に基づいて船内放送設備を通じて緊急事態の種類と何をすべきかが放送されるようになっており、その動作も確認された。さらに警報に対する適切な対処がなされない場合は汽笛を三鳴後自動的に減速される事も確認した。

4.5.3 ヒューマン・マシン・インタフェースの評価

(1) ヒューマン・マシン・インタフェースに対する要望 本システムを使う上で、ヒューマン・マシン・インタフェースに対して求められた要望は、見張りを中断する事なく各種支援を受けられる事、応答が迅速かつ正確である事、日常作業に関しては特別な訓練やマニュアルの精読が必要でない事、さらに主画面を見なければ情報が得られない場合でも必要な情報が一瞥で得られる事であった。

従来航海機器は分散して配置され、使い方も標準化されておらず、高度な機能を使おうとするとマニュアルと首っ引きとなり見張りが疎かになるため、有用であるにもかかわらず使われていない事が多々あった。また他船情報の収集は目視による所が多く、見張りを中断しての機器操作は安全上好ましくない。

一方、一名当直においても従来の二名当直時と同様に当直者の必要とする情報が適確に提供され、当直者の操作指令が迅速確実に実行されなければならない。

(2) ヒューマン・マシン・インタフェースの設計方針と使用状況 これらの要望を実現するため、本システムでは音声による入出力とタッチパネルスクリーンによるワンタッチ操作及び情報の集中表示が採用された。

情報提供表示については当直者が目視による見張りに専念できるよう支援機器を見る事なく提供するため、事前に当直に必要な情報を操船シミュレータ実験や熟練者へのインタビューから調査し、それらの情報を音声で提供できるように設計された。また主画面の情報は一瞥で分かるように必要なもののみが表示され、詳細情報は音声またはタッチスクリーンによるワンタッチ操作で得られた。さらに在来船からの乗換え時の違和感の緩和や主画面上の情報過多を防ぐ事を考慮して、舵角指示器等航海計器も従来と同様に設置した。

操作指令及び情報要求についても、見張りを中断する事なくできるよう当直に必要な操船指令及び情報要求が音声で指令・要求できる事が確認できた。

(3) ヒューマン・マシン・インタフェースの評価 図 20 にインタフェース全般に対する有用性の主観的評価結果を示す。図に示す通り、全ての項目において「十分満足している。」との評価を得ており、こ

のインタフェースの考え方が一名当直に十分適用できる事を示している。

表 8 は安全性に影響を与える可能性のある音声入出力の問題点についてその対処策を示している。同表に示す通り、誤認識及び入力中断の防止、認識された指令及び実行結果の報告、指令の取り消しについて十分な対策が取られており、「有効である。」との評価を得た。

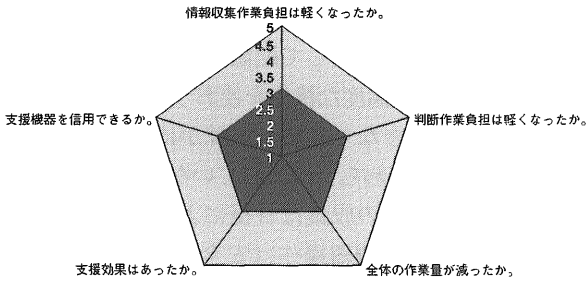


図 20: インタフェース全般についての主観的評価

また本システムでは当直作業に必要な限られた指令を決められた語順で指令した時のみ指令として認識する設計となっている。音声入力において自然言語を受け付けると様々な口調の指令が可能となるが、指令が曖昧となるため安全性を損ねる可能性が大きい。このため自然言語の採用には指令の曖昧さの問題を解決する手段が不可欠である。このことに関して乗組員は「今回採用した指令としての語彙数は、通常の当直作業に対して十分である。」と評価していた。

音声入出力を導入するもう一つの利点として、システムとのパートナーシップが生まれる事が挙げられる。音声によるインタラクションを用いる事により、一名当直時の寂しさや孤独感、疎外感の軽減の一助になる他、定時報告等の音声による報告が夜間の居眠り防止に有効に役立っていた。

4.5.4 当直時の精神的負担等の評価

(1) 概要 本システムを用いた一名当直時の精神的負担と音声入出力によるインタフェースの有効性に関する評価の時間的推移を調査するため、当直終了直後毎にアンケートを実施した。

評価は本システムで実際に当直作業を行った 6 名によって行われた。この内、A, B, E, F 氏が航海士、C, D 氏が機関員(但し、航海士の免許も持つ)

であり、F 氏は 11 月 25 日に C 氏の交代要員として乗船した。

精神的負担の計測には NASA-TLX 法の簡便法 [28][29] を用いた。NASA-TLX では、精神的負担を、

- (1) 知的活動の度合いである精神的要求
- (2) 肉体的活動の度合いである身体的要求
- (3) 作業に要求される速さに関わる時間的圧迫感
- (4) 行った作業の達成度
- (5) 作業を行うために必要な努力の程度
- (6) 作業中に感じる不安やストレスといった不満の度合い

の 6 つの指標で表わす。精神的負担はこの 6 つの指標に対する主観的評価を 0 から 100 の間で数量化し、これらの評価値の加重平均値として求めた。各評価値に対する重みは評価者毎に精神的負担に対する寄与の強さを考慮して事前に求める必要がある。しかし作業毎にこの重みを求めるのは労力及び時間的に現実的ではない。そこで、この重み付け係数を 6 つの評価値の大小関係から求めたのが NASA-TLX 法の簡便法である。今回は 6 つの評価値を小さいほうから順位付けし、その順位を重み付け係数として加重平均値を求め精神的負担の評価値とした。

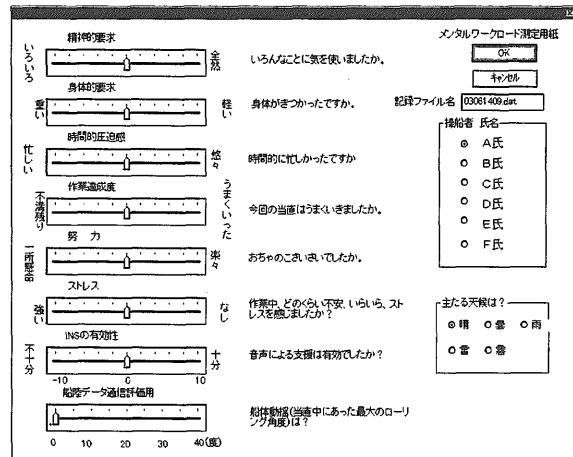


図 21: 精神的疲労調査画面

また音声による支援の有効性についても、同様に 0 から 100 の間での主観的評価の値を得た。

アンケートに際しては調査が当直直後である事を考慮し、できるだけ入力の手間を省くため、図 21 のような画面を持つプログラムを作成して、この画面

表 8: 音声入出力に関するシステム安全性の評価項目への対処

評価項目	対処
音声による指令は早口でも間違いなく受け付けられるか。	個人データを登録する事により、多少早口であっても、普通に発音すれば、正しく認識される。(誤認率は、8%程度で、調査後の乗組員のコツの取得により更に低下。)
システムが発声中に音声指令を発しても受け付けられるか。	システムからの報告途中であっても、音声指令により、システムからの発声を中断して、指令を受け付ける。
受け付けた指令の結果を航海当直者は予測できるか。予測支援を受けられるか。	システムが受けた指令はシステムによって復唱される他、その指令によって起こる変針等の状態変化も併せて報告されるため、主要な状態変化は予測可能となっている。
音声による指令は語順を変えても間違いなく受け付けられるか。	音声認識精度の向上と手順の確立による誤指令の防止と言う安全への配慮から、この機能は採用しなかった。
受け付けた指令を確認できるか。受け付けた指令の動作完了後、報告をするか。	指令を認識した時の復唱、実行時の実行報告となる状態変化の報告および指令完了後の完了報告を行う。
音声指令を取り消せるか。	“やめ”または“ステディー(そのまま保持)”を指令する事により可能。
語彙にない指令を受けたとき、否定しないで受け付ける方向で努力するか。	勝手な動作を防止するため、この機能は採用しなかった。
論理的に矛盾した指令を受けても、矛盾点とその解決の方向を示唆するか。	大角度変針や急激な減速指令に対しては、別途音声メッセージを出力する。
論理的には合っているが意図と違う誤指令を防ぐ事ができるか。	指令の復唱及び状態変化の報告により対応。

上のスライダーバー及びボタンの操作のみで調査・記録できるようにした。

計測は就航直後の1997年9月から開始し、システムの使用法の習熟とシステムの改善が終了し評価が安定した1998年2月まで行った。

(2) 精神的負担及び音声支援の有用性の評価 図22に精神的負担の評価値を示す。この図には、評価者である6名の当直者の結果を重ねて示している。

図中X軸上の△印は大きなシステムの改修があった日時を示しており、△印下の番号はシステム改修の履歴である表9左欄の番号に対応する。システムの改修としては、パラメータの設定ミス等による動作不良機器の調整、音声入力の認識率の向上のための機能追加及び音声入出力方法の変更等が行われた。

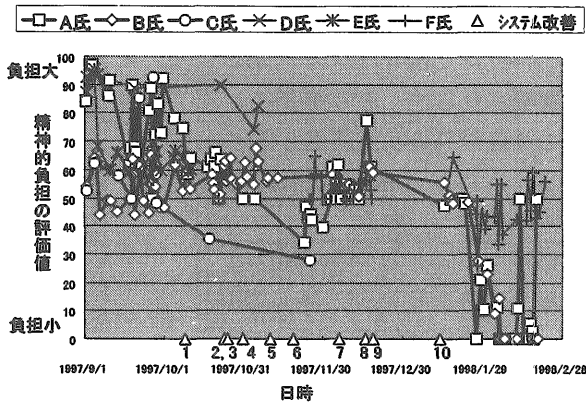


図 22: 当直時の精神的疲労の推移

導入当初はシステムに対する信頼が得られてなかったり、初めての使用と言う事もあり、精神的負担がかなり大きかったが、一ヶ月を過ぎた10月辺りから変動はあるものの普通の状態である50付近に収束している。そして、すべての改修作業が終わった1月半ば以降はさらに精神的負担は低減された。

途中から乗船されたF氏には当直に最低限必要な使用法を習得し負担なく使用できるようになるまでの期間を質問した。その結果、F氏は「従来の当直作業の知識があれば、他の船員がシステムを使用して当直をしている所を見て習う事により、最低限必要な使用法の習得には2日程度、在来船での当直と同等の精神的負担で使用できるようになるまで1週間程度である。」と評価している。実際、F氏には他の人に見られた使用開始当初の大きな精神的負担

が見られなかった。これはF氏にシステムの基本的な使用方法がうまく受け継がれた事及び同乗していた船員がすでにシステム全体を信頼できるものとして認識しており、その事がF氏にうまく受け継がれたためと思われる。今後、F氏のプロセスを踏襲する事により、システムの使用法の習得がスムーズにできると考えられる。

図23は音声支援に対する有効性の主観的評価の推移を示している。この場合も導入当初には良い評価は得られなかった。特に、導入当初は特定の言葉が認識され難かったり、システムからの音声出力の途中での入力が難しかったりしたため、不満があったものと思われる。しかし、11月の音声認識機能への学習機能の導入とマイク感度の再チューニングにより認識率が上がり、有効性の評価が満足できるレベルに上がった。

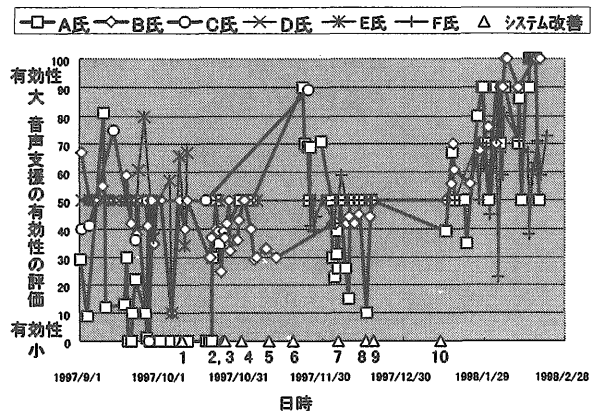


図 23: 音声支援に対する評価の推移

精神的負担と音声支援の有効性の評価において、作業中に起きた出来事やシステム改修の結果が評価全体に与える影響を考慮に入れなければならないが、大略以下の事が結論として得られた。

1. 導入当初の精神的負担は、概ね1ヶ月程度で通常の状態となった。
2. 当直に必要な最低限のシステムの使用法の習得には2日程度、普通の精神的負担で使用できるようになるまでには1週間程度必要であった。
3. システム改修後の状況での音声による支援は大変有効であった。

表 9: 新ぶろばん丸・操船支援システム 改修履歴

番号	対処・確認日	項目	内容
1	1997年10月9日	計装関係	ドップラーログの船速値が正常に表示されなかったため、古野電気が対処した。
2	10月24日	避航操船 音声入出力 計装関係	座礁予防機能が正常に動作していることを確認した。 音声消去タイマーを設定できるようにソフトを改修した。 自船回頭時に ARPA の捕捉機能が正常に働かなかったため、古野電気が対処した。
3	10月25日	避航操船	ARPA で捕捉する度に音声による危険船警報を発していたので、ソフトを改修した。
4	10月31日	航路保持	トラッキング開始時または実行中、向かうべき目標変針点を画面上で任意に選択できるようにソフトを改修した。
5	11月10日	航海監視 音声入出力 音声入出力 音声入出力	夜間モードの表示色の調整を行った。(特にウィンドウ背景と他船マークの色を調整した。) 音声入力の学習機能を導入した。(個人用の音声パターンファイルを作成し、音声で個人のファイルを指定できるようにした。) 音声指令の復唱を行うようにソフトを改修した。 音声確認の「了解」、「OK」を同等に受け付けるようにした。
6	11月19日	航海監視	プライベートチャートを ENC 上に重畳表示するようにソフトを改修した。
7	12月6日	計装関係	DGPS が受信されにくかったので、アカサカテックが対処した。
8	12月16日	航路保持 音声入出力	ドリフト補正に関するソフトを見直し、ドリフト補正が正常に機能することを確認した。 音声入力のマイク感度等の調整を行った。
9	12月19日	音声入出力 音声入出力	音声出力を女性音声に入れ換えた。 船速ボイスコントロールで、9.4kt 以下が指令できなかったため、赤阪鐵工(明陽電機)が対処した。
10	1998年1月13日	船速制御 音声入出力 音声入出力	計画船速を維持できるように船速フィードバック制御を導入した。(ソフトの一部不具合があり、改修した。) 音声による危険船報告は一回でよい(同じ危険船に対して何回も言うことあり。)との指摘あり、ソフトを改修した。 音声指令時、数値待ちタイムアウトで「数値をもう一度」と出力するようにソフトを改修した。

4.5.5 作業分析によるシステムの有効性の確認

(1) 概要 本システムを装備した近代化船における当直作業の状況と在来船での作業内容との比較によりその有効性を確認するため、在来船及び近代化船への乗船調査を行い、当直時の作業内容及び支援機能の使用状況を調査した。

近代化船の乗船調査時には当直員が行った指令、操作、システムへの入出力をイベントとして時刻と共に記録し、後日作業分析を行った。

また在来船については当直作業の状況を調べるため上述のイベントの他、航海士及び操舵手の作業場所も記録した。

記録に際しては、ビデオ撮影の他、後日行う分析作業も考慮してイベント収録プログラムを作成し、画面上のボタンをクリックする事によりイベントと時刻がファイルに記録されるようにした。

以下、在来船の乗船調査、近代化船の乗船調査、操船支援システムの有効性の確認の順に述べる。

(2) 在来船の乗船調査 在来船の乗船調査は、1997年2月に、999GTのLPG船(第8ぶろばん丸)を対象に実施した。データの収集は、水島から明石海峡を通過して堺港までと、堺港から名古屋港までのルートで行った。この船の運航体制は、航海士及び操舵手の2名であった。

図24に計測したイベントの時系列を示す。横軸が計測した時刻を、縦軸が計測されたイベントを示す。計測イベントは、図にあるように、操船指示、問い合わせ、操船の実行、報告等20項目について収集した。

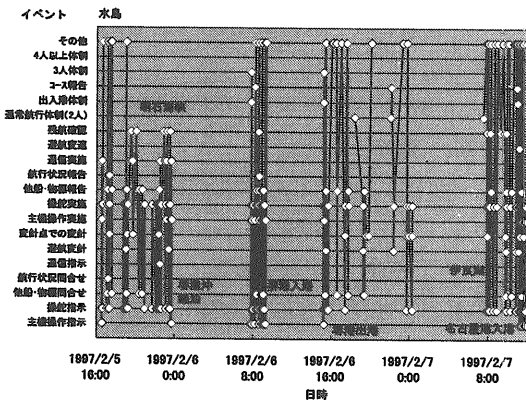


図 24: 従来船のイベント発生時系列

次に航海士及び操舵手の作業位置の計測結果を示す。図25及び図26にそれぞれ一般海域及び輻輳海

域における航海士及び操舵手の作業場所の時系列を示している。計測した作業場所は縦軸横に示した20個所である。一般海域は備讃瀬戸東航路出口付近から明石海峡の手前まで、輻輳海域としては明石海峡手前から堺港沖付近までの航行の内の2時間ずつを選んで表示している。

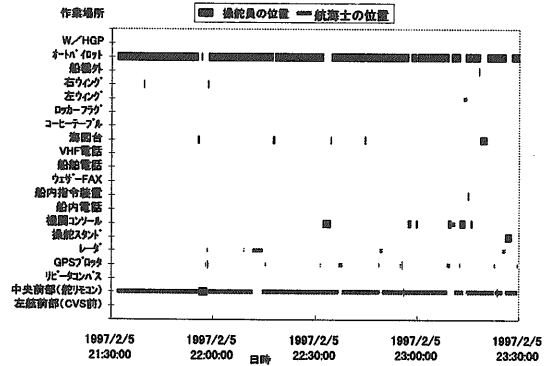


図 25: 従来船の輻輳海域における作業場所の時系列

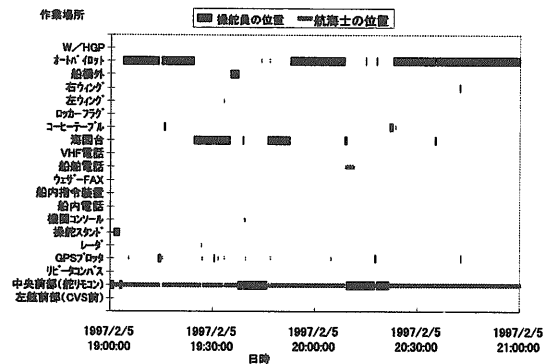


図 26: 従来船の一般海域における作業場所の時系列

図からわかる通り一般海域においては操舵手は海図台での作業や航海士の所での見張り等、操舵以外の作業を行う余裕があるが、輻輳海域においてはほとんどオートパイロットまたは機関コンソールの前において、操船作業に専念している事が伺える。

(3) 近代化船の乗船調査 近代化船の乗船調査は1998年12月に本システムを搭載した「新ぶろばん丸」を対象に実施した。乗船調査は水島から明石海峡を通過して川崎港沖までのルートで行った。評価時の運航体制は航海士1名であった。

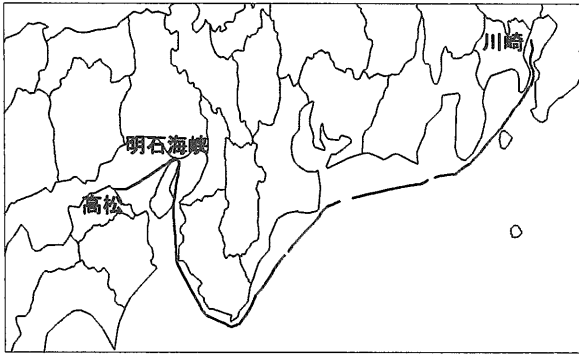


図 27: 近代化船の乗船調査時の航跡

図 27 は乗船調査時の高松から川崎沖までの航跡図である。この航跡は本システムで収集した航跡データで、このデータから当直時における本システムの稼動状況がわかる。航跡が描かれている部分が操船支援システムが稼動している部分で、一部システムの調整のために意識的に停止させた所を除くと、明石海峡や浦賀・中ノ瀬航路の通航を含めて 100% の利用率であった。

次にイベント計測結果を図 28 に示す。計測したイベントは図中縦軸横の 33 項目で、音声によるシステムへの命令、問い合わせ、システムからの各種報告が含まれている。イベントの収集については伊豆沖から川崎沖に停泊するまで行った。図 29 は図 28 の計測結果の 20 時付近を拡大した図で、伊豆沖における避航操船の様子を表わしている。この図からわかる通り、衝突危険船に遭遇した際、危険の報告を受け、この場合はタッチパネル操作で確認し、コース指示を行って避航操船をしており、システムが有効に機能している事が確認できた。

また乗船調査の際、音声認識の誤認率も計測した。計測期間中の音声によるシステムへの入力回数は 181 回で、誤認した回数は 14 回であったので、本システムの音声認識誤認率は、7.7% であった。この後、乗組員は音声入力の手順を習得し、2 月の乗船調査では計測はしていないが、ほとんど誤認識のない状況になっていた。

(4) 操船支援システムの有効性の確認 当直作業の内容を比較するため、近代化船及び在来船それぞれの乗船調査から得られたイベントを、命令、報告、確認、問い合わせ、手動作業、タッチパネル操作の

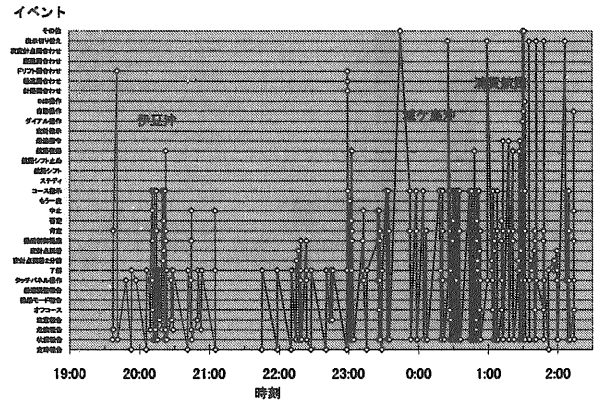


図 28: 近代化船のイベント発生時系列

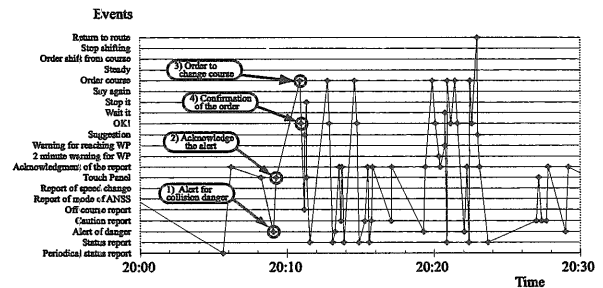


図 29: イベント発生時系列詳細

6 項目に分類し、単位時間あたりのイベント頻度としてまとめた。

指令と確認の項目には操舵手またはシステムに対する操船指示と指令内容の確認が含まれる。報告には操舵手またはシステムから当直員への報告が含まれる。受信確認とタッチパネル操作は近代化船特有のもので、受信確認はシステムが報告した事に対する当直者の確認であり、タッチパネル操作は主画面上での操作で表示のレンジ変更等画面操作の他、ポップアップボタンによる確認が含まれる。質問は操舵手またはシステムに質問する行為である。最後の手動作業は、在来船の場合は変針や速度調整、残航確認等の作業にあたり、近代化船の場合は操船モードの切り替えやオートパイロット、ダイヤルによる直接操舵及び通信作業が含まれる。

図 30 と図 31 に、それぞれ近代化船及び在来船の集計結果を示す。まだらのバーが全計測期間、白いバーが通常海域、黒いバーが輻輳海域の結果である。

在来船と比べて、近代化船は指令と確認及び報告の回数が多く、手動作業が少なかった。指令と確認

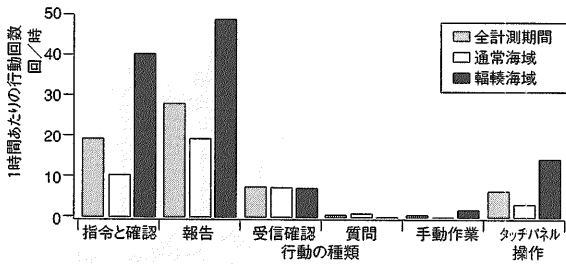


図 30: イベント頻度分布 近代船

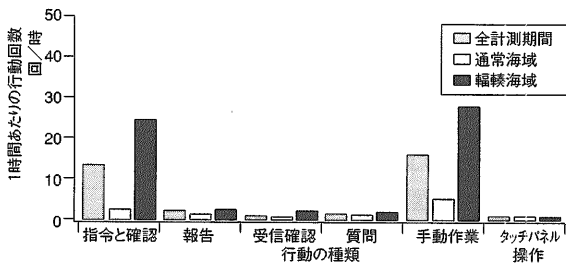


図 31: イベント頻度分布 在来船

にはコース等の指令と復唱された指令に対する肯定及び否定のための確認が含まれており、実質半分の数であるため命令回数は在来船とほぼ等しいと思われる。また報告には在来船と同じ質問に対する報告の他、定時報告、注意報告が含まれており、システムが当直者に対して従来よりも高頻度で情報支援している事が分かった。タッチパネル操作は多いように思われるが、そのほとんどが音声による受信確認の代わりにポップアップボタンを押したもので、作業負担の増加はほとんど無かった。

図から判るように、近代化船では手動による作業はほとんどなく、従来この作業を行っていた操舵手の作業はほとんどシステムに吸収されたと言って良く、実際調査時に観察した様子からも、操舵関係の作業はシステムに任せて見張りに専念でき、十分余裕を持って他の作業に対処できている事がわかった。

4.5.6 操船時の余裕の評価

ここで、本システムを用いた操船作業における余裕の尺度である「安全のレベル」について考察する。本システムの目的はこのシステムと協調して一名で

安全で効率的な操船を実現する事である。この目的と操船シミュレータ実験や乗船調査時のインタビューから得られた安全に関する意見を基に、安全のレベルを以下のように定義した。

レベル 1 一名で主要な操船作業が可能

レベル 2 現在の二名当直での操船作業と同等以上の余裕で操船作業が可能

レベル 3 危険が予見できる情報を基に大局的な判断による操船が可能

レベル 1 は主要操船作業に対して考慮された潜在的危険への対処も含めて作業に必要な機能が当直者と操船支援システムに備わっており、その作業が一名で実行可能な状況である。

レベル 2 は現在まで 2～3 名で行われてきた操船作業と同程度以上の余裕が一名当直による作業においても確保されているレベル。レベル 3 は衝突や座礁等の危険に関するチェックや予見のための情報支援が行われ、その情報を用いた操船判断が可能なレベルである。

今回実施した評価では主要作業が一名で実施可能である事が確認でき、全ての作業において現状の作業負担に比べて軽減され、作業量自体も少なくなったと評価された。このため、本システムを用いた一名当直の安全レベルはレベル 2 にあると評価できる。但し、他船動向把握作業においては他船捕捉作業の自動化がなされておらず、最も必要とされる輻輳海域や狭水道でデータの不備から十分な避航操船支援が受けられない状態であった。しかし実際の操船においては代替機能であるレーダの残像表示を用いて安全航行を確保している状況であった。今後この点の改善が必要である。

また情報通信技術の発達により気象・海象情報が海上からでも利用可能になった他、電子海図等のデータベースの充実、センサの高精度化により、航行上の危険のチェックや予見が可能になりつつあり、さらなる海上での情報通信技術の利用及び陸上からの支援情報の提供により、レベル 3 の安全まで確保できる支援の可能性が示された。

5 まとめ

本研究では安全航海のための操船支援方策の策定及びその安全性評価法について、安全性の向上と操

船者に受け入れられるユーザビリティを両立する事に重点をおき、設計及び安全性の評価法について考えを示めた。さらにこの考えに基づいた一名当直用操船支援システムの提案を行いその安全性の評価を行った。

操船支援のあり方について

本論ではまず日本海運の状況や社会の要望等研究の背景と操船支援に関する研究の流れを示した後、著者等が実施した操船シミュレータ実験や熟練船員へのインタビュー結果を基に、操船支援システムが持つべき要件を以下の様にまとめた。

1. 操船支援システムと人間との役割分担とその明確化
 - 1.1 特定の作業を信頼して任せられる
 - a. システムの動き及びその健全性がわかる
透明性
 - b. ワンタッチで従来の方式に切替可能
2. 機能の統合と集中配置
 - 2.1 情報・操作の統合による作業負担の低減
3. 人に優しいヒューマン・マシン・インタフェース
 - 3.1 無理なく快適な作業の実現
 - 3.2 主要機器の使用法の標準化
4. 人間間の情報の共有
5. 操船支援システムに対する支援体制

さらにこの考えに基づき現在の航海当直作業について概説した後、各作業における支援内容と今後の課題について述べた。

人間を含むシステムの評価法

次にシステムの安全性評価法について考察すると共に、人間と運転支援システムで構成されるヒューマン・マシン・システムの安全性の評価法を提案した。

システムの評価においては、まずシステムの目的を明らかにし、その目的を達成させる機能を持ち、その機能を維持できる事を確認する。またシステムの安全性を考慮すると、システムを構成する要素が機能低下した時にも安全性を確保できることが重要である。このためシステムの評価には以下の条件を満足する必要がある。

- (1) 目的達成のための機能が備わっているか?(機能の充足)
- (2) 人間も含めて一定期間その機能を維持できるか?(機能の維持)

- (3) 人間を含めた構成要素に不具合があった場合、許容できるレベルの安全を保つことができるか?(機能低下時の対応)

特に人間を含むヒューマン・マシン・システムの場合、運転支援システムが人間に受け入れられる事が必要不可欠であり、人間が無理なく快適に機能を果たさせるための支援、人間の機能維持のための方策及び人間の機能低下時の対応の確立が必要である。このためには2章で示した条件を考慮した支援を確立すると共に、実際に行われる作業を時間軸の沿って分析し、その作業が継続的に行える事を評価する必要がある。

一方運転支援システムを評価する場合、システムの安全性は最重要ファクタの1つである。この安全性の評価では、利害の異なる複数の評価者が互いの状況を考慮しつつ、複数の提案の中から合意を得る必要がある。こうした主観的な評価において合意を得るためには共通に理解できる指標が必要になる。

著者等は「潜在的危険」と「安全余裕」による安全性評価の考え方を示し、安全余裕を測る指標として「安全のレベル」を示した。

安全性を評価する際、まず考慮すべき潜在的危険を洗い出す。この潜在的危険は安全性を評価する際の危険の範囲を示しており、安全性について議論するベースとなる。

安全余裕は潜在的危険が顕在化した場合その危険回避作業時に運転員が持つ余裕であり、かつ、考慮していなかった危険への対処のための余裕である。この安全余裕は主観的なものであり、危険の種類によってさまざまな形態によって表される。一方、運転員は取り得る余裕の大きさに応じて、作業のレベルを変えて運転していると考えられる。

そこで著者等は運転の熟練者と評価者によりシステムの運転状況から運転員が取り得る安全レベルを定義し、評価対象の作業がどのレベルで行われているかを示す事により、システムの安全性を評価する手法を提案した。

一名当直用操船支援システムの開発とその評価

一名当直用操船支援システムの開発に際しては、まず2章で述べた支援の考え方の基づいて一名当直を実現するために必要な操船支援システムの仕様を求めるため、操船シミュレータを用いて居眠りや集中力の低下が心配される長時間の一名当直航行実験及び頻繁な操船判断が求められる輻輳した狭水道に

おける航行実験を行った。

次に実験から求められた要望を基に、当直時の作業量の適正化を考慮した操船支援システムとの役割分担、操船支援システムへの要望を実現するためのヒューマン・マシン・インタフェース及び安全対策を検討して、操船支援システムの設計・開発を行った。本システムではトラックコントロール機能等の自動化機能の採用と共に、アイフリー操作を実現するために、各種警報及び情報提供、情報要求及び操船指令を含むシステム操作を支援システムとの音声会話及びワンタッチ操作でできるように、音声入出力装置とタッチパネルモニタで構成されるインタフェースを採用した。こうして設計・製作された本操船支援システムは、1997年9月に「新ぶるばん丸」(749GT LPG 船)に搭載されて、現在まで安全な運航を継続している。

操船支援システムの評価は、まず航海当直で行われる主要な作業を要素作業に分け、各要素作業について支援内容の確認と作業量や支援効果についての主観的評価を行った。この結果他船動向把握作業での他船情報収集機能を除いて、各支援機能の使用が乗船調査により確認できた他、当直者の主観的評価においても良好な評価結果を得た。

また本システムの大きな特徴である音声入出力とタッチパネルスクリーンにより構成されるヒューマン・マシン・インタフェース及び一名当直に対応した安全対策についても、十分実用に足るとの評価を得た。

音声入出力機能は当直者の見張り作業を妨げない容易でシンプルなアイフリー操作を実現した。この音声入出力機能とタッチパネルによるワンタッチ操作機能の組み合わせは、乗組員の信頼を得ることができ、現実の使用が十分可能であるとの評価を得た。この事は乗船調査時の使用率が100%であり、実際に手動操作がほとんど無くなった事からも確認できた。

安全対策についても、支援システムの不具合の検出及び対策の実行、当直者の不具合の検出及び対策の実行が的確に実施できる事が確認された他、特に本研究で提案した音声による就労監視システムは当直者に不当な負担をかけることなく当直者の健全性を確認でき、乗組員に受け入れられ継続して使用されていた。

さらに操船支援システムの有効性を確認するため、

在来船と本操船支援システムを搭載した近代化船の当直作業の乗船調査を行い、当直時の精神的負担及び当直作業の分析を行った。これにより、近代化船では手作業はほとんどなくなり、従来操舵手及びレーダ監視員が行ってきた作業のほとんどが操船支援システムに吸収されており、操船関係の作業はほとんど支援システムの誘導機能に任せられ、当直者は見張りに専念でき、十分余裕を持って当直できている事がわかった。

不測の事態を考慮した操船時の余裕の評価について、「安全レベル」を用いて評価を行った。操船作業時における安全のレベルは、操船シミュレータ実験から、システム開発、実際の運航まで評価に加わっていただいた熟練船員の方々と著者等評価者により、以下のように定義した。

レベル1 一名で主要な操船作業が可能

レベル2 現在の二名当直での操船作業と同等以上の余裕で操船作業が可能

レベル3 危険が予見できる情報を基に大局的な判断による操船が可能

今回の評価では主要作業が過度の負担無く一名でできることが確認でき、さらに通常の2~3名での当直作業に比べて負担が軽減できて、作業自体も少なくなったと評価されている事から、レベル2の安全レベルは確保できていると評価した。また気象海象及び潮流のデータや避航支援機能についてはその有効性が確認されており、レベル3の安全レベルまで確保できる可能性は示されたが、一部作業においては許容できる作業負担内での支援が実現できなかった部分もあり、今後のさらなる検討が必要である。

最後に、船長の操船支援システムに対するコメントを示す。

「当初はINS(操船支援システム)に対する信頼性、操作性等に若干の不安もあったものの、システムの手直しと併せて音声での対話を重ねていく内にINSとも連帯感ができた上、各機能の操作にも慣れ、現状においては通常の沿岸、狭水道、港内航行とも航海士も含めてこの操船支援システムを全面的に活用し、一名での当直業務を問題なく遂行している。」

この様に、本システムは実務者からの信頼を得て実務に使用されている事が確認できた他、音声入出力を使用することにより操船支援システムを擬人化

でき、パートナーシップが生まれ、一名当直時の寂しさや機械に使われると言う疎外感を低減できた。この事から有効なヒューマン・マシン・インタフェースが構築できたと評価できる。

最後に、システム開発に当たってご協力いただいた共和産業海運(株)三輪会長、谷本船長と新ぶろばん丸のクルーのみなさま、三菱重工の”Super Bridge X”の開発チームのみなさまには厚く御礼申し上げると共に、本システムを用いて「新ぶろばん丸」が今後も安全航行出来ることをお祈りいたします。

参考文献

- [1] Hironao Kasai and Eiichi Kobayashi. Maneuvering Simulation Approach to a Ship's Piloting Expert System. *Proceedings of International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability 93*, Vol. 1, , 1993.
- [2] Takeshi Fuwa, Takeo Koyama, Kunihiko Tanaka, and Junji Fukuto. A Knowledge-based System Applied to an Automatic Ship Navigation System. *Proceedings of IFAC Workshop on Expert systems and Signal Processing in Marine Automation, CAMS'89*, pp. 45-57, 1989.
- [3] 不破健. 自動運航システムの安全評価について (その1) 安全性の評価. 日本造船学会論文集, Vol. 166, pp. 453-460, December 1989.
- [4] 不破健. 自動運航システムの安全評価について (その2) シミュレーションシステム. 日本造船学会論文集, Vol. 166, pp. 461-468, December 1989.
- [5] 沼野正義, 奥住恵子, 福戸淳司, 金湖富士夫, 田中邦彦, 桐谷伸夫, 有村信夫, 村山雄二郎, 今津隼馬. 船舶航行における潜在的危険の評価. 日本航海学会論文集, Vol. 85, pp. 25-32, September 1991.
- [6] 金湖富士夫, 村山雄二郎, 伊藤泰義, 田中邦彦, 沼野正義, 有村信夫, 桐谷伸夫, 福戸淳司, 宮崎恵子, 原木信夫, 今津隼馬. 輻輳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, Vol. 174, pp. 875-886, December 1993.
- [7] 金湖富士夫, 村山雄二郎, 伊藤泰義, 田中邦彦, 沼野正義, 有村信夫, 桐谷伸夫, 福戸淳司, 宮崎恵子, 原木信夫, 今津隼馬. 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, Vol. 174, pp. 893-902, December 1993.
- [8] 金湖富士夫, 村山雄二郎, 伊藤泰義, 田中邦彦, 沼野正義, 有村信夫, 桐谷伸夫, 福戸淳司, 宮崎恵子, 原木信夫, 今津隼馬. 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, Vol. 175, pp. 87-100, June 1994.
- [9] (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.
- [10] 福戸淳司, 宮崎恵子, 沼野正義, 村山雄二郎. 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, Vol. 92, pp. 329-336, March 1995.
- [11] Kuniji Kose, Kouhei Hirono, Kenji Sugano, and Isamu Sato. A New Collision-Avoidance-Supporting-System and Its Application to Coastal-Cargo-Ship "Shouyou". *Proceedings of IFAC Workshop on Control Applications in Marine Systems, CAMS'98*, 1998.
- [12] Junji Fukuto, Masayoshi Numano, Keiko Miyazaki, Yasuyoshi Itoh, Yujiro Murayama, Kazuo Matsuda, and Norio Shimonó. An advanced navigation support system for a coastal tanker aiming at one-man bridge operation. *Proceedings of IFAC Workshop on Control Applications in Marine Systems, CAMS'98*, 1998.
- [13] Sanders M. and McCormick E. *Human Factors in Engineering and Design*. McGraw-Hill, 7 edition, 1993.
- [14] 福戸淳司, 沼野正義, 下野雅生, 松田和生. 音声入出力を用いた一名当直時の人間を含むシステムの異常対策について. 日本航海学会論文集, Vol. 102, , March 2000.

- [15] 福戸淳司, 宮崎恵子, 金湖富士夫, 田中邦彦, 有村信夫, 桐谷伸夫, 原木信夫, 沼野正義, 伊藤泰義. シミュレータによる高速運航の安全性評価について. 船舶技術研究所研究発表会講演集, Vol. 60, pp. 93-96, December 1992.
- [16] Jakob Nielsen. *Usability Engineering*. AP Professional.
- [17] John Lee and Neville Moray. Trust, control strategies and allocation of function in human-machine systems. *Ergonomics*, Vol. 35-10, , 1992.
- [18] 宮崎恵子, 沼野正義, 福戸淳司, 金湖富士夫, 桐谷伸夫, 有村信夫, 田中邦彦, 村山雄二郎, 伊藤泰義, 今津隼馬, 甲斐繁利. 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, Vol. 87, pp. 115-122, September 1992.
- [19] 海難審判庁. 内航タンカーの海難の実態, 1995.
- [20] 全国内航タンカー海運組合、運輸省船舶技術研究所. 内航タンカー近代化船研究発表会講演集, 1996.
- [21] 田中邦彦, 金湖富士夫, 宮崎恵子, 桐谷伸夫. 船舶航行システムの安全性評価用シミュレーター I —リアリティーのある景観情報—. 日本航海学会論文集, Vol. 88, pp. 129-136, March 1993.
- [22] 全国内航タンカー海運組合、運輸省船舶技術研究所. 航海支援システム実証成果発表会講演集, 1998.
- [23] 海難審判庁. 海難審判の現況, 1992.
- [24] 山崎祐介. 見張り不十分に因る船舶間衝突に実態について —海難構造の解析—. 日本航海学会論文集, Vol. 90, , March 1994.
- [25] 伊藤泰義, 田中邦彦, 平尾好弘, 村山雄二郎, 中村保博, 池田重樹. シミュレータを用いた長時間運航の安全性評価について. 日本航海学会論文集, Vol. 93, pp. 251-262, October 1995.
- [26] 沼野正義, 桐谷伸夫, 福戸淳司, 田中邦彦. 狭水道航行における運航支援. 日本航海学会論文集, Vol. 92, pp. 85-90, October 1995.
- [27] Takao Watanabe, Kaichirou Hatasaki, Ken'ichi Iso, and Hiroaki Hattori. Speech recognition (in japanese). *NEC Gihou (Technical Report)*, Vol. 47-8, , 1994.
- [28] 三宅晋司, 神代雅晴. メンタルワークロードの主観的評価法. 人間工学, Vol. 29, No. 6, 1993.
- [29] 下野雅生, 松田和生, 福戸淳司. 単独当直のための航海支援システムの設計と実証船による機能性評価. 日本造船学会論文集, Vol. 187, , June 2000.