

テーブルコンテンツ

ClassNK技報No.3 2021(Ⅰ)H3

目次i

特集記事 自動運航船.....i

自動運航船の実用化に向けた最新動向と課題1

安全航行に向けた衝突リスク判断方式の研究開発
と検証.....9

自動操船AIの開発と実船実験による検証27

MEGURI2040を通じた技術開発への挑戦35

自動運航技術の開発41

自律運航船の実現に向けた操船システムの開発47

自動運航船関連技術に対する安全性評価について55

一般技術ii

単胴船に作用する6自由度のFroude-Krylov力の簡易
算式の開発65

長期予測をベースとした波浪荷重の簡易算式の開発81

温室効果ガスの削減に向けた気候変動イニシアチブ
について91

Innovation Endorsementに関する取り組み101

IMOの動向105

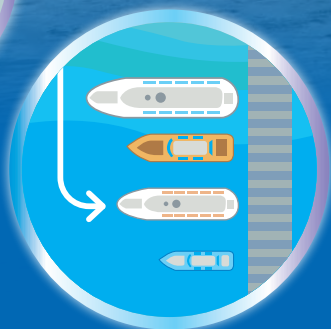
テーブルコンテンツ

ClassNK

ClassNK 技報

No.3 2021年 (I)

特集：自動運航船



—目 次—

特集記事 自動運航船

（招待巻頭論文）

自動運航船の実用化に向けた最新動向と課題東京海洋大学 清水 悦郎..... 1

英語でMaritime Autonomous Surface Ships (MASS), 日本語で自動運航船, 無人運航船, 自律運航船などの名称で呼ばれる船舶の実用化に向けた実証実験を含む研究開発が世界各国で積極的に進められている。本稿では主だった国内外における自動運航船の技術研究開発動向を紹介するとともに, 著者の考える技術的課題, 必要な研究開発事項について述べる。

安全航行に向けた衝突リスク判断方式の研究開発と検証

..... (株) 日本海洋科学 桑原 悟, 西村 遥, 古野電気 (株) 中川 和也, 芳永 真,
日本無線 (株) 井関 修一, 吉田 亮, 東京計器 (株) 箱山 忠重,
(株) MTI 沓名 弘二, 中村 純..... 9

2016年から5年間実施された, 国土交通省「先進安全船舶技術研究開発補助事業」の採択事業「船舶の衝突リスク判断と自律操船に関する研究」を, 日本郵船, MTI, 日本海洋科学, 古野電気, 日本無線, 東京計器で実施した。本稿では, この研究成果のうち, 船舶の衝突事故防止と船長・航海士の安全運航支援を目的とした, 航海計器メーカー3社による衝突危険度指標と衝突危険領域表示装置の開発と, 操船シミュレーターを利用した実証実験による効果検証の概要を紹介する。

自動操船AIの開発と実船実験による検証

.....大阪府立大学 橋本 博公, (株) 日本海洋科学 西村 遥,
(株) MTI 西山 尚材, 日本無線 (株) 樋口 穰司..... 27

ヒューマンファクターに起因する衝突事故や将来的な船員不足の解決策として, 自動運航船の開発に期待が寄せられている。自動航行技術の実現に向けて, 今後は操船における“認知”支援に留まらず, “判断”や“行動”にまで踏み込んだ自動操船システム開発の動きが加速するものと考えられる。本稿では, 国土交通省交通運輸技術開発推進制度（平成30年～令和2年度）の支援を受けて開発を行ったAIによる自動操船システムについて概説し, システムのリスク評価, 操船シミュレーターを用いたAIの評価, 大阪湾で実施した実船実験の結果について紹介する。

MEGURI2040を通じた技術開発への挑戦 (株) 商船三井 鈴木 武尊..... 35

安全運航のレベルアップと船員労務負担軽減という船会社にとっての大きな目標に対して, 技術がどこまで貢献できるのか? かつて誰も試みたことがなかった, 営業航海に従事している本船での岸壁から岸壁までの自律運航実証実験に, 商船三井が代表を務めるコンソーシアムが挑戦する。プロジェクト開始から2年目を迎えた本年, 技報への執筆を機に振り返りを行い, 今迄の歩みや船会社として気付きを列挙した。プロジェクトの実態を伝えるように記載することに努めており, 自律運航技術開発や枠組み作りに従事されている方々を始め, 自律運航に関心を持たれている全ての方々に一読頂けることを期待する。

自動運航技術の開発三菱造船（株） 井上 総一郎，森 英男..... 41

船舶の運航に関しても、運航支援や自動化に対する技術開発ならびにIMOでの法整備が進められている。当社においてはこの度日本財団との技術開発共同プログラム事業にて無人運航の実証実験を実施する事となった。今般の実証実験では、AIや画像処理、クラウド利用等の最新の各種技術を大型フェリーに搭載し、無人運航を目指した自動運航技術の開発と検証を行う。本稿でその搭載技術の概要を述べる。

自律運航船の実現に向けた操船システムの開発

.....三井E&S造船（株） 三好 晋太郎，（株）三井造船昭島研究所 五百木 陵行..... 47

近年、船舶運航の自律化さらにその先の無人化を目指した技術開発が活発に行われている。本稿では、船舶の自律運航に向けた操船システムの開発の要件定義と概念設計について、次に船舶の動きを制御する操船制御システム、特に本稿ではアプローチ操船制御について構成及び技術的な説明を行った。最後に、説明したアプローチ操船制御及び着岸制御が組み込んだ港内操船制御システムを用いて、実際の大型フェリーで実岸壁に対して、アプローチ・着岸操船制御の実証試験の速報について報告した。

自動運航船関連技術に対する安全性評価について技術研究所..... 55

国内及び海外においていくつかの具体的な自動運航船の開発プロジェクトが世界各地で立ち上がっている。本稿では、船級協会の立場から自動運航船の安全性をどのように評価すべきかについて記載するとともに、自動運航関連技術の安全性評価に対する本会の取り組みについて紹介する。

一般技術

単胴船に作用する6自由度のFroude-Krylov力の簡易算式の開発

.....海上技術安全研究所 松井 貞興，船体開発部，川崎重工業（株） 芦田 晋作..... 65

本研究では、任意の船種及びサイズに対して適用できる主要パラメータ（ L, B, d, C_w, C_b ）を用いた波浪荷重の簡易算式の開発を目標に、6自由度のFroude-Krylov力の簡易算式を開発した。開発したFroude-Krylov力の算式は、船型パラメータならびに波向き、波長が陽に用いられた初等関数で表されている。また、あらゆる船種やサイズの154隻の実船型を用いた数値解析と比較し、あらゆる波条件で良好な精度を有することを確認している。

長期予測をベースとした波浪荷重の簡易算式の開発

.....船体開発部，海上技術安全研究所 松井 貞興，川崎重工業（株） 芦田 晋作..... 81

船舶の設計において、乗船者の安全性や乗心地、船体構造設計のための波浪荷重など様々な側面から波浪中の船体運動の合理的な推定が求められている。今日では、3次元パネル法等の耐航性ツールによって精度よく波浪中の船体運動を推定することができ、設計現場や規則開発において実用に供されている。一方で、数値解析に依らない船体運動の簡易的な推定手法にも高い需要が存在する。

本稿では、長期予測を定式化し、任意の船種及びサイズに対して適用できる主要パラメータ（ L, B, d, C_w, C_b ）を用いた汎用的かつ高精度な超過確率 10^{-8} レベルのHeave加速度とPitch角の簡易算式の開発の内容を紹介する。

温室効果ガスの削減に向けた気候変動イニシアチブについて

..... 環境・再生可能エネルギー部..... 91

政府レベルでの脱炭素化に向けた動きが加速している。一方で、機関投資家や銀行といったマネー世界に端を発した民間レベルでの自主的な脱炭素を促す取り組み（気候変動イニシアチブ）は、いまや世界の潮流となり、国際的なサプライチェーンの中で日本企業が活動を続けていくうえで無視できないものとなっている。本稿では、こうした国際的な気候変動イニシアチブの概要と、日本企業によるこれらへの対応に係るNKのサポート業務について述べる。

Innovation Endorsementに関する取り組み

.....デジタルトランスフォーメーションセンター..... 101

海事業界においてもデジタル変革（デジタルトランスフォーメーション：DX）への取り組みが進むなか、NKは2030年頃のデジタル社会において船級協会に期待されるであろう役割をまとめた「ClassNK デジタルグランドデザイン 2030」を発表するとともに、革新的な技術や取り組みを認証する枠組みである「Innovation Endorsement」を開始した。本稿では、デジタルグランドデザインの概要とともに、この実現に向けた取り組みの一環であるInnovation Endorsementとその関連の認証サービスについて紹介する。

IMOの動向 国際部..... 105

本稿では、IMO（国際海事機関）における国際条約等の審議動向を紹介する。今号では、IMO第103回海上安全委員会（MSC 103）の審議概要を紹介する。

自動運航船の実用化に向けた最新動向と課題

清水 悦郎*

1. はじめに

本稿を読んでくださる多くの方々には既知のことであるが、英語でMaritime Autonomous Surface Ships (MASS)、日本語で自動運航船、無人運航船、自律運航船などの名称で呼ばれる船舶の実用化に向けた実証実験を含む研究開発が世界各国で積極的に進められている。日本語における自動運航船、無人運航船、自律運航船の違いに関しては、著者なりの定義づけを後述するが、本稿ではまとめて自動運航船と呼ぶこととする。

国によって多少の温度差はあるが、自動運航船に関する研究開発を行う目的は、「船舶運航の安全性向上」、「船員の負担軽減」、「船員不足への対応」、「環境負荷低減」、「運航コスト削減」、「技術的興味」に分類できる。COVID-19のために海外渡航が制限され現地調査を行うような活動が難しくなってしまったが、諸外国においても抱えている問題は同じだなあと実感することが多い。裏を返せば、日本国内で抱える問題を解決する技術を開発すれば、同じ技術を海外に売り込めるチャンスが多いということである。

一方、諸外国では単に技術開発を進めるだけでなく、技術開発の段階から法制度整備・国際標準化をにらんだ活動も積極的に行われている。日本においても国土交通省が2020年12月に「自動運航船の安全設計ガイドライン」を策定する¹⁾、(一財)日本船舶技術研究協会が日本財団の助成を受けて「MEGURI 2040 (無人運航船)に係る安全性評価等事業」を実施し、その中で「無人運航船の実施に必要と考えられる安全上の要件を取りまとめ、自動・遠隔及び自動化レベルを統一して取り扱うガイドライン案を作成する」²⁾とする等、国際標準化に向けた活動が始まっている。改めて述べる必要もないことであるが、これらの事業に日本海事協会の方々も参加されているため、日本としても技術開発だけでなく法制度整備に関しても海外に向かって発信していく体制は整っている。

このような社会情勢を鑑み、本稿では主だった国内外における自動運航船の技術研究開発動向を紹介

するとともに、著者の考える技術的課題、必要な研究開発事項について述べる。

2. 自動運航船とは？

2.1 自動運航船等の用語定義

はじめに著者の考えるMASS、自動運航船、無人運航船、自律運航船、自動航行船、無人航行船、自律航行船の定義を述べる。本定義はあくまでも著者が使い分けたほうが本稿で述べる技術動向を説明しやすいために定義するものであり、一般的に認知されている定義ではないことはご承知おき頂きたい。現在、MASSに関しても、ISOにおいてISO/AWI 23860として検討されている段階であるため³⁾、正式に定義されると本稿で用いている意味と異なる可能性があることをあわせてご承知おき頂きたい。

2.1.1 自動航行船・自律航行船・無人航行船

「自動航行船」とは何らかの自動制御機能を使用して、人間が直接、舵や推進器等の航行に関する機器を操作することなく航行することのできる船舶全般のことである。既に既存の船舶の多くにも搭載されているヘディングコントロールやコーストラッキングも自動制御機能の一種であり、これらの機能を用いて航行している船舶も自動航行船である。また、後述する、自律航行船、無人航行船も自動制御機能を利用して航行する船舶であるため、自動航行船の一種である。

「自律航行船」とは、各種センサをもちいて船舶周囲の物体を認識し、衝突の危険のある物体であるか否かを判断し、衝突の危険のある物体に対しては回避行動を行い、回避行動終了後は設定された目的地に向かうための適切な航路に戻る、というような行動を、人間の判断が介在することなく自動で行うことのできる自動航行船のことである。ヘディングコントロールやコーストラッキング制御には障害物を認識し回避するという認知判断機能はないが、認知判断機能が搭載された自動制御装置を搭載する船舶ということが大きな特徴であり、技術開発目標となっている船舶である。ただし、あくまでも操船に関する判断、操作を人間が介在することなく行うこ

* 国立大学法人東京海洋大学

とのできる機能を有する船舶という意味であり、実際に操船を行うことのできる船員が乗船しているか否かには関係がない。

「無人航行船」とは、船員が乗船していない船舶のことであり、上記の自律航行船の機能を搭載している、または遠隔地から人間が通信手段を介して操船指令を船舶に送信しその指令に基づいて航行する自動航行船のことである。船員が乗船していないということが条件であり、旅客は乗船していても良い。通信が途切れる可能性があることを考えると、自律航行船の機能を装備していることが期待されるが、自律航行機能を装備せず、遠隔地から舵や推進器等の航行に関する動作指令を送信するような遠隔操縦による船舶も、操船を行う船員が乗船していないのであれば無人航行船に分類できる。

2.1.2 自動運航船・自律運航船・無人運航船

船舶運航を考えた場合、「設定された航路上を一定速度で障害物を避けながら航行する」という航行機能だけでなく、「栈橋・岸壁から離れる」、「加減速を行う」、「沖合で投錨して航海状態から停泊状態に移行する」、「沖合で揚錨して停泊状態から航海状態に移行する」、「栈橋・岸壁に停泊させる」という作業や旅客、貨物の積込、荷下しという作業も行われている。海運会社の業務として考えると、船上作業だけで完結するわけではなく陸上設備との連携を図るとともに、単に一隻の運航を考えるのではなく複数の船舶運航との協調を図る必要がある。そこで本稿では、これらの業務全体で船舶運航が実現されている考え、これらの業務全体を行うシステムとして「運航」と呼ぶこととする。その運航を行う際に使用する船舶が、自動航行船、自律航行船、無人航行船である場合を、それぞれ「自動運航船」、「自律運航船」、「無人運航船」と呼ぶ。先に述べたように自律航行船、無人航行船は自動航行船の一種であるため、自律運航船、無人運航船も自動運航船の一種である。

2.1.3 MASS

日本国内でも用語の定義が確定していないことと同様に、海外においてもMaritime Autonomous Surface Ships (MASS) の定義はまだ確定していない。しかしながら、MASSに関する国際会議に参加して発表されている内容を考えると、船用機器関連企業、通信関連企業、スタートアップ企業がそれぞれ自分たちの技術を船舶に適用した発表を行っている。Autonomousという言葉が使われていることからわかるように、自律機能を搭載した船舶を想定としているため、2.1.2節で定義した内容的には「自律運航船」が日本語訳としては一番近い。しか

しながら、まだ自律機能は開発途上であり、自律機能の一部を開発した自動制御装置の段階での実験が行われている現状を考えると「自動運航船」と呼ぶ方が適している。よって、本稿ではMASS=自動運航船として考える。

2.2 自動運航船のハードウェア構成

研究開発目標となる自動運航船のハードウェア構成を図で表すと、図1のようになる。

基本的には、複数の自律航行船、遠隔地において監視を行いながら状況に応じて指示を行う遠隔制御室（遠隔指令室）、自律航行船と遠隔制御室間で情報交換を行うための通信システムの3つで構成される。自律航行船を航行させる海域の状況や、気象海象状況を観測するための監視観測機器を港湾やブイ等に設置して情報共有することも有用であるため、監視観測機器とも連携できるシステム構成としておくことが望ましい。

安全に自動運航船を活用するためには、船舶単体で状況を認識、判断し、航行する機能の実装が必要であるため、使用される船舶は自律航行船であることが必要である。

また、遠隔制御室に関しては、運転手が乗車しないという意味で自動運転技術が先行している鉄道の例を考えても運行管理を行う総合指令室が存在するので、航行する船舶に対して陸上側から監視するとともに、適宜、遠隔地から指令を送信することができるシステムの整備が必要である。

自律航行船と遠隔制御室、監視観測機器の間では情報交換を行うため、この情報交換に使用する有線・無線通信環境の整備が必要である。

2.3 自動運航船開発の目的

国によって多少の温度差はあるが、自動運航船に関する研究開発を行う目的は以下の通りである。

2.3.1 船舶運航の安全性向上

自動車分野の話となるが、2021年11月以降の新型車には衝突被害軽減制動制御装置（自動ブレーキ）

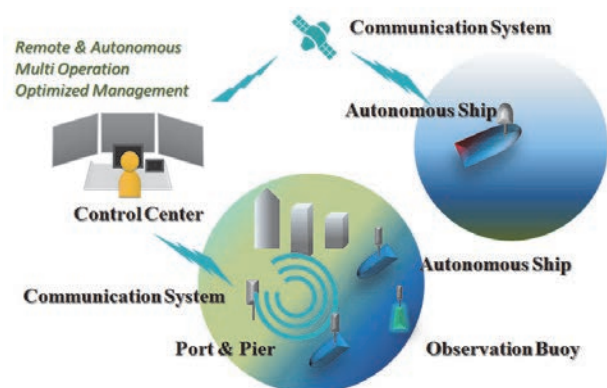


図1 自動運航船ハードウェア構成

が義務付けられる⁴⁾。これは、このような自動制御装置を搭載することによって事故の発生を抑制できるからである。人間は疲労等によって、どうしても見落とし、誤判断を起こしてしまう恐れがあるため、このようなミスによる事故を減らすために、人間の判断を補助する自動制御装置の開発が求められている。

2.3.2 船員の負担軽減

現時点においても、ヘディングコントロール機能を利用することによって、船員は目標針路を保持するために舵を操作するという業務負担を軽減するとともに、周囲を見張る業務に注力することができる環境となっている。さらに自律航行船が実現するような状況となれば、さらに見張り業務に対する負担も軽減することができる。

2.3.3 船員不足への対応

船員の業務は日本では、きつい、汚い、危険の3K職場の一つとして捉えられる場合もあるが、海外においてもDull, Dirty, Dangerousの3D jobと捉えられ、若者の就労希望者が少なくなっているとのことである。特に内航においては50歳以上の船員の割合が約46%を占めるため⁵⁾、近い将来、船員不足問題がより深刻になることが容易に想定できる。

2.3.4 環境負荷低減

自動運航船が直接、環境負荷低減につながるわけではないが、無人運航船が実現されれば船員の労働時間が長くなるという問題が発生しないため、船舶の航行速度を遅くしても良く、航行速度を遅くすることによって燃費を削減し、環境負荷低減に貢献することができる。

2.3.5 運航コスト削減

無人運航船が実現されれば、船員の雇用費用、乗船中の食費等の経費を削減することができる。さらに船舶内に船員が居住するためのスペースをなくして貨物を積載する量を増やすことができる。

2.3.6 技術的興味

特に自動車分野において、自動運転技術の研究開発が進んでいることから、船舶分野においても自動運転技術を利用する可能性があるのではないかと、という技術者の純粋な技術的興味から研究が進められている。

3. 国内外の自動運航船関連技術の開発例

3.1 国内外の関連技術開発動向概要

改めて言うまでもなく、自動運航船の開発を行うためには、数百億円という多額の投資が必要となる。

投資家からの資金を獲得するためにはやむを得ないこともあるが、CGによるプロモーションビデオを活用したコンセプトの発表は大々的に行うものの実際に船舶を建造しての実証実験までなかなか進まない、船体は建造できても自動運航を実現するためのソフトウェア開発が進んでいない、というプロジェクトが多数存在する。本稿では、少々古いものも含まれるが、実際に運航されている比較的大型の船舶を利用した、自律運航船を目指した自動運航船の実証実験に焦点を絞って代表的な事例を紹介することとする。

3.2 国外の関連技術開発例

3.2.1 Rolls-Royce

2018年12月、Rolls-RoyceとFinferriesはTurku, FINLANDにて、全長53.8mのカーフェリー「Falco」によるParainen – Nauvo間の完全自律航行、先の定義でいう自律運航船の範疇となるデモンストレーションを実施した。Falcoの自動着岸の様子を図2に示す。センサとAIを統合した障害物検知システムを搭載し、障害物検知システムからの情報に基づいて障害物回避を行うとともに、自動着岸を船員が一切操作しない完全自律操船制御にて行ったとのことである⁶⁾。システム開発にあたり、約400時間におよぶ海上テストを実施したとのことである。なお、2019年4月に本自動運航システム開発プロジェクト（SVAN（Safer Vessel with Autonomous Navigation）プロジェクト）を行っていたRolls-Royceの商船部門はKongsbergに買収され⁷⁾、Rolls-Royceで自動運航船の研究開発を行っていたメンバーはGroke Technologiesを設立しているため⁸⁾、その後のSVANプロジェクト関連の目立ったプレスリリースはない。

3.2.2 Kongsberg Maritime

2020年2月、Kongsberg MaritimeはBastø Fosen, KONGSBERG, the Norwegian Maritime Authority (NMA) と共同で、Bastø Fosenが運航

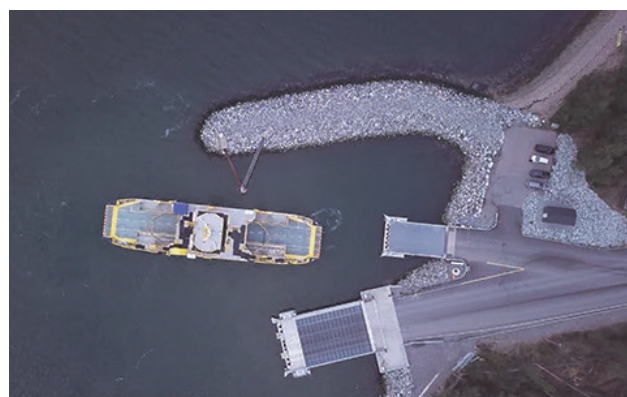


図2 「Falco」の自動着岸の様子⁶⁾

する全長約140mのカーフェリー「Bastø Fosen VI」に自動運航システムを搭載し、Horten-Moss間の通常運航されている状況での、出港から入港までの自動運航、本稿で定義する自動運航船の実験に成功した⁹⁾。図3にプレスリリースに掲載されている船橋の様子を示す。

3.2.3 Wärtsilä

2021年1月、Wärtsiläは、Cleveland, USのCrooked Riverにて、船齢42年、全長190mの船舶「American Courage」に自動運航システムWärtsilä SmartMove Suiteを搭載し、自動離着岸を含む運航を行っていることを発表した。American Courageの航行の様子を図4に示す。こちらも先の定義でいう自律運航船の範疇となる運航である。特筆すべき点は川幅が狭く回頭する場所がないため、前進後進それぞれの自動運航を実現していることである¹⁰⁾。

3.2.4 U.S. Department of Defense

2021年1月、U.S. Department of Defenseは、図5に示すような自律航行船で4,700マイル以上の航行に成功したと発表した。Gulf CoastからCalifornia



図5 「U.S. Dept. of Defense」の自律航行船¹¹⁾



図6 浚渫兼油回収船「海翔丸」



図3 「Bastø Fosen VI」の航海の様子⁹⁾



図4 「American Courage」の航海の様子¹⁰⁾

海岸までの航海中、およそ97%を自律航海にて実施し、数少ない乗船している船員によって操船が行われた場面の一つはパナマ運河通航時とのことである¹¹⁾。U.S. Dept. of Defenseからのプレスリリースではunmannedという言葉が使用されているが、船員が乗船して実験を行っているため、こちらも本稿での定義では自律航行船、自律運航船の範疇となる実験である。

3.3 国内の関連技術開発例

3.3.1 ジャパン マリンユナイテッド

現ジャパン マリンユナイテッドが開発し、国土交通省九州地方整備局関門航路事務所で運航されている図6に示す全長103mの浚渫兼油回収船「海翔丸」は、2004年4月より、接岸—陸上排送—離岸を自動化した「自動係船・自動陸上排送システム」の運用を行っている¹²⁾。予め設定された入港接岸航路を追従するコーストラッキング制御ならびに岸壁側に設置された自動係船システムのセットで、自動係船・自動陸上排送システムは実現されている^{13) 14)}。障害物検知回避機能に関しては搭載しておらず、船員が見張り作業を行っている環境下で使用する自動制御装置であり、船舶としては自律航行船ではなく自動航行船の範疇となるが、離着岸を自動化しているという意味では自動運航船といえる。

3.3.2 日本郵船

2019年9月、日本郵船は図7に示す全長約200mの大型自動車専用船「IRIS LEADER」に最適航行プログラムを搭載し、新沙（中国）から名古屋港、および名古屋港から横浜港の試験区間（湾内を除く日本沿岸海域）において、通常の乗組員による当直体制を維持したまま、昼夜を問わず断続的に最適航行プログラムによる航海を実施した¹⁵⁾。最適航行プログラムは避航操船を行うプログラムであり、本稿の定義でいう自律航行船の実験といえる。

3.3.3 三井E&S造船他4社

2021年5月、三井E&S造船、商船三井、東京海洋大学、三井造船昭島研究所、商船三井フェリーは、商船三井フェリーが保有する全長190mの大型カーフェリー「さんふらわあ しれとこ」を用いて、茨城県大洗港の実岸壁にて自動離着栈の実証試験を行い、大型カーフェリーとしては世界で初めて実岸壁での自動離着栈を成功させた¹⁶⁾。自動離着栈シミュレーションおよび実証実験の様子を図8に示す。プレスリリースには、避航動作に関する記載がなく自律機能を搭載しているか不明なため、本稿の定義でいう自動航行船の実験と考えられる。



図7 大型自動車専用船「IRIS LEADER」¹⁵⁾



図8 自動離着栈シミュレーションおよび実証実験の様子¹⁶⁾

4. 自動運航船実現に向けた課題

4.1 自動運航船実現に向けた課題概要

船舶といっても、全長数mのミニボートから、数百mとなる大型船まで存在する。大きさだけでなく、プレジャーボート、漁船、フェリー、貨物船、タンカー、自動車運搬船等、形状も大きく異なる船舶が多数存在する。そのため操船するための操舵室の場所や高さ、推進器の数や応答性、周辺環境の情報を得るために搭載されている機器類は、船舶によって全く異なる。さらに、一航海といっても、航路によって航海日数は異なり、航海中に要求される作業も大きく異なる。一方で、自動運航船の実現に向けた研究開発に取り組む大学、研究機関、企業は世界的に見ても非常に限られており、それぞれが自身に関係の深い船舶を対象に研究開発を進めているため、船舶業界全体としてうまく連携して研究開発が進められているとは言えない状況である。

そこで本稿では、著者の知る範囲内で、自動運航船に求められる機能、利用海域、船舶サイズ等の違いによる検討課題の整理を行う。

4.2 自動運航船に求められる機能

2.1.2節で述べたように、自動運航船を実現するために、まずは「設定された航路上を一定速度で障害物を避けながら航行する」、「栈橋・岸壁から離れる」、「加減速を行う」、「沖合で投錨して航海状態から停泊状態に移行する」、「沖合で揚錨して停泊状態から航海状態に移行する」、「栈橋・岸壁に停泊させる」という機能の実現が必要である。

3章で述べたように離着岸（栈）機能に関しては、カーフェリーや陸上側設備との連携によって、実現されている。錨泊対応に関しては、著者の調査能力不足のせいだと思われるが、研究開発例を見つけることができなかった。

障害物を避けながら航行するという技術に関しては、まずは障害物を検知する機能の実現が必要である。検知する機能には、単に船舶を検知するだけでなく、運転不自由船、操縦性能制限船等を検知することや、漁網やブイ、漂流物、航路浮標を検知することが求められる。そのうえで、見合い関係や航行状況による優先順位の違いを判断して、避航方法を決定する、という判断能力も求められる。障害物の検知に関しては、人工知能（AI）を活用したシステムの開発が世界各国で行われており、日本においても2019年6月に日本船舶技術研究協会が「海の画像認識システム構築研究委員会」を発足させ、海における障害物検知を行うAIの開発に活用できる画像ビッグデータの収集・整備に向けた活動を行って

いる。本委員会の活動期間は2021年度までの3年間と予定されており、海の画像ビッグデータと教師データの整備は「協調領域」として業界共同で取り組み、AI技術やアプリ開発はシステム会社等が「競争領域」として実施することを考えて委員会は設立されている。本委員会はフェーズⅠおよびフェーズⅡの二段階で実施され、フェーズⅠでは、画像データの仕様の決定及び教師データの試作を2019年度内に実施し、2020年度からはフェーズⅡに移行し画像データの収集、教師データの製作、教師データを含む画像ビッグデータを二年間で実施する予定となっている¹⁷⁾。

4.3 利用海域による違い¹⁸⁾

公園やテーマパーク内の閉鎖された水域であれば、水域内で運航される船舶および航路の状況をほぼ完全に把握することができる。この場合、不意の落水者等があったとしても、船舶に搭載したカメラ等による見張りだけでなく、水域周辺に別途、監視カメラ等を設置して航路全体を監視しておくことにより発見しやすい。回避すべき障害物か、水鳥など回避しなくても良い障害物かの判断は、現状では人間にゆだねる必要があると考えられるが、将来的にはAI等による自動検知が可能になると期待される。障害物を発見した場合には、障害物に衝突する前に停船さえできれば、最低限の障害物回避機能を備えているといえる。そのうえ、閉鎖水域であれば航続距離も短く必要となる推進システムの稼働時間も短く考えられる。稼働時間が短ければメンテナンスは、別途、機会を設けて行えばよく、通常は単純に航行するために必要な制御だけを行えばよいので自動化はしやすい。離着岸に関しても閉鎖水域であれば自動運航船に適した棧橋を整備することによって操船制御を容易にすることができる。

河川や運河を横断するような見通しのある数百m程度のごく短距離の航路を運航する場合には、閉鎖水域の場合と同様に監視カメラ等を設置し、航路全体を監視することは比較的容易である。推進システムに求められる機能に関しても閉鎖水域と同様で良いと考えられる。閉鎖水域との違いは、閉鎖水域は他の船舶等が航路内に侵入してくることを想定しなくても良いが、閉鎖水域でない場所では他船等が航路に侵入してくる可能性を無視することができないことである。このため、航路内に侵入してくる他船を見つけ、動向を把握し、避けて航行するというような、より高度な障害物検知機能および障害物回避機能が要求される。また、環境によっては潮汐や流れの影響も考慮しなければならないため、このような観点からも、より高度な自律航行機能が必要とな

る。

河川や運河内等、直接的な見通しはないが、決められた航路を航行するような場合、ごく短距離の航路での状況に加えて、さらに検知すべき障害物が増えることとなる。推進システムに関しても、複数の場所で停船するとはいえ航海時間が長くなるため、より信頼性の高い推進システムが要求される。

港湾内を航行するような航路の場合、河川等の航路の場合よりも、大きさの異なる船舶が多数航行し、さらに他の船舶の進行方向も様々となり、漁網等の漁具類の検知も要求され、障害物検知機能の向上が必要となる。水域が広くなり波の大きさも大きくなるため、気象状況の把握ならびに気象状況に対応した操船が要求されるようになる。また、タグボートやパイロットボート等の自動運航化も考えられるが、この場合は単に自船の操船だけでなく、自船が操船補助を行おうとしている他船の動きも考慮しなければならないため、更なる操船制御の高度化が求められる。

ある港湾から出港し、数時間から数日の航海の後、他の港湾に入港するというような航路の場合、操船面に関しては、港湾内を自律航行できるレベルの操船システムとなっていれば、同じ操船システムを利用すれば良いと考えられる。推進システムに関しては、完全無人で数日間運用可能なシステムとなるよう信頼性の向上、メンテナンスフリーな推進システムが求められる。

大洋航海の場合、航海日数は数週間となるが、このような航海の場合、単に物資を輸送するための操船を行うだけでなく、船舶に対する各種メンテナンス作業も行われている。メンテナンス作業を航海中に行うことは、入渠時の作業を削減することにつながり、結果として船舶の稼働時間を長くすることにつながっている。このメンテナンス作業を自動化することは非常に困難であるため、操船に関する部分は自動化することが出来ても、メンテナンス部分に関しては人手に頼ることが続くと考えられる。

4.4 船舶サイズによる違い¹⁸⁾

全長3m未満、出力1.5kW未満の小型船舶の場合、船舶安全法に基づく検査が不要であり、船舶職員及び小型船舶操縦者法上、操縦免許証をもつ操縦者が乗船して操船する必要があるため、実験等がしやすい船舶といえる。しかし、海上衝突予防法の観点から考えると、実験が許可されているわけではないので注意が必要である。また、出力1.5kW未満では、出力が小さいため利用できる船舶の大きさ、水域が限られ、船舶の操縦性能も制限されることから、実験結果の評価、他所への展開可能性に関しては注意

が必要である。

総トン数20トン未満の小型船舶は、運動性能が良く小回りが利く半面、波などによる影響も大きく受ける船舶である。人間が操船を行っている場合、他船による引き波を見つけると、自船の動揺が少なくなるよう波に向かう船首方向を調整するなど、マクロな視点では直線的に航行している状況でも、ミクロな視点では細かな操船を行っている。単に設定した航路を追従するだけでなく、このような細かな操船を行う機能の実現が必要である。また外乱の影響で、瞬間的に船首方位が変動しているように計測されたとしても、外乱の影響がなくなると元に戻るということが発生するため、船体の運動性能に応じた計測した値を処理する必要がある。

総トン数20トンを超える船舶に関しては、船舶の大きさによってさらに細かく分類する名称はないが、全長20m程度の船舶から数百mとなる船舶まで存在する。さらにタンカーなど、空荷と満載の場合で喫水が10m以上も変化してしまう、自動車運搬船は水上構造物の大きさが非常に大きいため風等の影響を非常に受ける等、運動性能が大きく変化するため、同一船舶でも状況に適した自動制御を行うべく制御系を設計する必要がある。さらに運動性能が異なるということは障害物を発見してから回避するまでに必要となる距離も異なってくることから、各種センサによって障害物を発見することが要求される距離も変化し、センサに要求される性能も異なる。推進器に関しても、小さな船舶ではプロペラの正転逆転を比較的簡単に切り替えることができるため正転逆転を切り替えることを前提とした操船が可能となるが、全長が数百mとなるような船舶ではプロペラの回転方向を変更して操船を行うようなことは現実的ではない。

4.5 陸上側設備との連携

すべての操船作業を船舶側だけで行おうとすると、どうしても問題が複雑となる。例えば、係船作業に関しては、3.3.1節で紹介した海翔丸の運航で使用されている自動係船・自動陸上排送システムのようなものを用意できれば、船舶と陸上側での係船索の受け渡しというような作業をなくすることができる。また、船首船尾から乗下船を行うカーフェリーのような着岸方法が可能であれば、船舶を岸壁に横付けする場合と比較して容易に着岸制御を行うことができる。

遠隔制御室の設備に関しても、船舶の運転状態や海域情報の全てを航行中の船舶から得るとなると、無線通信網に頼らざるを得ないため、送受信できる情報量、通信速度はどうしても制限されてしまう。

しかし、航行水域によっては陸上側にカメラ等を設置することによって有線通信網も有効に活用できるだけでなく、カメラの設置場所を適切に選定することによって水域全体を俯瞰した情報が得られるため、各船舶にカメラを設置するよりも、より効果的に水域を監視することができることも考えられる。特に有線通信網の活用は、通信容量、通信速度、通信費用の観点からも有益となることが期待できる。

つまり、船舶運航に関して船舶側だけで全ての問題を解決しようとするのではなく、陸上側設備を有効に活用することによって解決すべき問題が簡単になり、費用も安くすることができる可能性があるため、陸上側設備の開発状況も把握し、積極的に利用する意識も必要であると考ええる。

4.6 法制度整備・国際標準化

先日、国際海事機関（IMO）海上安全委員会 第103回会合（MSC 103）が終了し、2018年より行われていた自動運航船が既存規制体系に及ぼす影響を分析するための論点整理が完了した。海事関連条約等の一部については自動化レベルに応じた条約改正や解釈整理が必要との結論になった。その中で、早期導入が期待される「船員の意思決定をサポートする自動化システムを搭載する自動運航船」については、ほとんどの条約改正や解釈が不要との結論になり、今後の優先検討事項として以下の事項が合意されたとのことである¹⁹⁾。

- 自動運航船の関係基準作成に係る作業計画策定
- 自動運航船の定義と自動化レベルの見直し
- 自動運航に関する用語の定義の策定
- 自動運航船固有の優先課題への対応
- （自動運航船における「船長」、「遠隔支援センター」等の基準上の位置づけ等）
- 自動運航システムの適用等に関するガイドライン策定

今後、より具体的に開発した技術の社会実装に向けたルール形成活動が活発化すると考えられるが、我が国海事産業の国際競争力強化のためには積極的にルール形成活動に参加していくことが必要である。そのうえで、開発された技術に対するルール形成だけでなく、開発された技術を利用する運用管理技術者、具体的には自動運航船に乗船する船員や、遠隔制御室にて運航管理を行う人員に関する資格、トレーニング法に関する検討、法制度整備も必要であると考えられる。

5. おわりに

本稿では著者が把握している自動運航船の実用化に向けた最新動向と、著者自身が自動運航船の実用化に向けた研究開発を行っている中で考えている課題を述べた。自動運航船の研究開発に関して、海外から非常に積極的に発信されているため、海外企業の技術が進んでいるように感じている方も多いかと思うが、詳細に確認すると技術的には日本国内で研究開発されている技術も大きな差はない。むしろ、一部の問題だけに焦点を絞って開発されていることも多いため、現状のCOLREG条約等を満たしていないような技術も散見される。自動運航船が実用化されるとしても、全ての船舶が一斉に自動運航船になるわけではないので、既存の船舶との共存が求められる。つまり、現状の各種条約を確認し準拠した技術開発が必要であり、日本から発信する技術に関してはしっかりと条約に準拠した技術が発信されていくことを期待したい。そのうえで、近年は日本国内においても、様々な実証実験が行われているため、これらの実証実験結果を発信するとともに、実験結果に基づいて自動運航船の安全運航に必要なルール、ガイドライン等に関して積極的に発信し、日本で開発された技術が自動運航船の標準技術となることを期待している。

参考文献

- 1) 国土交通省 : https://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji06_hh_000233.html
- 2) 日本船舶技術研究協会 : <https://www.jstra.jp/conference/docs/MEGURI2040.pdf>
- 3) ISO : <https://www.iso.org/standard/77186.html>
- 4) 国土交通省 : https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha08_hh_003618.html
- 5) 日本海事広報協会 : 日本の海運 SHIPPING NOW 2020-2021, 2021
- 6) Rolls-Royce : <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2018/03-12-2018-rr-and-finferries-demonstrate-worlds-first-fully-autonomous-ferry.aspx>
- 7) Kongsberg : <https://www.kongsberg.com/maritime/about-us/news-and-media/news-archive/2019/kongsberg-completes-rolls-royce-commercial-marine-acquisition/>
- 8) Grok Technologies : <https://www.groke-tech.com/>
- 9) Kongsberg : <https://www.kongsberg.com/maritime/about-us/news-and-media/news-archive/2020/first-adaptive-transit-on-bastofosen-vi/>
- 10) Sailing straight and true on Crooked River, <https://www.wartsila.com/insights/article/sailing-straight-and-true-on-crooked-river>
- 11) DOD's Autonomous Vessel Sails Through Transit Test, Participates in Exercise Dawn Blitz, <https://www.defense.gov/Explore/News/Article/Article/2471165/dods-autonomous-vessel-sails-through-transit-test-participates-in-exercise-dawn/>
- 12) 国土交通省九州地方整備局関門航路事務所 : <https://www.pa.qsr.mlit.go.jp/kanmon/3syozo-kusenpaku/index1-2.html>
- 13) 田丸人意, 萩原秀樹, 吉田秀樹, 田崎哲夫, 宮部宏彰 : 海翔丸の自動着岸システムの開発とその性能評価, 日本航海学会論文集, 113巻 (2005), pp. 157-164.
- 14) ジャパン マリンユナイテッド : <https://www.jmuc.co.jp/products/unmanned/>
- 15) 日本郵船 : https://www.nyk.com/news/2019/20190930_01.html
- 16) 三井E&S造船 : https://www.mes.co.jp/press/2021/0521_001612.html
- 17) 清水悦郎 : 海の画像ビジュアルデータ構築に向けて, 会誌 船長, 第137号 (2020), pp. 2-14
- 18) 清水悦郎 : 船舶における自動運転実現に向けた技術開発の現状と課題, 日本機械学会誌, 第124巻, 第1228号 (2021), pp. 29-31
- 19) 国土交通省 : <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001404871.pdf>

安全航行に向けた衝突リスク判断方式の研究開発と検証

桑原 悟*, 西村 遥*, 中川 和也**, 芳永 真**, 井関 修一***,
吉田 亮***, 箱山 忠重****, 沓名 弘二*****, 中村 純*****

1. はじめに

近年、ICT技術の革新が急速に進み、自動車産業をはじめとした様々な業界でビックデータを活用した新たな技術研究開発が積極的に進められている。海運産業においても、欧州をはじめ、国際的に産官学によるビックデータを活用した新たな技術研究開発が進められており、その変革の影響が海運ビジネスへも波及している。

我が国においても、この国際的な流れに沿って、新たな海運ビジネスを視野に置き、我が国の海運産業の国際競争力強化につなげるべく、今後の発展に重要となる船舶ビッグデータを活用した分野の技術研究開発に産学官が総力を挙げて取り組んでいる。

その取り組みの一環として、国土交通省では、2016年（平成28年）を「生産性革命元年」と位置づけ、海事局においては「海事生産性革命（i-Shipping）」を推進している。i-Shippingの運航分野では、船舶・船用機器のインターネット化（IoT）、ビックデータ解析などを活用した先進的な機器やシステムの研究開発を支援し、船舶運航の安全性や効率性の向上を図る目的で、2017年度までに船体構造のモニタリング技術の開発など、計8件の技術開発事業に対して補助が実施された。

ここでは、その採択事業（先進安全船舶技術研究開発補助事業）の一つである「船舶の衝突リスク判断と自律操船に関する研究（分野：動揺・操船シミュレータによる運航支援）」に参画する、日本郵船株式会社・株式会社MTI・株式会社日本海洋科学・古野電気株式会社・日本無線株式会社・東京計器株式会社の取り組みについて紹介する。

本研究に取り組む意義は、近年の船舶の大型化・高速化、船舶交通の輻輳化や乗組員の少人数化に伴う航行における安全の確保と航海士の作業負担の軽減にある。これらの目的を達成するため、本事業では「Ⅰ．衝突リスク判断方式の研究開発」、「Ⅱ．自律操船に関する研究開発」、「Ⅲ．コンピュータビジ

ョンを利用した航海支援ツール」の3項目の研究を行った。本稿では「Ⅰ．衝突リスク判断方式の研究開発」に関して紹介する。

2. 衝突リスク判断方式の研究開発経緯

船舶事故の原因の約半数が航海士の見張り不十分によるものであることが事故後の調査で判明しており、避航において衝突危険船を的確に把握することは最も重要な課題であるといえる。

自他船間の衝突危険度指標として、船舶用レーダーに搭載されている自動衝突予防援助装置では最接近点（CPA）を計算した上で、最接近距離（DCPA）と最接近時間（TCPA）を用いた危険度指標を操船者に提示する形が一般的である。（図1）

最接近点 : CPA (Closest Point of Approach)

最接近距離 : DCPA (Distance of CPA)

最接近時間 : TCPA (Time to CPA)

*「このまま進むと、どのくらい近づくか」
*相対運動で考える

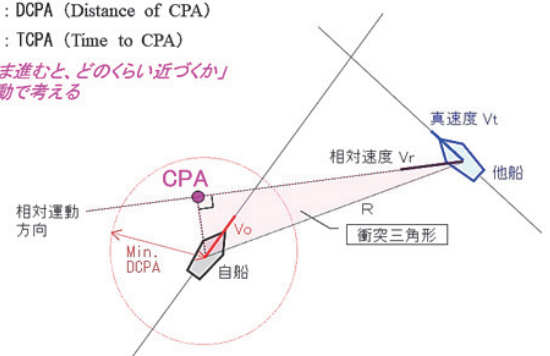


図1 接近点ベースの情報

しかし、DCPA/TCPAを用いた危険度指標では自船と他船の見合い関係などが考慮されておらず、東京湾やシンガポール海峡などの輻輳海域においてはDCPA/TCPAの設定値のみで危険と判断される船舶が多くアラートが頻発するため、以下の問題が発生する。

- ・ 衝突リスクに応じた船舶の監視が困難
- ・ 目視情報とDCPA/CPA情報の照合が困難
- ・ 操船者のアラートに対する注意力低下

* 株式会社日本海洋科学

** 古野電気株式会社

*** 日本無線株式会社

**** 東京計器株式会社

***** 株式会社MTI

一方、過去の研究の中には自船と他船が衝突する可能性がある領域（衝突危険領域）を図2のように表示する方法として、PAD（Predicted Area of Danger）やDAC（Dangerous Area of Collision）または相手船による妨害ゾーンを示すOZT（Obstacle zone by target）などが存在する。

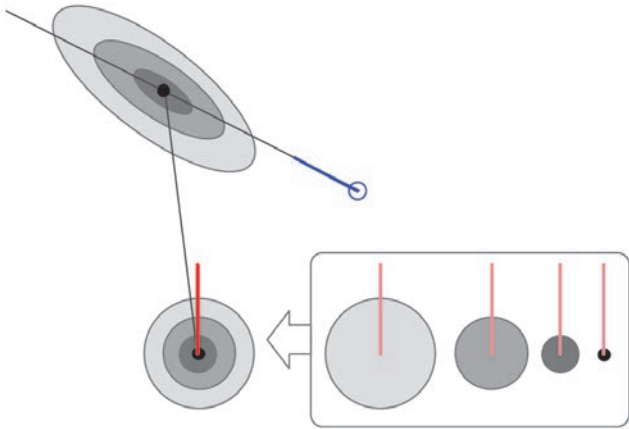


図2 衝突危険領域のイメージ図

衝突危険領域表示は操船者に対して衝突する可能性がある領域を表示することで、操船者が衝突の危険性を点ではなく面として判断することが可能であり、避航計画の作成において大きな助けとなる。一方、東京湾口やシンガポール海峡のような輻輳海域では、自船の針路上に衝突危険領域で埋め尽くされるため、避航計画作成の参考として利用することが難しいという課題があった。

前記の課題を抱える中で衝突事故を削減していくためには、人間の衝突危険認識に対する特徴を把握し、その特徴を適切に機械の機能に反映させ、人間が適切に使用することが重要になる。衝突危険認識に関して機械と人間の特徴、対比を以下の図にまとめる。

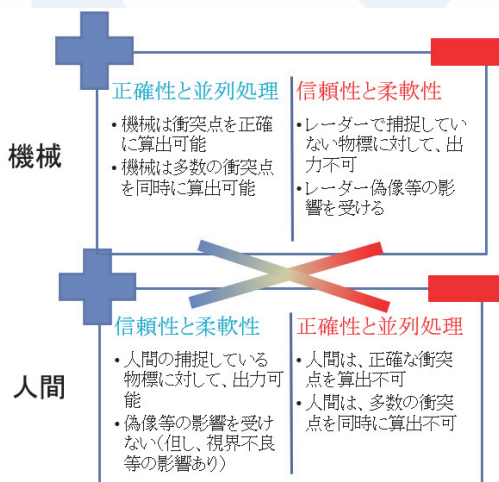


図3 衝突危険認識に関して機械と人間の対比表

本研究では、前記課題の解決を目的として、自船—他船間の衝突危険リスクを操船者の感覚に合った形で指標化するとともに、この指標に基づいた衝突有無や避航方針を直感的に判断可能な形で知らせる手段を確立する。また自船と他船が衝突する可能性がある領域の表示方法に関して、より操船者が持つ衝突危険領域に近づけるとともに、前記課題である輻輳海域における衝突危険領域が埋め尽くされる点に関して本研究で改善を進めた。

本研究においては、5年間で50名を超える日本郵船の現役船長・航海士及び20名を超える東京海洋大学・神戸大学の学生に被験者になっていただき、衝突危険度指標開発のためのデータ取り、開発機器の有効性確認を進めてきた。以下の項では衝突危険度指標・機器開発を担当した古野電気・日本無線・東京計器の具体的研究・開発内容を述べるとともに、開発機器の効果検証実験を主導した日本海洋科学による分析を記載する。

3. 各航海機器メーカーの技術開発

3.1 古野電気株式会社による技術開発

船舶の安全運航においては、自船周囲に存在する衝突リスクを見落とすことなく適切なタイミングで操船者が気づき操船判断を行うことが重要である。しかしながら、実際の輻輳海域の航行では操船者が処理・判断すべき船舶数が多く見落としや気づき遅れが発生してしまう恐れがある。また、多数の船舶が関係する見合い関係の状況においては、衝突リスクに対する気づきだけでなく、迅速な状況把握ができなくては適切な回避行動を取ることが難しい。これらの課題を解決するために構築した衝突危険指標及び衝突危険表示について紹介する。

3.1.1 衝突危険指標の構築

操船者の衝突リスク感覚に基づいた衝突危険指標の構築は、以下の3段階のアプローチで実施した。第一に「熟練操船者のリスク感覚データ化」、第二に「リスク感覚データの分析」、第三に「衝突危険警報アルゴリズム化」であり、以下に述べる。

3.1.1.1 熟練操船者のリスク感覚データ化

熟練操船者は輻輳海域においても適切に状況把握を行い、安全に船舶を航行することができる。一方で、人間の短期記憶可能な情報は多くとも4・5個程度¹⁾とされている。この限られた能力の中で安全航行を実現する海技スキルの主要素には、適切な衝突リスク感覚に基づく優先度付けがあると考えられる。見張り支援を目的とする衝突危険警報においても、輻輳海域で適切な優先度付けをすることなく

操船者に提示すると、情報過多により操船者を混乱させてしまうことになる。そこで、本研究では熟練操船者の衝突リスク感覚をデータ化し分析することにより、適切な優先度を示す衝突危険警報アルゴリズムの構築を目指して開発を行った。

まず、幅員海域において熟練操船者が「どのタイミングで」、「どの船舶に注目し」、「どの程度のリスクとして認識しているのか」をデータ化した。データ化では、タブレット型のリスク感覚データ取得装置（図4）を新規開発した。

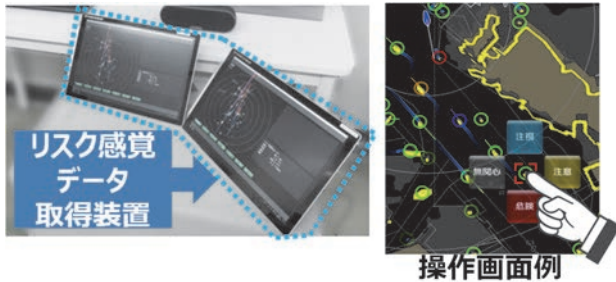


図4 開発したリスク感覚データ取得装置

リスク感覚データ取得装置では、自船周囲の船舶に対して操船者が感じる衝突リスクを4段階のレベルで、リスクレベルが変化したタイミングで入力できる。リスクレベルの定義を以下に示す。

- ・ 安全（無関心）：対象船舶にリスクを感じない
- ・ 注視：対象船舶の動静をたまに監視しておく
- ・ 注意：対象船舶の動静を常時監視しておく
- ・ 危険：対象船舶を回避する行動を取る

リスクレベルは、初期状態の船舶では「安全」に設定しており、常に前記4段階のうちのどれかのリスクレベルが対象船舶に設定される。

開発したリスク感覚データ取得装置を用いて、操船シミュレータ環境（日本海洋科学：船橋からの目視映像、及び航海機器類に再現）において様々な幅員海域航行シナリオでの熟練操船者のリスク感覚データ取得実験を実施した（図5）。



操船シミュレータ(株)日本海洋科学)

図5 熟練操船者のリスク感覚取得実験

実験に協力いただいた操船者について表1に示す。各年度とも関門海峡・紀伊水道・大島沖といった幅員海域シナリオを複数用い、合計20名分（船長：16名、一航士：3名、二航士：1名）のリスク感覚データを取得した。

表1 リスク感覚取得実験協力海技者

	2016年度	2017年度	2018年度	合計
船長	6 [人]	6 [人]	4 [人]	16 [人]
一航士	1 [人]	—	2 [人]	3 [人]
二航士	1 [人]	—	—	1 [人]

3.1.1.2 リスク感覚データの分析

熟練操船者の衝突リスク感覚をアルゴリズム化するために実施したリスク感覚データ分析について述べる。分析には、船舶周囲の船首尾方向と左右舷方向の航過距離と最接近時間（TCPA）で定義される衝突危険度の算定モデル²⁾（バンパーモデル）を用い、図6のように船首尾方向・左右舷方向の距離（a, b, c）及びTCPAに対する余裕時間（重み） W_{tcpa} を可変パラメータとし、個々の操船者の衝突リスク感覚を最も良く表すモデル形状を比較した。

ここで、熟練海技者のリスク感覚が注意以上のとき、バンパーモデルによる判断結果も注意以上のときをTP（True-Positive）、リスク感覚が注視以下のとき、バンパーモデルによる判断結果も注視以下のときをTN（True-Negative）、リスク感覚が注意以上のとき、バンパーモデルによる判断結果が注視以下のときをFN（False-Negative）、リスク感覚が注視以下のとき、バンパーモデルによる判断結果が注意以上のときをFP（False-Positive）とし、警報要求充足率及び非警報要求充足率を式(1)、(2)のように定義する。

$$\text{警報要求充足率} = \frac{TP}{(TP+FN)}, \quad (1)$$

$$\text{非警報要求充足率} = \frac{TN}{(TN+FP)}. \quad (2)$$



図6 バンパーモデルと調整パラメータ

図6に示すバンパーモデルの調整パラメータを変化させながら式(1)、(2)で求められる警報要求充足率・非警報要求充足率をプロットすることでROC解析 (Receiver Operating Characteristic analysis) を行った。今回は可変パラメータが2つ以上あるため、図7のように警報要求充足率/非警報要求充足率の2次元平面上にプロットされる点のうち、原点から最も外側の点群 (最外点) を抽出し、ROC曲線とした。ROC曲線は、バンパーモデルが熟練操船者の衝突リスク感覚を最も良く表現するように調整したパラメータ群による結果を抽出したものである。

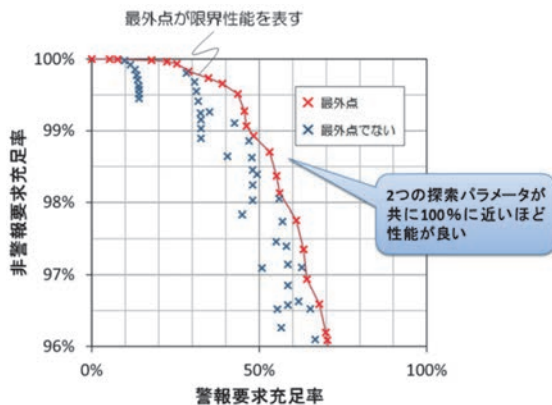


図7 ROC曲線

ここで、非警報要求充足率が98%以上の範囲において、警報要求充足率が最も高い時の操船者ごとのバンパー形状を図8に示す。図8には、主に操船する船種の異なる4名の船長のバンパー形状を例示している。この結果から、操船者の衝突リスク感覚には個々、もしくは船種による違いが多く含まれていることがわかる。特に、自船後方に対するリスクにおいてばらつきが大きいことがわかる。また、バンパー領域全体の大きさに関しても、D船長のように全体として小さく、 W_{tcpa} も短い操船者もいるといった結果が得られた。

この結果から、個々の感覚や船種などによる多様な操船者の衝突リスク感覚を反映したアルゴリズム及び操船者の衝突リスク感覚のばらつきを考慮し、ユーザー調整可能なアルゴリズムとして衝突危険指標を構築する必要があることがわかった。

3.1.1.3 衝突危険警報アルゴリズム

前節で述べたリスク感覚データの分析だけでなく、多角的な分析結果から新たな衝突危険指標を策定し、他船に対する衝突リスクに応じて警報発報するアルゴリズムを構築した。また、構築したアルゴリズムでは調整パラメータの高度化により、前節で述べたような操船者のリスク感覚のばらつきにも対応できる警報アルゴリズムとした。図9に、構築したアルゴリズムを用いた警報システムの表示画面例を示す。システムでは、OZT表示と色・音によるリスクレベルの提示によって警報機能を実現した。以下では、構築したアルゴリズムを用いたシミュレータ評価結果について紹介する。

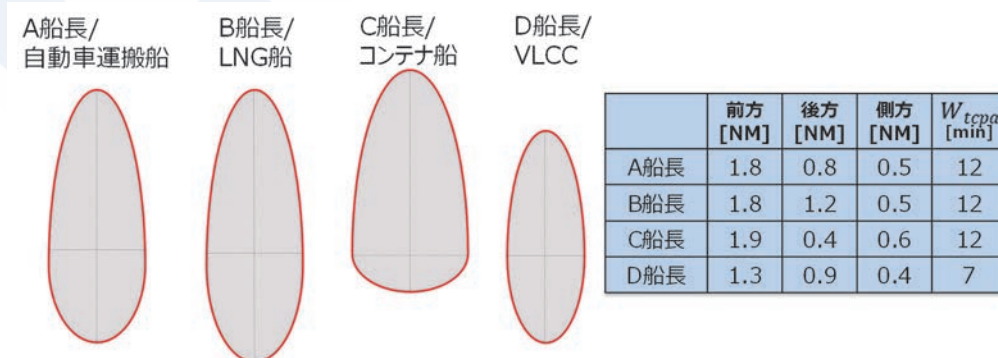


図8 操船者のリスク感覚 (バンパーモデルによる可視化)

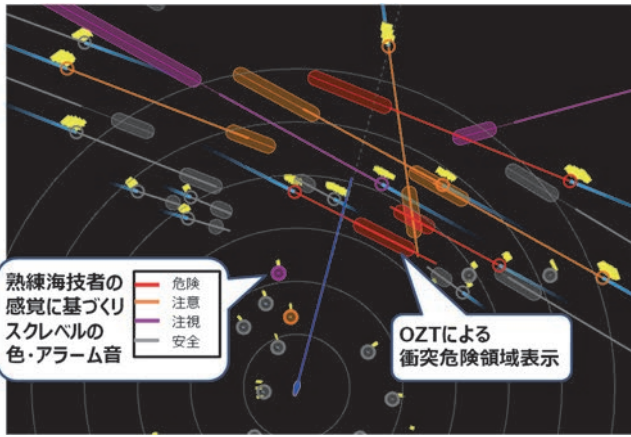


図9 リスクレベルとOZT表示による警報システム

表2に、輻輳海域航行シナリオを用いたシミュレータ試験において構築した警報システムを試用した被験者から聞き取り調査したコメントを示す。コメントは、警報機能に対するポジティブ／ネガティブで分類している。コメントのポジティブ意見から、構築した警報システムによって見逃し防止や他船挙動変化への気付きが得られる効果が確認できる。また、発報のタイミングについても良い評価が得られた。一方、ネガティブ意見では、輻輳海域での使用においては注意すべき船舶数が多くリスクレベルによる注意船舶の優先度の提示だけでは操船者が混乱する状況を完全に防ぐことはできていないことがわかった。

表2 衝突危険警報アルゴリズム評価コメント

Positive/ Negative	コメント内容
ポジティブ	- 今回のシナリオでは選択の余地がないほど可航域が制限されていた。警報があったとしても状況が変わるわけではないが、心の準備ができるので警報は必要。(A船長) - 急減速により危険となったターゲットへの気づきを得られた。(B船長) - CPA警報であればずっと警報が鳴り続けているシナリオだと思うが、新警報は適切な発報であった。(D一等航海士, F三等航海士) - 目視では見逃していた反航船の気づきになった。(G次三航士, H次三航士) - 他船変針の気づきになった。(I船長, J船長)

ネガティブ

- 危険／注意のターゲットが多すぎて認識能力を超える場面があった。(E一等航海士)
- 注視以上のターゲットの数が増えると分かりにくい。注視のリスクレベルはなくてもよいかもしれない。(D一等航海士)

3.1.2 衝突危険表示の構築

前節で示した衝突危険警報アルゴリズムの評価結果から、1隻ごとのリスクレベルの提示だけでは、輻輳海域における周囲状況把握の支援機能として弱点があることが示された。そこで、この弱点を補うための表示機能を構築した。

図9に示したシチュエーションにおいては、注意すべき船舶数が多く操船者の混乱に繋がった。図9のように、OZT表示色と対象船舶のリスクレベルを示す色を同一色で表示しているが、このような輻輳海域においては安全以外の船舶が同時に多数表示されてしまうため、どのようにこれらの複数船舶を避航するかを検討するには不向きな表示となっていた。

そこで、衝突危険表示を以下の改良を行った。

- ① OZT表示の幅（他船針路から垂直方向）について、相手船が自船船首方向の任意距離をかわす時の自船位置及び相手船が自船船尾方向の任意距離をかわす時の自船位置を頂点して、表示エリアを拡張する（図10）。

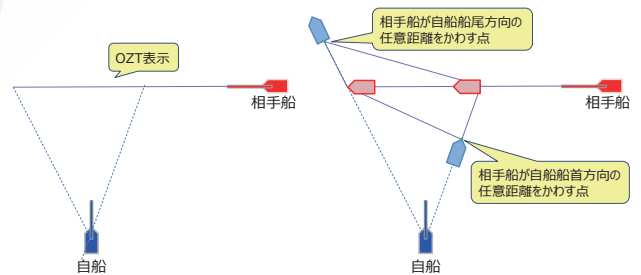


図10 表示エリアの拡張

- ② ①のエリア計算を、自船との接近を警戒する距離と自他船の船体長サイズの2つの距離設定で実行し、得られる2つのエリアをそれぞれ接近エリア・衝突エリア（図11）として表示する。

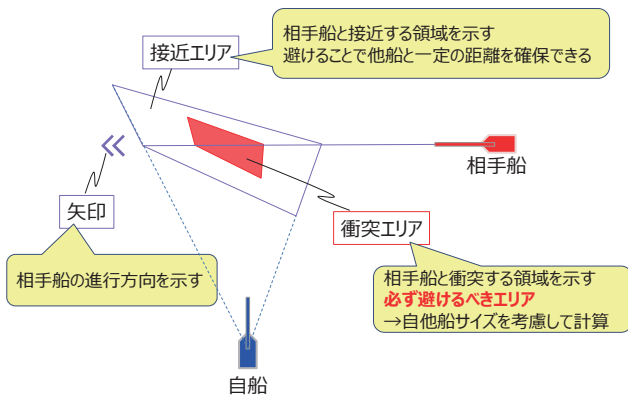


図11 接近エリア・衝突エリア表示

- ③ リスクレベルは、他船アイコン及び衝突エリアの色で表示する。

これらの改良では、相手船との衝突が発生するエリア（衝突エリア）と衝突はしないものの相手船と接近してしまうエリア（接近エリア）を別々に表示し、衝突リスクレベルを衝突エリア表示色で示すようにすることで、複数の船舶から発生する接近エリアを俯瞰的に考慮して航路選択することができるようにしている。また、個々の船舶の衝突リスクレベルは、比較的小さなエリアで表示される衝突エリアの表示色で示すことにより、衝突危険警報の個船に対する見逃し防止と避航判断を支援するようにしている。

構築した衝突危険表示の表示例を図12に示す。図9に示したOZT表示色で衝突リスクレベルを表現したものと比較して、表示エリアによって「航行不可に見える」領域が減少している。衝突リスクレベルの表示についても、個船に対する衝突リスクを十分に提示できている。また、図中に赤破線で示すように、複数の船舶によって発生した衝突危険表示を俯瞰するように見ることによって船舶の密集する領域を把握し易い表示となっていると考える。反対に、図中に黄破線で示すように、衝突危険表示が少ない領域についても把握し易くなっていると考えられる。これにより、個船に対する避航だけでなく、その先の将来遭遇するリスクに対しても航路選択に必要な情報を早期に提示することが可能となった。

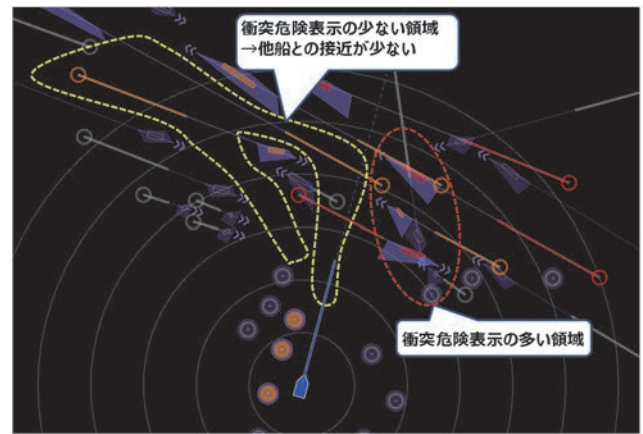


図12 構築した衝突危険表示

3.1.3 古野電気株式会社による取り組みまとめ

本節では、古野電気が構築した衝突危険指標・衝突危険表示について概要を紹介した。本技術は、現在数多くのシミュレータ試験によって高い操船判断支援効果が確認されており、船舶衝突事故の減少及び見張り業務の負荷軽減が期待される。今後、実船において操船者に評価していただく実証実験や、自動運航船安全設計ガイドラインなどへの適合を実施し、機能の有効性、実用性を向上させたいと、
“衝突警報機能及び避航支援表示機能”として実用化を目指す。

3.2 日本無線株式会社による技術開発

3.2.1 衝突危険指標

日本無線は「長澤の衝突危険度」²⁾をベースとしてDCPA/TCPAに代わる航海士のリスク感覚に合った衝突危険指標の検討を行った。長澤の衝突危険度は、操船者が安全と判断する他船との航過距離を図13に示す楕円形状の領域によって定義する。この楕円の大きさ（短径a、長径b）と船首／船尾方向及び右舷／左舷方向の距離は、自船と他船の全長、速力及び針路をパラメータとして使った関数として示される。この航過距離を確保できない場合は、操船者に心理的な負担が生じると考えられ、侵害度の大きさから危険度を求める。

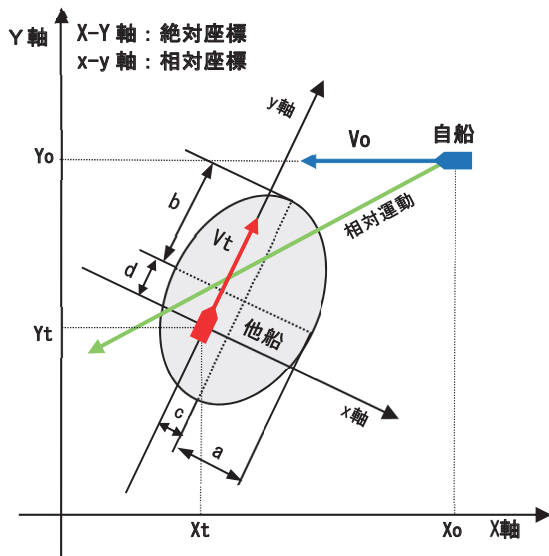


図13 安全航過距離の概念

a, b, c, d : 航過距離パラメータ

V_o : 自船速力 (m/sec)

V_t : 他船速力 (m/sec)

衝突危険指標 R は、図14に示すように他船を中心とする xy 座標軸と相対運動ベクトルの交点から右舷／左舷方向及び船首／船尾方向の危険度 R_x, R_y をそれぞれ求め、大きい値の方を危険度として採用する。また、時間的な余裕を評価するため、ある一定の余裕時間 ($Wtcpa$) に対する最接近時間 ($Tcpa$) までの比率を用いて重み付けを行う。

$$\text{衝突危険指標 } R = \text{Max}(R_x, R_y) \times \left(1 - \frac{Tcpa}{Wtcpa}\right) \geq 0$$

$Tcpa$: 最接近時間

$Wtcpa$: 余裕時間 (重み付け係数)

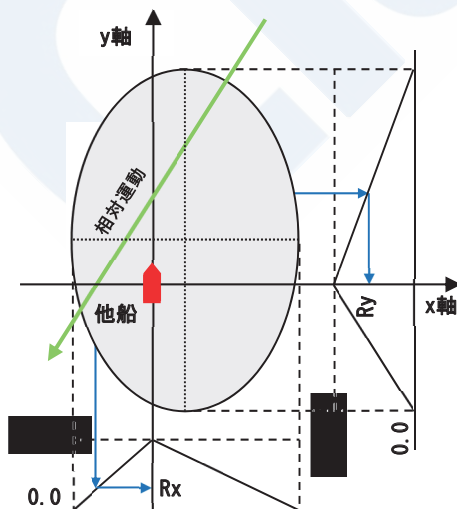


図14 衝突危険指標算定モデル

本指標をもとに操船シミュレータ試験で操船者から収集した衝突リスク判断のデータ及び試験後に実施した聞き取り調査の結果を用いて衝突危険指標を算出するパラメータの調整を行った。

衝突危険指標は0.0～1.0の数値で表現されるため(1.0が最も危険)、図15のように閾値を設け、以下の3段階のレベルで操船者に通知する。

- ・危険：すぐに避航が必要な船舶
- ・注意：直近の避航は必要ないが将来の避航対象として注意が必要な船舶
- ・安全：上記以外の船舶

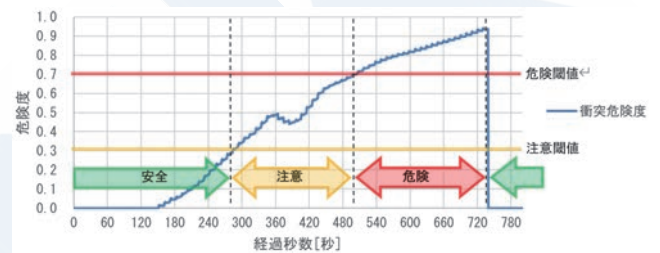


図15 閾値の概念

このように、他船に対して衝突危険指標で判定した結果を用い、危険または注意目標の警報を発報する。判定の結果は表3のように、AISターゲットのシンボル色で表現される。

表3 危険度判定の表示方法

危険度	識別番号	シンボル色	効果	表示例
危険	D+ 目標番号	赤色	点滅	
注意	W+ 目標番号	橙色	点滅	
安全	S+ 目標番号	緑色	なし	

衝突危険指標の効果を確認するため、試作機を開発した。指標を搭載する装置は、現行の航海機器において、衝突予防を支援する代表的な機器であるレーダーとした。操船シミュレータ試験では様々な見合い関係で接近する他船に対し、衝突危険指標で示される注意／危険の警報がDCPA/TCPAに比べて航海士が感じるリスク感覚に近い結果となっていることが確認できた。

今後、本衝突危険指標の実用化の検討が必要であ

るが、試作機に採用したレーダーではIMOのルールによりDCPA/TCPAのアラームが義務となっており、現状では衝突危険指標を搭載することは難しいと考えられる。そのため、当面の実用化にあたっては、ルールに縛られない装置に搭載することを検討する必要がある。今後、自動運航に向けてレーダーやAISに加えて、カメラなどのデータも統合した避航支援装置が考えられるため、そのような目標統合表示装置における実用化を検討していきたい。

3.2.2 衝突危険領域

衝突危険領域表示として、まずは東京海洋大学今津隼馬名誉教授考案のOZT (Obstacle Zone by Target) ³⁾を利用することを考えた。OZTは、他船により自船の航行が妨害される可能性のある針路を示すものであり、ここでは他船との距離が最小安全航過距離 r 以内になる領域のことを意味する。即ち他船の最接近距離 DCPAが次の条件を満たす時である。

$$DCPA \leq r$$

また、自船と他船との間で $DCPA = r$ となる自船針路を衝突針路 Co と定義し、衝突針路を求めるための方法を図16に示す。

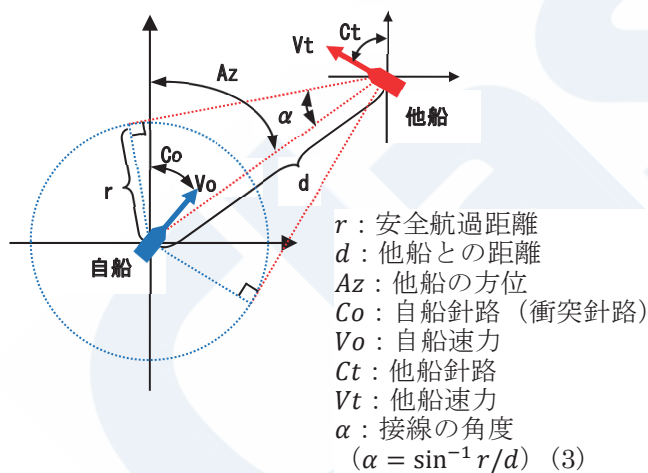


図16 衝突針路算出図

この時、前記変数において次の関係式が成立する。

$$\frac{\sin(Az \pm \alpha - Co)}{Vt} = \frac{\sin(Az \pm \alpha - Ct)}{Vo}$$

これより

$$Co = Az \pm \alpha - \sin^{-1} \left\{ \frac{Vt}{Vo} \sin(Az \pm \alpha - Ct) \right\} \quad (4)$$

として、 $DCPA = r$ となる衝突針路 Co を求める事ができ、図17に示すように $DCPA \leq r$ となる危険針路(OZT)は、(4)式で $+\alpha$ 、 $-\alpha$ とした時に得られた衝突針路 $Co_{+\alpha}$ と $Co_{-\alpha}$ に挟まれた範囲となる。

また、最も危険な針路が分かるように衝突点を求める。衝突点の針路は安全航過距離 $r = 0$ であることから、(3)式より $\alpha = 0$ となり、(4)式に代入する事により $Co_{\alpha=0}$ が得られる。 $(Co_{\alpha=0})$ は $Co_{+\alpha}$ と $Co_{-\alpha}$ に挟まれた値となる)

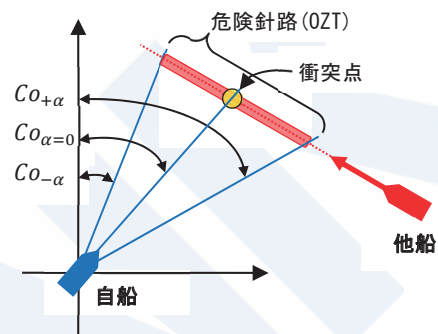


図17 危険針路 (OZT) と衝突点

操船者は、自船針路が危険針路 (OZT) に交わらないように操船する事により、他船と安全航過距離 r を確保して航行できる。

次に危険針路 (OZT) が自船の針路方向の指標であるのに対して、衝突危険領域を針路、距離方向の2次的に表示することを考えた。図18に示すような自船の前後方向と左右方向に頂点がある菱形の領域を安全航過領域とし、この領域に船舶が侵入する領域を計算したものである。各頂点までの距離 (a, b, c, d) は、航行する領域に合わせて変更可能としている。

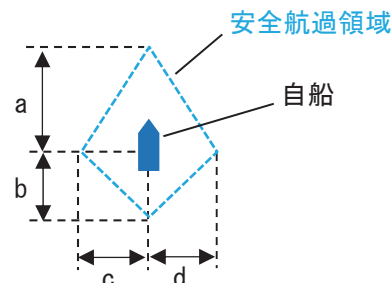


図18 安全航過領域

危険領域の計算は図19に示す通り、まず(4)式を用いて安全航過領域上の点と他船が衝突する点を求める。次に、この衝突点を安全航過領域分シフトして自船位置に変換する。この計算を安全航過領域上

の点すべてに対して実施する。これを自船の針路を変えて繰り返し実施し、自船の針路方向の点のみを抽出することで危険領域が作成できる。

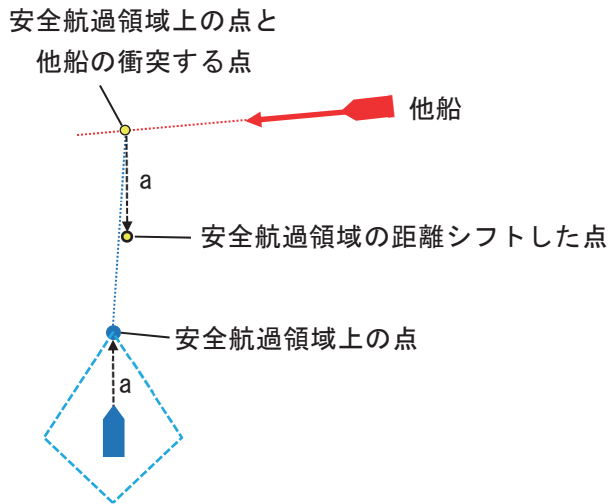


図19 危険領域の計算方法

危険領域の計算例を図20に示す。この例は、自船と他船の速度が同じで、対象船の針路が 225° の時の危険領域である。操船者は、自船針路が危険領域に侵入しないように操船する事により、他船との間に図18に示した安全航過領域を確保して航行できる。

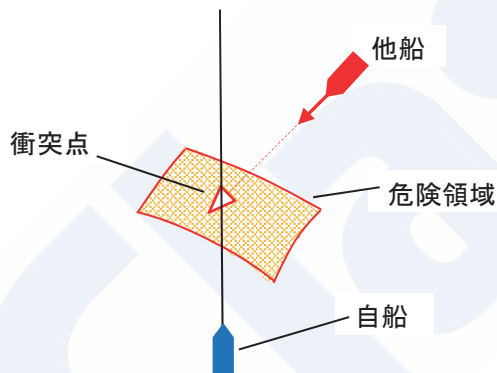


図20 危険領域計算例

図21は、自船が危険領域の頂点に接した時の他船と自船の位置関係を示している。危険針路では危険針路に向かって進んだ場合、どの針路をとると他船が安全航過距離内に入るかを示しているだけだったが、危険領域では針路だけでなくどこまで進むと安全航過領域内に侵入してしまうかが明確に分かる。これにより、操船者は安全に航行できる領域をより明確に認識できると考えられる。また、危険領域表示では避けるべき領域を面として表示しているため、危険針路と比較して航行できる経路が明確に見えるのも利点となると考えられる。

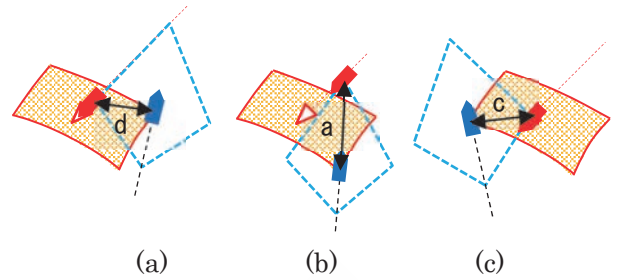


図21 危険領域の頂点での他船との距離

以上の内容から、危険針路（OZT）、危険領域及び衝突点が意味するところは以下になる。

【危険針路】

表示されている方位に進むと、他船と安全航過距離以内に近づく

【危険領域】

表示されている領域に侵入すると、他船が安全航過領域内に入る

【衝突点】

表示されている方位に進むと他船と衝突する

危険針路（OZT）、危険領域の表示方法を表4に示す。色は衝突危険指標による危険度判定の結果に応じて変えている。

表4 危険針路／領域の表示方法

危険度	色	危険針路	危険領域
危険	赤		
注意	橙		
安全	灰		

危険針路の表示では形状を矢印とすることで、他船の進行方向を示している。一方、危険領域の表示では領域の形状自体で方向を示すことが難しいため、衝突点の形状を三角形とし、この三角形の向きで船舶の進行方向を示すこととした。

実際のレーダー画面上に危険針路を表示した例を図22に、危険領域を表示した例を図23に示す。2つの図は同じ状況であり、図22で示されている危険針路は、図23では2次元の領域に拡張されている。これにより、危険領域では針路だけではなく、どこまで進行すると安全航過領域内に入るかを操船者が認識することができる。

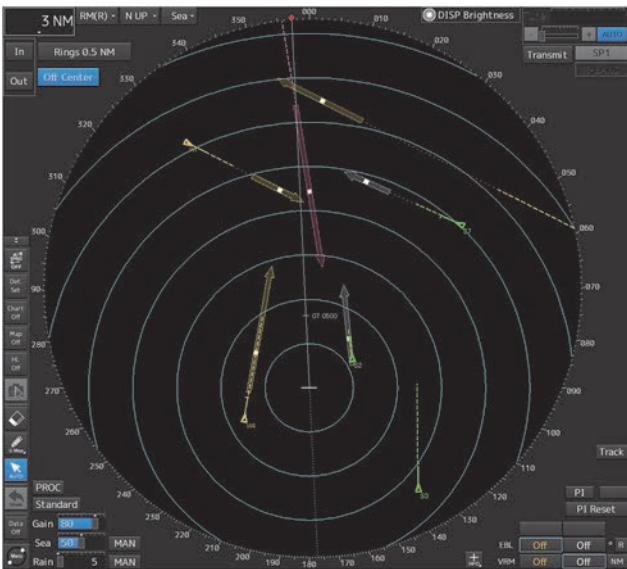


図22 危険針路表示例

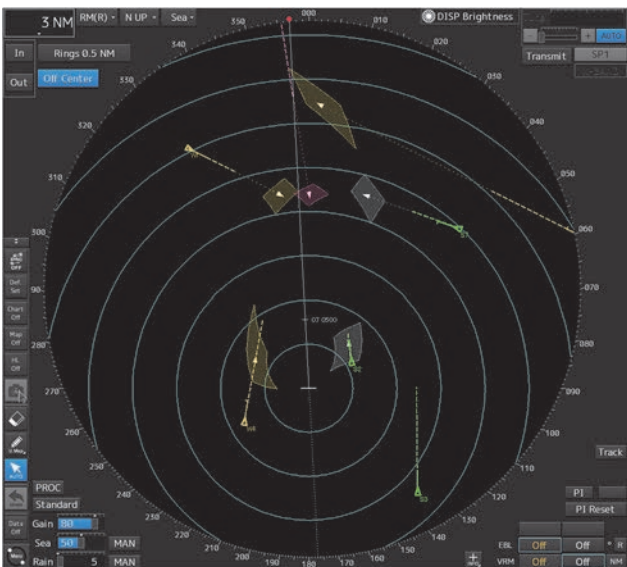


図23 危険領域表示例

衝突危険指標と同様に、衝突危険領域の表示も試作としてレーダーに実装し、操船シミュレータ試験により効果を確認した。同じシナリオで危険針路と危険領域表示それぞれで試験を行ったが、表示を行わなかった場合と比べ、他船との衝突の回数は大幅に減少し効果が高いことが確認できた。危険針路と危険領域の比較においては大きな差はみられなかったが、操船者の意見として危険領域表示の方が避航経路を見つけやすいとの意見が多かった。一方、船舶数が増えると危険領域は重なってしまい煩雑で見づらくなるという意見もあった。

今後、衝突危険領域表示についても実用化を検討していくが、衝突危険指標と同じく衝突予防の機能であることからレーダーへの搭載が最も適切であると考えられる。衝突危険指標とは異なり、衝突危険

領域の表示に関しては、ルールで義務付けられている機能ではないため、付加機能としてレーダーへ搭載し実用化することも可能であると考えられる。また、ルートを決定するにあたって重要な役割を果たすECDISにおいても本機能は有効であり、搭載を検討する必要があると言える。その他に、自動航行に向けた避航支援装置では、避航ルートを提示する際には本機能は必須の技術と考えられる。

3.3 東京計器株式会社による技術開発

3.3.1 衝突危険指標

東京計器は、従来指標を参考に、DCPA/TCPAベースの衝突危険指標である「正規化CPAリスク」を開発した。DCPA/TCPAをそれぞれ重み係数Wによって正規化（注：Wで割り算し、値の範囲を0～1に変換）して1から引き算し、それらを掛け合わせて0～1の範囲で危険度を求める（図24参照）。なお、元の値がWより大きい時の正規化値は1と見なす。

操船者になじみ深いCPA情報に基づくシンプルな構成としつつ、見合い関係に応じて重み係数を変化させ、操船者の感覚に近づけることを目指している。

正規化CPAリスク =

$$\left(1 - \frac{\text{DCPA}}{W_{\text{dcpa}}}\right) * \left(1 - \frac{\text{TCPA}}{W_{\text{tcpa}}}\right)$$

正規化DCPA 正規化TCPA

DCPA : 最接近距離, W_{dcpa} : 重み係数(>0)
TCPA : 最接近時間, W_{tcpa} : 重み係数(>0)

図24 正規化CPAリスクの計算式

DCPA/TCPAの重み係数について説明する。DCPAの重み係数 W_{dcpa} は、現状、自船周囲に想定した円形の安全航過領域を基準に設定している。一方、TCPAの重み係数 W_{tcpa} は、他船との出会い角に応じて変化させており、これが本指標の特徴と言える。具体的には他船と衝突関係にある場合、「見合い関係によらず一定距離を確保して他船を安全に避けるための変針角が同じ（即ち、危険な方位範囲が同じ）」になるタイミングにおけるTCPAを見合い関係毎に算出し、それらを結んだグラフを基準に W_{tcpa} を設定した（図25参照）。

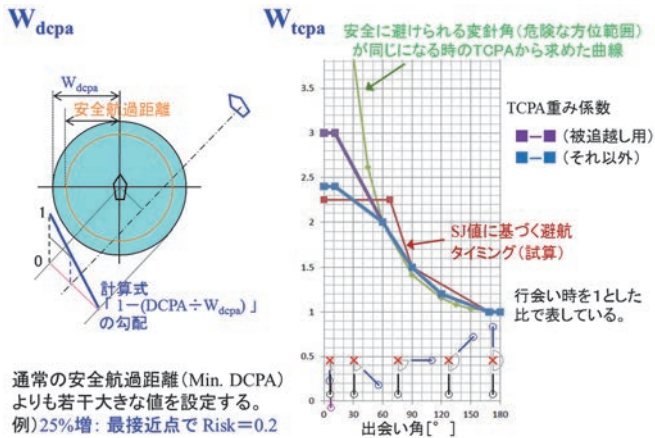


図25 正規化CPAリスクの重み係数

こうして重み係数を設定した正規化CPAリスクが、DCPAが等しくTCPAが異なる見合い関係でほぼ同じ値をとる時に危険な方位範囲（従ってとるべき避航変針角）がどうなるか確かめてみると、思惑通り、見合い関係によらずほぼ同じになる（図26参照）。

下図の右側は、後述するDACを使って危険方位範囲を表現している。また、左下のグラフは、正規化DCPAと正規化TCPAをそれぞれ横軸と縦軸にとった「正規化CPA座標系」、座標系の中の複数の曲線は正規化CPAリスクの式を変形して求めた「危険度曲線」である。この座標系は右上が安全、左下が危険な状況を表しており、他船毎の正規化値をプロットすれば、他船対応の優先順位付けへの適用が期待できる。

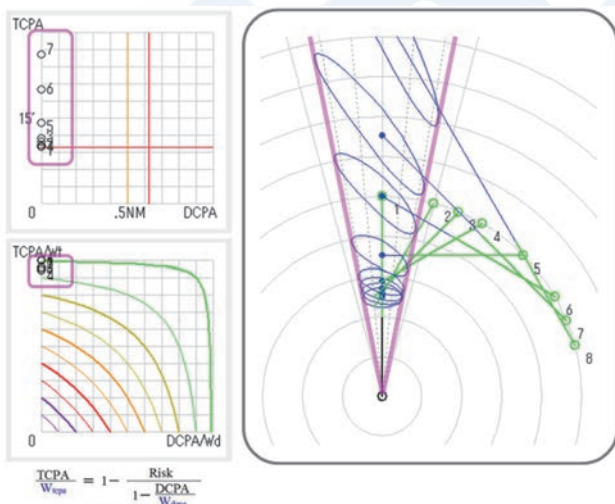


図26 正規化CPAリスクと危険方位範囲がほぼ一致する事例

なお、設定した W_{tcpa} のグラフと、出会い角に応じたSJ値（Subjective Judgement：主観的衝突危険度）の避航タイミングにおけるTCPAとを比較すると、非常に似た傾向を示す（図25右側のグラフ参照）。従って、上述した W_{tcpa} の設定方式は、「操船者の感覚に近づける」と言う本指標作成の目的に適うと考えている。

正規化CPAリスクは現在、妥当性の検証及び更なる改良に向けた検討を進めている。今後は、レーダーやECDIS/ECSなどに搭載し、

- ・ 危険度の表示（数値、時系列グラフ）
- ・ 危険レベルに応じた他船表示属性の色分け
- ・ 危険レベルに応じた警報の発出
- ・ 正規化CPA座標系による他船状況の把握
- ・ 避航アルゴリズムにおける危険度への適用

といった活用を目指す。なお、正規化CPAリスクは特許出願済みである。

3.3.2 衝突危険領域

東京計器は1970年代以降、PAD（Predicted Area of Danger）やDAC（Dangerous Area of Collision）といった「衝突領域」の表示機能を、図27に示す船用レーダーで提供してきた。



図27 東京計器の「衝突領域」搭載製品

PADは図28に示す通り、確保したい安全航過距離以内に他船が近づく危険な方位範囲を他船真針路上に設け、他船針路と直交する奥行きは安全航過距離とする楕円または六角形で表している。

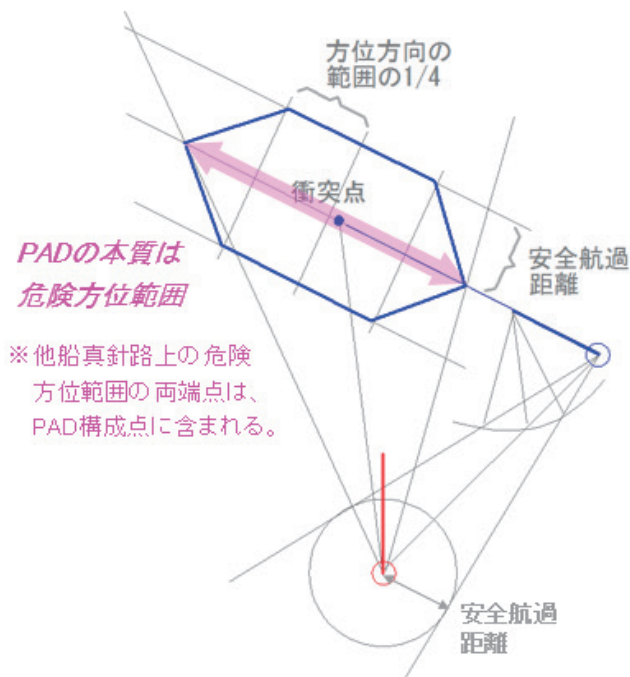


図28 PAD原理図（六角形の場合）

一方、DACは図29に示す通り、安全航過距離を半径とする円を多角形で近似した「安全航過領域」の各頂点（図中の①～⑧）と他船との衝突点を算出し、各頂点が衝突した時の自船位置（図中の①'～⑧'）を構成点とすることで、安全航過距離以内に他船が近づく危険な領域を正確に表している。

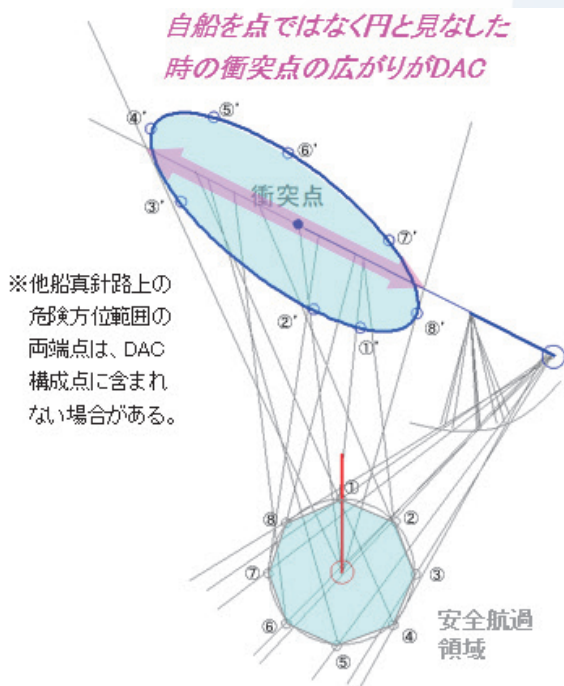


図29 DAC原理図（八角形の場合）

従来の接近点ベースの情報から、安全航過距離を確保できる避航変針角を正確に求める事は単純な見合い関係においても容易ではない。例えば、図30

（左）の場合、右方向に避ければ横切り船の船尾側を航過できそうなことは分かるものの、何度の変針角をとれば所定の航過距離を確保できるか、すぐには分からない。一方、DACのような「衝突領域」は、危険な方位範囲を正確に表す事ができるため、図30（右）のように必要な変針量を画面上で把握できる。⁴⁾

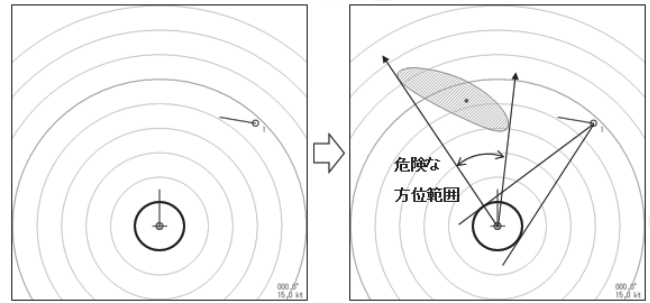


図30 DAC表示による危険な方位範囲の把握

さらに、DACはPADと同様に危険な方位範囲を確認できるだけでなく、奥行き方向（他船の真運動の向きと垂直な方向）も正確に表す事ができるため、安全航過領域の内側に他船が侵入した場合であってもDACは表示を継続でき

- ① あとどのくらいで侵入するか
- ② どのくらいの間、侵入しているか
- ③ いつ、安全航過領域から出るか

を見積もることができる。図31の①～③はその範囲を、①'～③'は相対運動線における①～③に応じた範囲を、それぞれ表している。

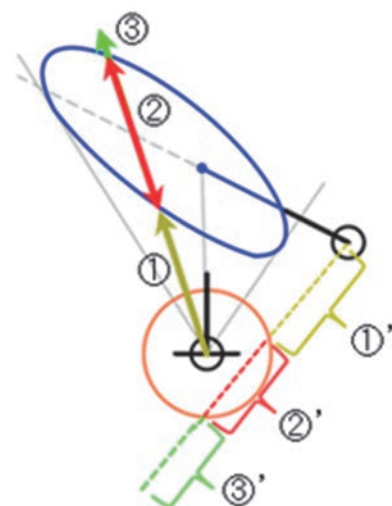


図31 DACの奥行情報

従来のDACは、安全航過領域を本船の周囲に真円の形状で設定した（図32(a)）。海上交通工学の知見によれば、こうした航過領域は進行方向を広く横

方向を狭くとした楕円形状が実態に即しているが、従来DACで本船周囲に楕円領域を設定すると本船の向きによって危険な方位範囲が変わってしまい「試行操船を行わなくても安全／危険な針路がひと目で分かる」というDACの特徴が崩れるため、実現しなかった（図32(b)）。

そこで、他船の周囲に安全航過領域を設定する新方式を考案した。形状が真円の場合、表示されるDACの形・大きさ・位置は、本船の周囲に領域を設定した場合と変わらない（図32(c)）。さらに形状を楕円にした場合、前記の問題（本船の向きによって危険な方位範囲が変わる）は発生しない（図32(d)）。また、領域の中心を船の位置からズラして設定すること（オフセット）も可能になった。本新方式のDACは日本特許を取得済みであり、外国特許についても出願中である。

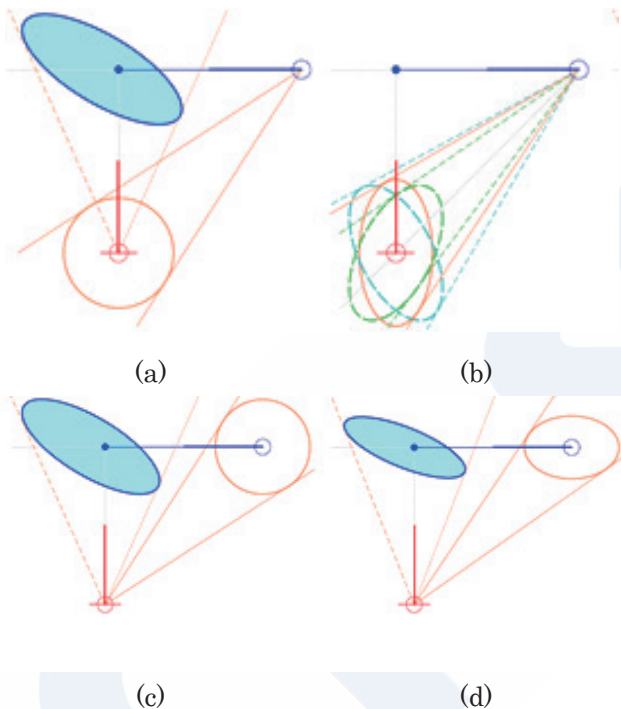


図32 DACにおける安全航過領域の置き方の変更

図27に示した既存製品では描画処理能力の限界によりPADやDACは線描画であったが、近年のPCでは描画能力が著しく向上し「衝突領域」の表示もよりグラフィカルにできるようになった。DACの線描画と面描画の比較を図33、図34に示す。このようにDACの視認性を向上すべく表示方式を開発中であり、将来的にはレーダーやECDISなどに実装する予定である。

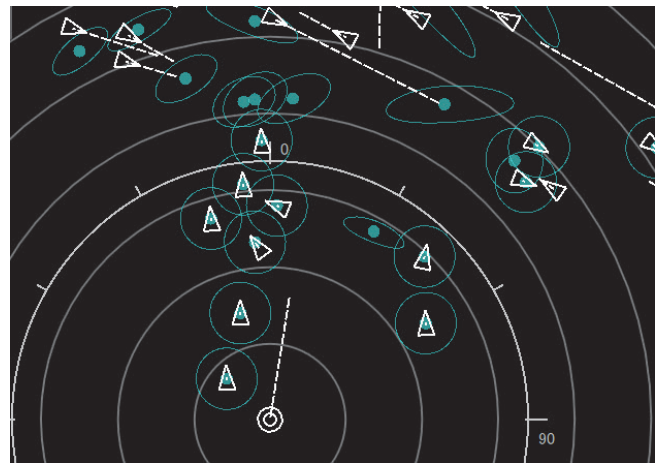


図33 DAC表示例（線描画）

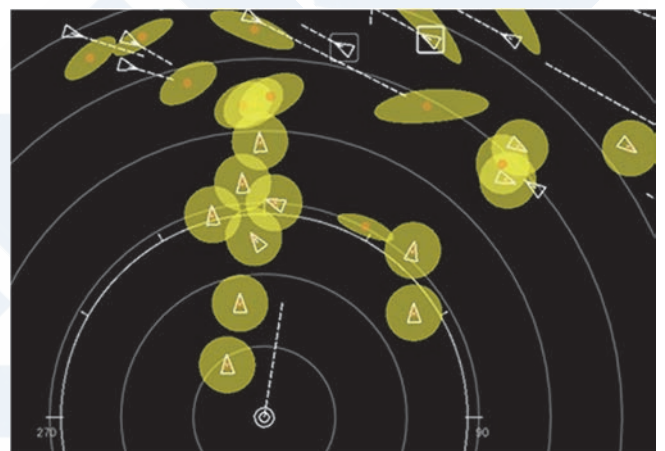


図34 DAC表示例（透過塗潰し）

また、最近インターネット経由でスマートフォンやタブレット端末のようなモバイルデバイスでも航行支援情報を入手できるようになった。アイディア株式会社が運営する「Aisea」(<https://aisea.net/>)もその一例である。東京計器はアイディア株式会社と提携し、法人向け「Aisea PRO」へのDAC表示機能の搭載を目指して両社で開発を進め、同機能を含む更新版が2020年8月にリリースされた。「Aisea PRO」画面上のDAC表示例を図35に示す。

「Aisea PRO」は、他船との衝突危険がある領域を、危険度の高い順に赤・黄・青で色分けして表示する。これにより、操船者の負担軽減や、避航操船の意思決定支援の実現を目指している。

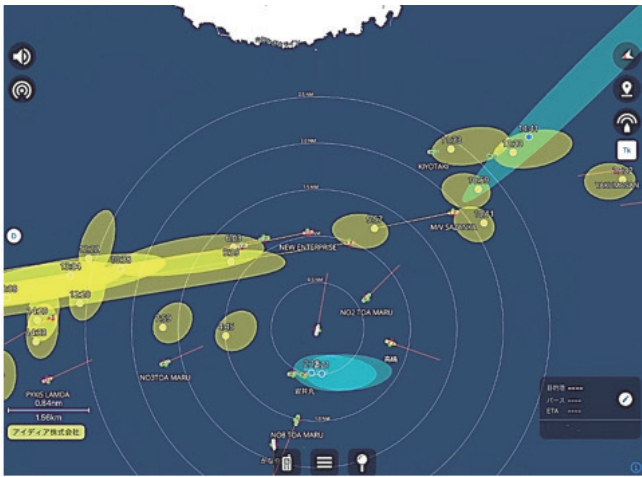


図35 「Aisea PRO」のDAC表示例

さらに、東京計器は「Aisea PRO」の販売に関する取引仲介契約とサービス業務委託契約をアイディア株式会社と締結し、2021年1月より取り扱いを開始した。「Aisea PRO」の普及を進めることにより、更なる安全な航海の実現と運行管理の効率化に貢献できるよう取り組んでいく。

4. 衝突危険指標及び衝突危険領域効果検証

本研究にて収集した熟練操船者のリスク感覚データをもとに指標化された、古野電気・日本無線・東京計器の衝突危険指標（色や音による警報）と、危険指標の根拠を可視化した衝突危険領域表示の有効性を客観的かつ定量的に評価するため、シミュレータを活用した操船実験を実施した。ここでは、操船実験の概要と操船結果を航跡図及び操船評価プログラムにより定量的に評価を行った結果について詳述する。

4.1 シミュレータを活用した実験

4.1.1 実験概要

輻輳海域を想定したシナリオにおいて、被験者に目視とレーダーから収集した情報をもとに通常の操船を行った場合（支援なし）と同シナリオにおいて衝突危険指標・領域を表示した操船支援装置を活用して操船した場合（支援あり）の両者について比較検証を実施した。比較検証手法には、航跡図の比較に加えて、日本海洋科学が有する操船評価プログラムを利用した。

当該実験は、2019年から2020年の期間において、各社作成の操船支援装置を用い、外航船舶の操船経験を十分に有する船長から若手航海士、士官候補生（海事教育機関に所属する学生）まで、幅広い経験層による被験者によって実施しているが、ここでは評価手法が確立された2020年の士官候補生による

実験の結果を紹介する。なお、代表的な実験の結果として、古野電気作成の操船支援装置を使った事例を挙げる。

4.1.2 実験シナリオ

実験評価には、大型コンテナ船（表5）においてシンガポール輻輳海域を想定し横切り船の状況を見ながら航路帯に進入するシナリオを採用した。以下に、自船の概要とシナリオ図（図36内、赤で示した航跡が理想とされる自船の航跡）を示す。

表5 実験に使用した自船の概要

実験に使用した自船の概要	
船種	コンテナ船（9100TEU）
船型（L/B/d）	349.8m/45.6m/14.5m
設定速力	12kt（S/B Full）

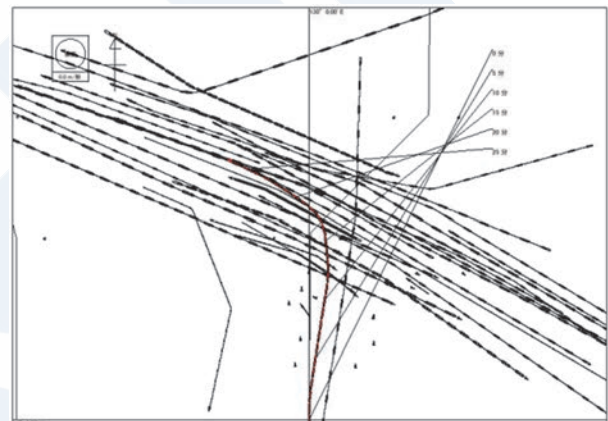


図36 実験に使用したシナリオの概要

本実験の前提条件として、自船の速力変更に伴う見合い関係の変化が比較検証に影響を与えることのないよう本船の速力（機関出力）は一定の状態で舵のみを使用して避航操船を行う設定とした。

4.1.3 評価手法

衝突危険指標・領域表示の有効性を客観的かつ定量的に評価するための手法として、航跡図及び操船評価プログラムを用いた。

航跡図による評価では、グリッドを設定したシート上に複数の操船者の航跡を重畳させ、航跡のばらつきを分析することにより比較検証を実施した。今回採用したグリッドの大きさは500m四方であり、これは、操船者が輻輳海域において確保すべき他船との航過距離が概ね2.5～3ケーブル（約500m）であるという操船者へのヒアリング結果に基づいている。

操船評価プログラムによる評価では、日本海洋科学が保有する「Auto Grading System」（以下、AGS）を採用した。AGSは、日本海洋科学製操船

シミュレータ付属ソフトウェアで、他船との見合い関係、ブイや岩などの海上の障害物、進入禁止区域（No Go Area）など、各評価項目において操船結果を定量的に評価して点数で表現することを可能とするものである。

AGSによる操船結果の基本的な評価式は、各評価項目の危険領域侵入時間を、操船時間で除することにより、無次元化した負の点数により結果を算出する。

$$Score = - \frac{x * t_{Dangerous} + y * t_{Caution}}{t_{end}} * \quad (5)$$

ここで、

Score: Evaluation score

tDangerous: Period/time that existed in Dangerous area (second)

tCaution: Period/time that existed in Caution area (second)

x: Variable for Dangerous area for weigh

y: Variable for Caution area for weigh

tEnd: Period/time of ship maneuvering (second)とする。

また、操船事故という結果とそれに至る過程におけるNGAへの侵入などの安全制約に対する違反の程度を階層化し、各評価項目への重みづけを実施した。



図37 安全制約の違反の程度

ここで、AGSは操船事故に至る操船行動を評価するものであるため、図37の最上位にあたる「Consequence」、すなわち操船事故については、事象の検知と表示は行うがその評価は行わない。従って、評価対象となる項目は「Approaching to Safety Constrain」及び「Process to Approaching Safety Constrain」のレイヤーとなる。前記に従い、評価項目を仕分けすると表6となる。Safety Constrain以下の2つのレイヤーの重みづけ係数（Wf, Weight

factor）は、上位を2、下位を1とする。

表6 AGSの評価項目と重みづけ係数（Wf.）

Id	Layer	Items	Wf.
1	Consequence	衝突	n/a
2		乗揚	n/a
3	Approaching to Safety Constrain (To Object)	他船関係（距離と方位変化率）	2
4		他船関係（漁船など）	2
5		ブイ航過距離	2
6		任意点航過距離	2
7		着岸時速力減	2
8	Approaching to Safety Constrain (To Area)	NGA進入	2
9		指定航路外航行	2
10	Process to Approaching Safety Constrain	ROT制限	1
11		航路内速力制限	1
12	Other (Economy)	経済運航指標	n/a

なお、当該評価プログラムには他船関係の評価において「危険領域図」による評価方式⁹⁾が内包されている。この方式は、他船航過時の相対距離及び方位変化率を指標とし、一秒毎の非常に細かなメッシュで他船航過による安全性の評価が可能であり、長年の研究を背景に妥当性が確立されている。

4.2 実験結果

4.2.1 航跡図による評価・分析

15名の被験者による操船結果を図38に航跡図で示す。左の航跡図が通常の操船を行った結果（支援なし）、同シナリオについて操船支援装置を利用し操船した結果（支援あり）である。青色の航跡が「衝突の発生なく航行した航跡」、赤色の航跡が「衝突が発生した航跡」または「航路に対して逆走した航跡」である。

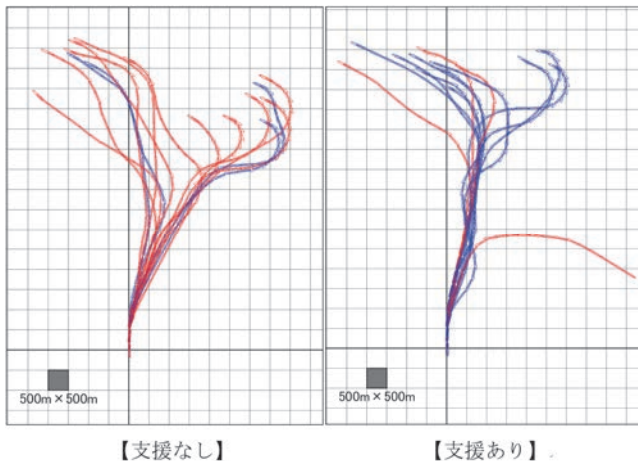


図38 操船結果の航跡図

本検証において、「支援なし」の場合には15回の試験中に衝突が11回発生したが、「支援あり」の場合には、衝突回数が4回の発生頻度まで低下した。これは、これらの支援表示を与えることにより、衝突リスクが高い他船に適切なタイミングで気が付くとともに、衝突リスクの高い海域が視覚的に認識可能となったことにより回避行動を見出しやすくなったことが要因であると考えられる。すなわち、個人の状況認識能力や経験の差の補完がなされた結果が、航跡の収斂という形で表されていると分析される。

なお、2019年度に実施したライセンス所持者（プロの船長・航海士）を被験者とした同様のシナリオにおける実験では、「支援あり」では「支援なし」と比較して航跡が収斂し、かつ衝突回数を0～1回の発生頻度まで抑える結果が得られている。

4.2.2 操船評価プログラムによる評価・分析

操船評価プログラム（AGS）による比較検証結果を表7に示す。比較は、「支援なし」と「支援あり」でそれぞれ実施し表中にカラー矢印で示した。なお、実験結果には衝突が見られるが、前述した通り、AGSでは当該項目による減点は行わず、衝突があった事実を他の項目による評価と合わせて表示するようにしている。このため、衝突があった結果については採点による比較を実施しないこととした。また、反対レーンへの進入（逆走）も何件か発生しているが、これについても、NGAにおいてある程度の減点はなされるものの、今回の実験方法では反対レーンに入ると極端に他船との遭遇が少なくなり他船航過に関する採点に影響を及ぼすため、衝突同様に、逆走があった結果については採点による比較を実施しないこととした。

表7 操船評価プログラムによる操船結果評価

被験者 (士官候補生)	AGSによる評価結果		
	支援なし (レーダのみ)	支援あり (衝突リスク表示)	比較
A	衝突	-109.29	↑
B	衝突	-111.84	↑
C	衝突	衝突	→
D	衝突	-129.83	↑
E	-107.43	-66.43	↑
F	逆走	衝突	→
G	衝突	-63.96	↑
H	-67.07	-84.22	↓
I	衝突	逆走	→
J	-119.10	-61.83	↑
K	衝突	-51.13	↑
L	衝突	-55.30	↑
M	衝突	-113.89	↑
N	衝突	-29.21	↑
O	-146.11	逆走	↓
平均(*)	-109.9	-87.7	↑

<凡例>

- ↑ 支援なしと比較して支援ありでは点数が上がった、または衝突/逆走しなかった
- ↓ 支援なしと比較して支援ありでは点数が下がった、または衝突/逆走した
- 支援なし、支援あり、どちらも衝突/逆走した

*衝突/逆走なく点数計上されている合計点数をその人数で除した数値を平均点として記載した

表7より、15人のうち10人の評価結果において、「支援あり」の方が「支援なし」の場合と比較して概ね「適切な操船がなされた」ことがわかる。衝突が減ったことは前記航跡図から明らかであるが、操船評価プログラムにより算出された平均点も「支援あり」の方が「支援なし」の場合と比較して上昇しており、操船支援装置を活用することにより、一定の操船向上効果が見られた。

4.3 考察

今回の研究によって得られた結果をもとに、衝突危険指標・領域表示の効果ならびに本操船支援装置を活用する上での教育の重要性についてそれぞれまとめた。

4.3.1 衝突危険指標・領域表示の効果

シミュレータによる実験ならびに検証結果から、衝突危険指標に基づく警報の発報が操船者への気づきを早期に促し、かつ、危険と判断される根拠を領域表示として可視化することで、操船者の技量のばらつきを平準化し衝突のリスクを低減・安全性向上に寄与することが証明された。とりわけ、本節で取り上げたシナリオが示すように、横切り関係において非常に高い効果を発揮することが窺える。航路帯を横切る場合など、船速が異なる複数の船が連なって航行している状態を横切るような場合において、操船者はそれぞれの船舶の動きを予測し、未来の船団の姿、つまりは各船舶の将来的な相関関係を予測した上で自船の取るべきルート进行分析・判断しなければならないが、本装置がその作業を容易にしているといえる。これは、支援なしの試験において少な

からず発生していた衝突が、支援ありでは極めてゼロにまで近づいたことで明確に証明されている。

また、人間への負荷が低減されることで、以下の二次的効果が期待される。

- ・ 精神ストレスの軽減による判断ミスの低減
- ・ 思考時間をより長く確保出来ることによる判断ミスの低減
- ・ より冷静に周囲を観測することによる重要な目標逸失の低減
- ・ 夜間や視界不良などの視認が困難な状況下における判断力の向上

今後は、これらの二次的効果にも着目しながら、多様なユーザーや操船環境に合わせて操船支援装置の調整を行いユーザビリティの高いマンマシンインターフェースを構築することで、操船者の安全・安心に寄り添った運用がなされるよう実装に向けた準備を進めていく。

4.3.2 操船支援装置を活用する上での教育

前節で述べた衝突リスク表示の効果が明確である一方、新たな操船支援装置の利用は、使用者の理解度によっては安全性を損なう可能性があることもこれまでの実験において課題として挙げられていた。今回、航海士候補生を対象に教育を実施した結果、得られた着眼点を以下にまとめる。

- ・ 教育により操船支援装置への理解度を深めることで安全性向上に寄与することができる。
- ・ 同一の教育を行っても被験者によってその理解度にはバラつきが生じるため、演習などを通じて具体的に理解が不足していると思われる箇所を洗い出し、個別に教育を追加するなど、個人のレベルに応じた教育と訓練は必須である。
- ・ 操船支援装置を有効に利用するためにはその前提となる操船実務の知識・経験が必要であり、操船者に求められる知識・技能を明確にした上で教育・訓練を含めた運用を検討していくべきである。

以上のことから、経験や能力が多岐に渡る操船者を対象とする場合、操船者への教育は必須の要件であると考え、今後はこれら教育の必要性をより説得力のあるデータをもって証明するとともに、安全に装置を運用するために必要となる教育要件の確立を目指す。

5. まとめ

5.1 本研究成果

今回の研究で開発した衝突危険指標に関して、各社とも現役の外航船船長・航海士に対して実施した試験データを基に衝突危険発報アルゴリズムを構築し、試験機の開発まで実施した。また衝突危険指標に衝突危険領域表示を組み合わせることで、操船者に対し衝突危険指標の発報にて気づきを与え、衝突領域表示により衝突リスクが高い海域を伝えることで、旧来の目視及びレーダーによる操船に比較し、早いタイミングで衝突の危険性がある船に気が付くことができ、また迅速に安全な航路を選定することができるようになった。操船シミュレータを利用した操船実験では操船経験のある操船者のケースでは試験機を利用した場合、使用しなかった際と比較し衝突事故が著しく減少した。また操船経験に乏しい学生が本機器を利用した際も機器を利用するための教育実施後では十分な効果が確認された。

一方、操船者の中には本機器の機能を十分に理解できず、使いこなせないケースも少数ながら発生したので、今後の課題として衝突支援装置を十分に活用するための教育に関して検討をしていく必要がある。

5.2 今後の取り組み

各航海機器メーカーは本研究で開発した機能、機器のプロトタイプが完成した。今後は各社、開発した本機能・機器を製品化すべく、改良・検証を進めて行く。

各メーカーにおいては船級などからの機器承認取得を念頭にいれつつ、実証を重ねて2025年頃の製品化を目指している。一方、海運事業においては、本開発機能・装置を今後の実証を経て、本船へ搭載し、衝突事故の大幅減、事故による環境破壊防止、顧客サービス向上に取り組む。また日本海洋科学においては、今回開発した操船評価指標をブラッシュアップすることで、今後出てくる自律操船システムの評価が実施できるようにするとともに、今後、基準化、標準化が進められていくと想定される自律操船システムの評価方法に関して、日本のみならず海外の関係各所へ提案を進めて行く。

6. 終わりに

本研究における衝突リスク判断方式の開発物は、操船者の技量のばらつきを平準化して衝突のリスクを低減し安全性向上に寄与することが証明されてきた。また最終年度ではライセンスを所持していない

航海士の候補生を被験者として起用し、その結果一定の安全性向上に効果が見られたことから、多様なユーザーへの適応が可能であることが証明された。

今後、本取り組みは研究・開発段階から実装、実用化の段階へ進んでいく。本研究における研究成果は既存船の操船者に対する操船サポートによる安全性向上のみならず、現在開発中である自動運航船において状況判断機能の基礎技術としても利用が可能である。

また本研究開発では航海機器メーカー各社と海運会社が共同で取り組むことにより、メーカーの知見と現場の知見を組み合わせることで衝突事故を防止するための現状に即した課題解決にとりくめたこと、協調領域と競争領域を意識しながら同業者と一緒に開発に取り組めたことで、海事産業の活性化の一助となった。

現在本研究メンバーは国土交通省が実施した「操船支援機能と遠隔からの操船などを活用した船舶の実証事業」や日本財団が実施する「無人運航船の実証実験にかかる技術開発共同プログラム」(MEGURI2040)のDFFASプロジェクトに参画し、衝突事故の削減を含めた安全航行の実現・船員の労働環境改善を図る取り組みを進めて行く。

参考文献

- 1) Nelson Cowan, "The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity," BEHAVIORAL AND BRAIN SCIENCES (2000) 24, 87-185.
- 2) 長澤 明, 原 潔, 井上 欣三, 小瀬 邦治, "避航操船環境の困難度Ⅱ: シミュレーションによる評価に向けて," 日本航海学会論文集, 第88号
- 3) 今津 隼馬: 衝突針路を使ったOZT算出方法 (ア) 日本航海学会誌 NAVIGATION, 188巻
- 4) 箱山 忠重, 八木 修: 衝突点と衝突領域, 日本航海学会誌NAVIGATION, Vol.214, pp 25-32 2020.11
- 5) 中村 紳也, 「海上交通に関する安全性評価手法の確率」, 1996

略語

ICT : Information and Communication Technology, 情報通信技術

IoT : Internet of Things, モノのインターネット

CPA : Closest Point of Approach, 最接近点

DCPA : Distance of CPA, 最接近距離

TCPA : Time to CPA, 最接近時間

PAD : Predicted Area of Danger, 予測危険範囲

DAC : Dangerous Area of Collision, 衝突危険範囲

OZT : Obstacle Zone by Target, 航行妨害ゾーン

AIS : Automatic Identification System, 船舶自動識別装置

IMO : International Maritime Organization, 国際海事機関

ECDIS : Electronic Chart Display and Information System, 電子海図情報表示装置

ECS : Electronic Chart System, 電子海図装置

SJ : Subjective Judgement, 主観的衝突危険度

AGS : Auto Grading System, 操船評価プログラム

NGA : No Go Area, 進入禁止区域

自動操船AIの開発と実船実験による検証

橋本 博公*, 西村 遥**, 西山 尚材***, 樋口 穰司****

1. はじめに

世界経済の発展とともに海上輸送量は増加の一途を辿っており、過密港湾や輻輳海域における航行安全性の向上は海上輸送が抱える大きな課題である。衝突事故の多くは人的要因によるものであり、人間が操船を行う限りにおいては、海上での衝突事故を完全に防ぐことは困難である。加えて、日本は超高齢化社会に突入しており、内航海運では近い将来に船員の安定的確保が困難になるものと予想される。これら人的要因による衝突事故や船員不足の抜本的な解決は容易なものではなく、産官学が一致団結して技術革新に取り組むことが不可欠な状況である。

こうした中、国土交通省海事局においては、交通政策審議会・海事分科会・海事イノベーション部会における審議が行われ、2025年の自動運航船の実用化を目標にロードマップ案が策定された。2020年から2025年には人工知能（AI）技術等を活用した自動運航船の技術開発や実証が位置付けられている。実際に、2020年から日本財団の無人運航船プロジェクト「MEGURI2040」が開始されるなど、今後は操船における“認知”支援に留まらず、“判断”や“行動”にまで踏み込んだ自動操船システム開発の動きが加速するものと考えられる。

海上の船舶は基本的にどこを航行してもよく、速度や操縦性能が大きく異なる大小様々な船舶が混在するなど、道路等のインフラを前提とした自動運転の技術開発が進む自動車に比べると交通流は複雑である。また、航空機のような管制システムと異なり、海上の航路管制は船舶の航路や速度の指示、他船との間隔調整を行わないため、自動航行技術の実現にあたっては、将来を見越した衝突リスクの判断と適切な回避操船をいかに個船が自ら判断し達成するかが鍵となる。さらには、熾烈な競争に勝ち抜く輸送機関とするためには、他船や障害物を避けるだけでなく、効率的に目的地に到達する必要がある。この難解な問題を従来技術の延長で解決するのは容易ではないが、様々な分野で人間を上回る能力を示しつ

つあるAIは大いなる可能性を秘めている。

本研究では、自動運航船の実現に不可欠な自動航行技術の実現を目指して、AIによる自動操船をコア技術とする内航船の操船支援システムを開発し、実船を用いて輻輳海域での検証実験を行うことで、AIによる自動操船の可能性を明らかにすることを目的としている。本目的の達成のため、以下のような個別課題・実施項目を設定した。次章以降では、各項目について詳述する。

- (1) 自動操船AIの開発
- (2) 実船実験用の自動操船システム開発
- (3) 自動操船システムのリスク評価
- (4) シミュレータによる自動操船AIの評価
- (5) 実船実験による自動操船AIの検証

2. 自動操船AIの開発

輻輳海域での衝突危険判断や回避行動選択のプロセスを明瞭かつ普遍的に記述することは容易ではない。特に、衝突が迫る状況下での操船の正誤を学習するための教師データはほとんど存在しないため、船舶の避航問題に関しては、機械自身に評価やチューニングを行わせる機械学習が有力な手段となる。特に衝突回避という目標が明確に与えられる行動選択問題では、投機的な探索と評価を繰り返して知能を強化する強化学習が適している。強化学習では、将来にわたる累積報酬の期待値を最大化する行動方策を学習するが、実際に行動した結果をもとに行動価値を学習するQ学習もそのひとつである。Q学習自体は新しいものではないが、行動価値関数Qを深層学習（deep learning）により近似させることで、状態に対して複雑に変化する行動価値を高精度に推測することが可能となり、最大の累積報酬が期待できる最適行動の選択を実現している。このように強化学習と深層学習を組み合わせた学習は深層強化学習と呼ばれ、DeepMindが深層Q学習¹⁾（deep Q-learningあるいはdeep Q-networkと呼ぶ）をAtari

* 大阪府立大学

** 株式会社日本海洋科学

*** 株式会社MTI

**** 日本無線株式会社

ゲームに適用した結果、人間の得点を大きく上回る操作が可能となったことで一躍注目を集めた。本研究で開発した自動操船AIは、この深層Q学習を応用した自動避航に関する研究成果²⁾を発展させたものである。

衝突危険の判定には、自船周りの排他領域を表すバンパー領域³⁾を用いる。バンパー領域のサイズは、海域の輻輳度に応じて異なる値が提案されているが、本研究では外洋と輻輳海域を組み合わせた2重バンパーとした。バンパー内への相手船の侵入に対して負の報酬を設定することで、衝突を回避するための最適な行動を学習することができる。ニューラルネットワーク (NN) の入力値は、自船、バンパー領域、周辺他船の情報等をグレースケール化して与えている。学習はシミュレーションベースで行うため、操舵に対する操縦運動モデルが必要となる。ここでは、海上公試のZig-Zag試験結果さえあれば学習が可能となるように、1次遅れ系のKTモデルを使用した。離着岸操船などに深層強化学習を応用する場合は、拘束模型試験による低速域の操縦運動モデルの構築が必要と思われるが、避航問題ではそこまでの精緻なモデルは必要とならない。

深層Q学習では、ある状態が与えられた際に、選択可能な行動を起こした場合の将来にわたる累積報酬を推定するNNを、膨大な回数の避航シミュレーションを通じて構築していく。本研究における行動選択枝は、実船実験を念頭に置き、人間がAIの判断を評価できるように、直進、左旋回、右旋回の3種類とした。本学習の結果として獲得できる、相手船をバンパー内に入れない、あるいは相手船をバンパー外に追い出すためのAIと一般的なオートパイロットを組み合わせることにより、人間の関与無しに目的地への航行と衝突判断・危険回避を行う自動操船システムを実現している。実際の衝突危険度は、相手船との相対的な関係で動的に変化するものであるが、AIによる自動操船の前例がない現状では、静的な要素のみにもとづく危険評価を採用し、AI操船の良否について人間が船上でリアルタイムに評価できることを最優先とした。さらに、実船実験の実施にあたり、AIには相手船に脅威を与えない前広な避航を行うことが要求されることから、バンパーサイズを決定するための全長には、検証実験に使用する神戸大学大学院海事科学研究科附属練習船「深江丸」の値ではなく、自動船舶識別装置 (AIS) の1年分のデータ解析を通じて得た、大阪湾で遭遇しうる最大の船の値を採用している。

3. 実船実験用の自動操船システム開発

海上での自動操船実験には、神戸大学の練習船「深江丸」を用いる。本船は、船内LANに、GPS、Gyro Compass、GPS Compass、AIS、Radarなどのデータがブロードキャストされているほか、外部信号によるオートパイロットシステム⁴⁾が既設されている。自動操船システムの構築にあたり、センサー情報の取り込みやデコード、データベース化、時間差分による情報生成、送受信の監視などを行うサブPCと、データベースから本船に近い順に任意の隻数の他船・障害物データを入力として最適な行動を出力するAIプログラムを搭載したメインPCを設置した。本システム構成の概略図を図1に示す。他船や障害物の検知には、AISとレーダーTTの情報を用いているが、複数のセンサーから得られる船位や速度ベクトルなどの情報に関して照合や一致判定を要しないシステムとなっている。各PCと既設オートパイロット間で船内LANを通じたUDP通信を行い、AIが指示する最適針路に向かってオートパイロットで航行する自動操船システムを構築した。

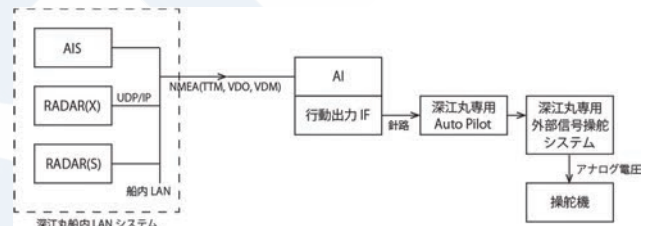


図1 自動操船システムの構成図

自動操船モードへの切り替えやウェイポイントの設定などは、図2のユーザーインターフェースを用いて行う。画面上には、自船、他船・障害物、バンパー領域、目標針路などが表示される。レーダーに近い操作性と最小のマウス操作で入力ができるように、海技者の協力のもとで仕様やレイアウトを決定した。NNは非線形の統計フィルターであり、入力と出力の関係を人間に明示することが難しいため、各タイムステップにおけるAIの針路指示が、通常の航行モードであるか避航モードであるかを識別可能としている。さらに、画面上に二重バンパーを常に表示しておくことで、相手船・障害物のバンパー内への侵入有無や侵入時間をもって、AI操船の良否を船上で容易に判断することができる。

実船実験において、通常操船からAI操船への切り替えは、船長の判断により、ハンドコントロールからリモートコントロールへロータリースイッチで切り替える。その後、メインPCのインターフェー

果であると考える。

5. シミュレータによる自動操船AIの評価

AIによる自動操船システムを実船へ搭載するにあたり、シミュレータを活用した検証と評価が不可欠となる。本研究では、シミュレータを活用した、操船評価ツールによる定量的評価と海技者による定性的評価の二つのアプローチにより、安全性の事前検証を行った。

5.1 操船評価ツールを用いた定量的評価

5.1.1 操船評価ツール

操船者が他の船舶との衝突の危険性を認識する主要な要素として、自船と他船との間の相対距離、方位の変化率、船首航過か、船尾航過か等を挙げることができる。㈱日本海洋科学は避航操船結果を評価するための指標として、他船との相対距離と相対方位変化率を用いて「危険領域：Danger」「注意領域：Caution」「安全領域：Safety」を定義する評価領域図を提案している⁵⁾。評価領域図は、他船との見合い関係ならびに他船との相対距離と相対方位変化率との関係から複数のグラフに分類され、それぞれに「Caution」「Danger」の領域が設定される。自動操船システムによる操船では、海上衝突予防法で定める「保持船」に可能な限りならないことが望ましいという観点から、横切り関係では右からの横切り船と左からの横切り船を区別した新たな評価領域図⁶⁾による評価を実施した。

操船結果の評価では、船舶が「Danger」に入ったときの重み係数を「-2」,「Caution」を「-1」,「Safety」を「0」とし、減点方式で評価する方法についても併せて提案している。領域図作成のための評価式と領域の定義を表1に示す。

表1 領域図作成のための評価式と領域の定義

Encounter situation		Evaluation formula		Evaluation
Head-on/ Crossing from Starboard	Bow Crossing	$\theta < \infty$	$R < 185.2 [m]$	Danger
		$\theta \leq 4.5 \times 10^5 \cdot R^{-1.7}$	$R < 1852.0 [m]$	
		$\theta < \infty$	$R < 463.0[m]$	Caution
		$\theta \leq 15.0 \times 10^5 \cdot R^{-1.7}$	$R < 3,426.2[m]$	
	Range excluding danger area and caution area			Safety
	Stern Crossing	-		Danger
		$\theta \leq -5.2 \times 10^5 \cdot 170^{-1.7}$	$R < 185.2 [m]$	Caution
		$\theta \leq 15.0 \times 10^5 \cdot R^{-1.7}$	$R < 3,333.6 [m]$	
Range excluding caution area			Safety	
Same-way	$\theta < \infty$	$R < 277.8[m]$	Danger	
	$\theta < \infty$	$R < 463.0[m]$	Caution	
	$\theta \leq 15.0 \times 10^5 \cdot R^{-1.7}$	$R < 926.0 [m]$		
	Range excluding caution area			Safety
Crossing from Port	Bow Crossing	$\theta < \infty$	$R < 185.2[m]$	Danger
		$\theta \leq 4.5 \times 10^5 \cdot R^{-1.7}$	$R < 1852.0[m]$	
		$\theta < \infty$	$R < 463.0[m]$	Caution
		$\theta \leq 15.0 \times 10^5 \cdot R^{-1.7}$	$R < 14,816.0 [m]$	
	Range excluding danger area and caution area			Safety
	Stern Crossing	$\theta \leq -5.2 \times 10^5 \cdot 170^{-1.7}$	$R < 185.2[m]$	Caution
		$\theta \leq -5.2 \times 10^5 \cdot R^{-1.7}$	$R < 9,260.0 [m]$	
		Range excluding danger area and caution area		
θ : Rate of change in bearing (deg./min.) R : Relative distance (m)				
Danger (危険領域)		: Unacceptable area		
Caution (注意領域)		: The area where own ship commences to avoid or expect another ship to avoid		
Safety (安全領域)		: Acceptable area		

当該領域図は、外航船の船長および水先人を被験者とした操船実験によって、約30,000点のデータに基づき定式化されたものである⁵⁾。加えて、内航タンカーによる実船での自動避航実証実験の結果などにより、全長50m以上の船舶における輻輳海域を想定した評価領域図として、妥当性が示されていることから、今回のAIによる自動操船結果の評価を客観的に行う手法として採用した。

5.1.2 操船評価結果

前節の操船評価ツールを利用して、典型的な1対1の見合いシナリオや相手船が複数隻のシナリオ、実海域の交通流を模擬した計39のシナリオについて、自動操船の採点を行った。試験シナリオおよび評価結果の一例を図4、5および表2に示す。図5上段の左上のグラフは前方を横切る船（右からの横切り船）に対する領域図、左下は後方を横切る船に対する領域図、右上は同航船に対する領域図を描いており、図4の見合い関係における操船結果を他船との相対距離と相対方位変化率との関係から、10秒毎に赤点でプロットした結果を示している。図5の下段は左からの横切り船を対象とした評価領域図であるが、今回のシナリオでは該当する船舶は存在しない。また、表2は、図4の試験シナリオに対する、評価ツールの採点結果を示している。すなわち、自船の前方を横切る右からの横切り船に対して自船はCaution・Dangerに侵入することなく航過したこ

とが、領域図ならびにスコアの両方から読み取れる。

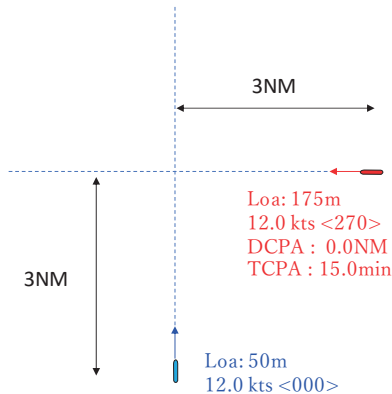


図4 試験シナリオの例（1対1横切り船）

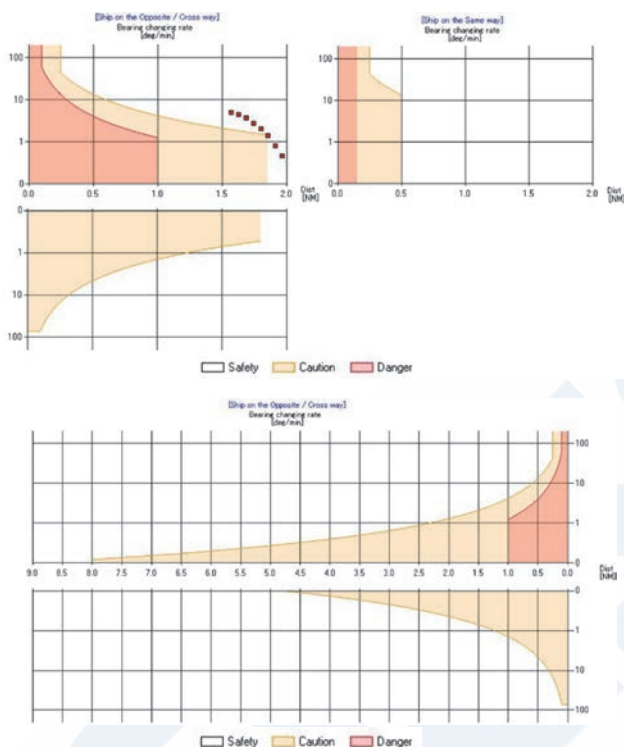


図5 評価領域図の例

表2 操船評価結果の例

	Safety	Caution	Danger	Total
Sum Counts	917	0	0	917 (a)
Weight Factor	0	-1	-2	-
Sum Score	0	0	0	0 (b)
Total Score	-	-	-	b/a x 100=0

このように、全てのシナリオについて採点を行った結果、減速を認めていない条件下でありながら、「Danger」に侵入することはほとんどなく、「Caution」への侵入頻度も次節に記す通り海技者からみて許容範囲に収まることが確認できた。これらのシナリオは、速度変更なしには避航が難しいと

されているケースであり、現在は考慮していない速度変更を強化学習の行動選択枝に含めることやバンパー領域を工夫することで、更なる操船行動の改善が期待される。

5.2 海技者による定性的評価

大型船の操船に関し豊富な経験を有する海技者計5名（船長4名・一等航海士1名）を評価者として、シミュレータ上で自動操船を観察した後、各人にフィードバックを求める形で操船評価を実施した。各シナリオにおいて、自船を視点とした見合い状況の確認に加えて、任意の他船（大型船）を使用した見合い状況の確認も実施し、「人間が操船する他船から見て不安を与えない」という点において、自船の動きに違和感がないことを確認した。

さらに、「深江丸」での実船実験に際し、最終的な操船判断の権限を有するのは本船の船長であることから、「深江丸」の乗組員の協力を得て、操船シミュレータ上で「深江丸」の運動モデルを用いた自動操船を再現し、乗組員を評価者として避航開始のタイミング、避航の方法と避航角度、原針路復帰のタイミングなどの観点から、評価を実施した。

これらの評価者による検証を行った結果、総じて、自動操船の動きに違和感がないという回答が得られるも、輻輳海域における実船実験であることを十分に考慮し、表3に示す通り課題を抽出し、それぞれについて実船実験に必要とされる対応策を講じた。実船実験においては、これら全ての課題が解決されたことを確認した上で実施した。

表3 実船実験に向けた自動操船の課題と対応策

課題	解決策
右からの横切り船に対し航法に反して左転する恐れがある	学習環境を工夫し、航法適用されるアクションとなるよう調整した
船首のふらつき（一度舵を右にきった後、左にきりなおす行為）が見られる	報酬の与え方やオートパイロットとの接続方法を見直し、ふらつきを低減させた
AIによる操船意図が不明瞭である	操船者がAIの操船行動を予想できるよう、バンパーと周辺他船を表示するインターフェースを準備した
周囲の輻輳状況や気象海象など、環境によっては実験が困難である	試験法案にて環境条件を明確に定めた

一部の操船局面においては、舵による避航ではなく、機関による減速の必要に迫られる場合があるとのフィードバックも挙がったが、今回の実船実験に

において当該減速オプションは装備せず、減速が必要な局面に遭遇した場合には、人間がフォールバックすることにより安全性を担保することとした。

6. 実船実験による自動操船AIの検証

2020年12月8日から10日の3日間、幅狭海域である大阪湾にて自動操船システムの実証実験を行った。実験を実施した海域は神戸港以南～洲本沖灯浮標以北である。AI操船の検証実験を実施するうえでの安全基準は以下のように定めた。

- ・ 「風力10m/s以下」、「波高2m以下」、「視程2マイル以上」である場合
- ・ 本船の航海計器並びに機関、AI操船機能に異常がない場合
- ・ 船長又は航海当直責任者が、幅狭状況などが試験に適した状況と判断する場合

実船実験の実施体制を図6に示す。実験中は、安全確保のため、本船の通常当直状態を維持し、試験統括責任者ならびに当該AI操船機能を担当するエンジニアは絶えずシステムの監視を行い、不測の事態に備えた。

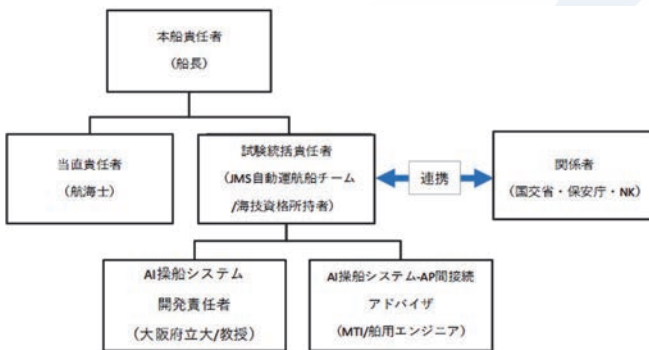


図6 実船実験の実施体制

実船実験では、3日間で21通りを超える見合い関係に対してAIによる自動操船を行った。実験時には衝突危険が生じるような見合い関係を意図的に作り出すようにマニュアル操船を行い、ウェイポイントの緯度経度を自動操船システムに入力した後、AIによる自動操船モードへの切り替えを行い、目的地方向へ針路を戻すまでを確認した。本実験に使用した練習船「深江丸」の写真を図7に、自動操船時の様子を図8に、実験時の船橋内の様子を図9に示す。



図7 検証実験に用いた練習船「深江丸」

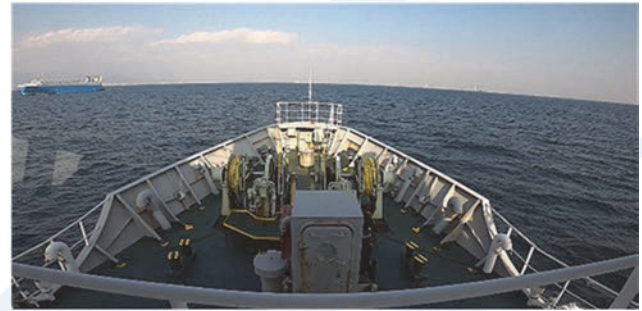


図8 大阪湾でのAIによる避航操船の様子



図9 実船実験時の船橋内の様子

自動操船の検証に際しては、設定されたウェイポイントに向かってオートパイロットで航行し、衝突の危険が生じた場合に、AIの方位指示によって衝突が適切に回避できるかを確認した。実験結果の一例を図10-11に示す。図10のように、相手船がバンパー外にいる状況から自動操船を開始した場合は、外側の外洋バンパー内に相手船を侵入させないように避航操船を行った。また、反航船との衝突リスクが回避された後に、原針路に復帰する結果が得られた。図11のように、相手船がバンパー内に存在する状況から自動操船を開始した場合は、内側の幅狭バンパー内に相手船を侵入させないように避航操船を行うことが確認された。幅狭度合いに応じて適切な避航操船が得られたのは、衝突危険度に応じて異なる負の報酬を与えた2重バンパーの採用によるものと考えられる。

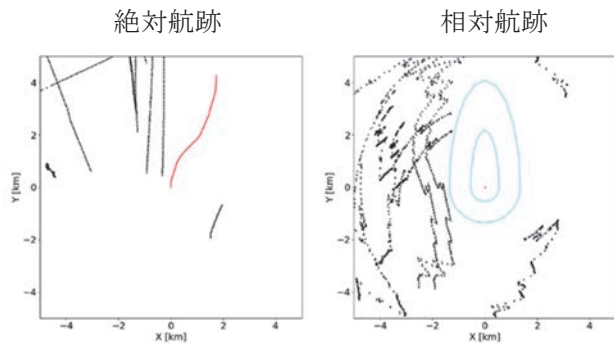


図10 AIによる自動操船結果
(バンパー内に相手船が存在しない状況から開始)

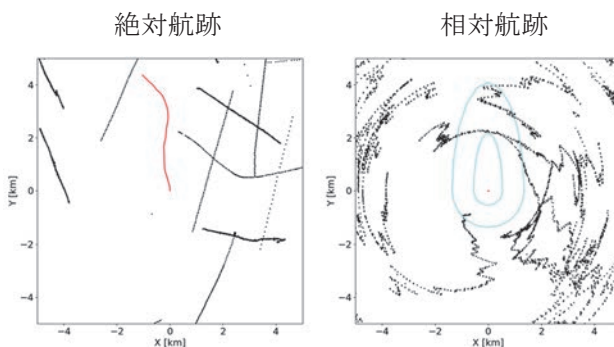


図11 AIによる自動操船結果
(バンパー内に相手船が存在する状況から開始)

一般商船に加えて操業漁船や浮標が存在する非常に輻輳した海域での実験であったが、AIによる針路指示により、適切なタイミングで相手船との衝突を回避し、周辺状況が許せば元の針路に復帰することが確認できた。実船実験では、各種センサー情報がAIに引き渡されるまでのタイムラグや、AIによる針路指示に対して実際に舵が動作するまでのタイムラグが存在し、自然外乱やオートパイロットの小刻みな操舵による不規則な方位の揺れが存在するなど、シミュレーションのように理想的な環境ではなかったものの、総じて、陸上で実施した操船シミュレータによる事前検証と類似の操船結果が得られたことは大きな収穫といえる。

7. おわりに

深層強化学習にもとづく自動避航AIとオートパイロットを組み合わせた自動操船システムを開発し、操船シミュレータによる検証を経て、大阪湾において実船試験を実施し、AIの針路指示による輻輳海域での自動航行試験に初めて成功した。実船実験においても、事前の操船シミュレータ実験と類似の操船結果が得られたことから、今後のAI改良と評価はシミュレーション／シミュレータを中心に進める

ことができる。一方、本格的な実用化に向けては、AIによる操船指示の見える化を強化し、乗組員がAIの意図を理解し、追認することができるようなマンマシンインターフェースの開発が望まれる。今回は衝突危険度が見合い状況に寄らない固定のバンパーモデルを用いたが、AIによる自動操船実験が成功裏に終わったことで、これからは衝突リスクが動的に変化するような海技士の判断に近い出力を返すAIの検証・導入が進むものと期待される。

実船実験を通じて得られた知見と経験を活かして、自動航行技術の早期実用化を実現し、人的要因による海難事故の防止や船員の労働環境改善を図ることで、内航船の省力化・安全化に貢献していきたい。今回の実船実験の成功が、今後の自動運航船の研究開発の一助となれば幸いである。

謝辞

AIによる自動操船システムは、国土交通省交通運輸技術開発推進制度の採択課題「人工知能をコア技術とする内航船の操船支援システム開発」（平成30年～令和2年度）の一環として開発・検証したものである。AI開発と実船実験システム構築の一部は、JSPS科研費（20H00284）の助成を受けた。「深江丸」の船内システムに関しては神戸大学の若林伸和教授から多くの助言を授かった。最後に、本研究にご協力頂いた全ての関係者に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Graves, A., Antonoglou, I., Wierstra, D., Riedmiller, M., Playing Atari with Deep Reinforcement Learning. Tech. report. Deep. Technol. arXiv1312.5602 [cs.LG], 2013.
- 2) Shen, H., Hashimoto, H., Matsuda, A., Taniguchi, Y., Terada, D., Guo, C., Automatic collision avoidance of multiple ships based on deep Q-learning, Applied Ocean Research, Vol.86, pp.268-288, 2019.
- 3) 井上欣三, 操船の理論と実際, 成山堂書店, 2011.
- 4) Watanabe, T., Wakabayashi, N., Urakami, M., Terada, D., Development of Track Control System utilizing Heading Control System for Ocean Observation Sailing, Proceeding of the 27th International Ocean and Polar

Engineering Conference, pp.530-531, 2017,
San Francisco

- 5) 原潔, 長澤明, 中村紳也, 海上交通状況に関する操船者の主観的危険度評価, 日本航海学会論文集, 83, pp.71-80, 1990.
- 6) Nakamura, S., Okada, N., Development of Automatic Collision Avoidance System and Quantitative Evaluation of the Manoeuvring Results, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 13(1), pp.133-141, 2019.

MEGURI2040を通じた技術開発への挑戦

— 安全運航・労務負担軽減に向けて —

鈴木 武尊*

1. はじめに

大量の物質を一度に輸送できる船は、環境負荷の低い輸送手段として、モーダルシフトの担い手である。島国であるにも関わらず、日本は経済成長と経済のグローバル化により、いつでもどこでも欲しいものが手に入る世の中になって久しい。外航海運会社は、海外から原料や物品を国内に輸送し、国内の物品を海外に輸送する。内航海運会社は、これらの貨物を含めた国内発着貨物の輸送に従事する。海外とのサプライチェーンの一翼を担い、国内物流を支える生活インフラである内航海運業が、人口減少や陸上とは異なる特殊な就労環境に拠り、人手不足に直面していることは新しいことではない。環境破壊・気候変動が大規模・高頻度化して行く中、資本主義社会を見直す議論が世界中でされているが、長年構築され使われ続けてきたシステムを急に変えることは現実的ではないように思われる。とすれば、人々は米国からの豚肉も、メキシコからの塩も、オーストラリアからの鉄鉱石も、意識するかしないかに関わらず必要とし続け、その供給インフラとしての内航海運業は今後も必要な存在であることは自明である。安定的な輸送サービス提供の為、及びモーダルシフトの推進のために、船員の労務負担軽減による職場環境の改善と、もう一つの課題である不適切な操船や見張りの不十分に起因するヒューマンエラー予防による安全運航の向上に取り組む必要がある。

今回、同じような危機感を持つ日本財団よりMEGURI2040プロジェクト活動の一つとして助成金を受け、内航船社やメーカー、エンジニアリング会社等とコンソーシアムを組み、無人運航船実証実験を進めることで、その技術が上記課題への一つの解となるか見極めたい。

尚、筆者は、入社後コンテナ船部門を始めとした損益部門での営業活動や調達業務、他社に於いてロジスティクス事業立上げ等を主に行っており、技術背景を持ち合わせているものではない。船社の生き残りや事業拡大、サービスの差別化の観点から、本技報を執筆させて頂くこと、ご了承願いたい。

2. MEGURI2040プロジェクト

船員の高齢化による船員不足と、ヒューマンエラーによる海難事故、内航海運業界が抱える課題に対して、無人運航船が実現することにより、これらの課題を解決することを目指して2020年2月より始動した、日本財団主催プロジェクト。2021年度末迄に実証実験を行う。

2.1 内航船船員不足の現状

国土交通省に拠ると、内航船員は28,435名(2019年時点)と云われているが、年齢構成を見ると、50歳以上が半数近くを占め高齢化が進んでいる¹⁾。また、60歳以上が35%以上に上り、これらは数年のうちに退職予備軍となっている。一方で、30代未満の船員比率は20%に届かず、若年船員の成り手は少なく、船員不足は慢性的な構造的問題となっている。内航船員は、同業者同士での引き抜き合いを生み、1人の退職船員に対して数十社がスカウトをかけるという状況である。内航船員の退職理由の35%が、在社1年未満の自己都合という統計結果にもそれが表れている。結果、各社が船員の頭数の確保を最優先課題と捉え、安全運航が棚上げされ、事故減少に繋がっていない。

こういった背景の中、船員の職場環境については、船員室の改善、トイレやシャワールームの充実、Wi-Fi完備、新規航海計器導入等ハード面での充実を進めているものの、船員の絶対数不足により、交代要員の不足に伴う乗船期間の長期化や総労働時間の増加など悪化している面がある。船主にとって、船員の労務負担軽減への努力は、最優先事項の一つであり、航海中の自動化・自律運航が実現すれば、1ワッチ〜2ワッチでも当直を減らすことによる船員の船内生活の安定、労働時間減に繋がることが期待される。

2.2 事故要因

海難事故原因は、見張り不十分、操船不適切、船位不確認、気象不注意、水路調査不十分等のヒューマンエラーが大半を占める²⁾。ヒューマンエラーは何故起こるのか。一言で言えば「人間だから」、ではあるが、もう少し分解すると、人間故の錯覚・

* 株式会社 商船三井

思い込み、集中力の低下、深く考えない、想定外シーンでのパニックになる等が考えられる。対策として、船員教育や各種キャンペーン、つまり人に対するアプローチを行ってきているが、ヒューマンエラーは無くならない。「人間なもの」と諦めるのではなく、機械化・自動化によってヒューマンエラーの発生を防ぐ取組みが必要であり、今回のプロジェクトでは、技術面での検証を行う。

2.3 当社参加目的

船員不足の話こそないが、船員の労務負担軽減と安全運航は外航海運業界に於いても大きな課題である。これらの課題を解決することで、外航・内航を問わず、安定的なサービスを継続提供と、海上輸送の需要喚起の為に、本プロジェクトの参加を決めた。

3. 実証実験概要

既存内航船に対する自律運航システムのレトロフィットを行い、離岸から着岸迄、無人での運航実験を試みる。但し、実際には通常通り船員が乗船する。現行法においては船員の搭乗要件が規定されており、無人運航における責任に関する特別な扱いも存在しないため、実証実験においては、船舶の運航責任は船長であり、船長判断でいつでも実験中断・中止が実行されるものとする。そして、実験中は自律運航から速やかに通常の手動運航に切り替え可能なシステム及びオペレーションとする。

2020年2月からプロジェクトを開始し、要素技術の開発や検証を実施しながら、2021年後半から2022年初頭に実海域での実証実験を計画している。

3.1 実証実験船

モーダルシフトの牽引役である大型カーフェリーである「さんふらわあ しれとこ」(商船三井フェリー(株)保有・運航)と、内航海運主力サイズである749型コンテナ船「みかげ」(井本船舶(株)保有、井本商運(株)運航)と、サイズ・タイプの異なる2船にて実証実験を行う。夫々の実証実験航路は、苫小牧港から大洗港迄の400mileと敦賀港から境港迄の145mileの実海域とする。

表1 実証実験船・実験航路概要

船名	さんふらわあ しれとこ	みかげ
船種	カーフェリー	コンテナ船
総トン数	11410t	749t
LOA	190.0m	95.5m
Beam	26.4m	13.5m
Draft	6.85m	3.8m
プロペラ	CPP x 2基	CPP x 1基
スラスト	BT x 2、ST x 1	BT x 1
商業航路	苫小牧港⇄大洗港	various
実証実験航路	苫小牧港→大洗港(400mile)	敦賀港→境港(145mile)



図1 「さんふらわあ しれとこ」



図2 「みかげ」

3.2 技術開発

自律運転は、認識・認知、判断、制御(操作)により実現される。各種センサからの認識情報(他船、ブイ、障害物)などの位置、進路、速度、自船からの方位の推定、それらの情報を統合するセンサーフュージョンが認知となる。判断・制御は、船員による計画航路、自船周囲の他船の予測行動と海図情報に基づく避航経路候補の生成及びその評価、航路・経路追従制御で構成される。

本船による認識・認知部分の技術開発を古野電気(株)が、判断・制御部分の技術開発を三井E&S造船(株)が担う。尚、係船支援技術として、UAV(Unmanned Aerial Vehicle)による本船から岸壁へのヒービングライン投下技術は、(株)A.L.I. Technologiesが開発する。

表2 開発技術分野・担当概要

	認識・認知	判断	操作
開発者	古野電気(株)	三井E&S造船(株)	
港外	自船周囲認知システム		避航操船自動化
港内			港内操船自動化
	離着岸支援システム		離着岸自動化
	係船支援システム(株)A. L. I. Technologies		

各技術に対して、ユーザーである船社・船員によるフィードバックを重ねて、精度を高めているところ

ろである。

3.3 安全性担保

(株)ClassNKコンサルティングサービス・(一社)日本海事検定協会を起用し、HAZID手法によるリスク評価を実施した。実験船2船に対して、①無人運航船のオペレーション及び新技術のレビュー、②無人運航船に関わる潜在的なハザードの洗い出し、③リスク解析による現状の安全対策の有効性の確認及び④必要に応じた追加のリスク制御対策を講じた。実証実験時に、ハザード発生時に確実にフォールバックが実施されるように、船員が容易に参照できるような簡易版マニュアルを作成する。

一方で、避航操船自動化技術、港内操船自動化技術、離着岸自動化技術は、MOLマリン&エンジニアリング(株)の3D操船シミュレータで避航動作の検証を行い、改善点を洗い出し、対処した後実験船での実証実験を行う。

3.4 協力体制

今回のように、実際に商業運航されている船を使った大規模な実証実験には、多くの方々の協力体制が必要となり、そこをコーディネートするのが船社の役割でもある。

コンソーシアムメンバーは勿論のこと、国土交通省、海上保安庁、各港の海上保安部、港湾管理者、港湾管制、漁業協同組合、港湾を利用するクルーザや釣り船の利用者等多くの方々に対して、本実証実験の説明を行い、理解頂き、協力を得られることとなった。

4. 直面した難しさ

日本財団の助成条件が、既存の内航船を使つての実証実験であったため、商業運航している本船のスケジュールを調整して、機器設置の為の入渠や要素実験の予定を組むこととなった。船主・運航者である、井本船舶(株)・井本商運(株)、商船三井フェリー(株)は、目の前の商売と未来の可能性への投資の間で、判断頂き、実験準備のために本船スケジュール調整で多大なる協力が必要となった。

また、「みかげ」については、実証実験時に複数のエンジニアや関係者が乗船することとなる。定員を超える乗船者数となるために、一時的に定員を増加する臨時航海手続きを行う必要が生じ、本船の居住区の改造や救命艇・救命胴衣の追加設置を行った。

3D操船シミュレータでの実証実験では、シミュレータから出力される信号周期が、自動操船モジュールの信号周期と異なっていたため、思うような制御ができないこととなったが、装置の改修を行うこ

とによって無事に解決している。

5. 分かってきたこと

実証実験は最終年度である今年度に行う予定だが、現時点で判ってきたことを以下記載する。

5.1 システムの視点

一つ目は、船員視点と実験で利用するシステムの視点の違いである。着岸時のオペレーションを例にとろう。マスト灯のような船の構造物の一部と陸上の目印との間の距離や角度を見て、自船の状態(船位、侵入角度、岸壁までの距離等)を把握している船長等の人間に対して、システムは、船首や船尾、船橋から岸壁まで距離や角度を各種センサ情報として利用し操船を行う。前者が内在的視点、1人称の視点であるのに対して、後者は目的或いはシステム設計から逆算した外在的視点である。全く別の視点で船の状態を把握することに対して、人間はその評価の術を知らない。普段の視点とは違う数値が何を意味するかは分かっても、自身の操船にその数値を使用することはない。故に、その妥当性・安全性の評価を人間(海技者)が行うことが出来ないのが理屈である。船長に拠っても参照する数値や目安は異なるので、人間同士でも評価は難しい。

5.2 操船方法の評価

となると、評価の対象となるのは、それらセンサ値を受けての自船の動きとなる。これが分かってきたことの二つ目である。どのタイミングで舵を切るのか、舵角は何度とするのか、何分後にどの位置にどのような姿勢でいることを目指しているのかを評価することが適当となる。しかし、ここで一つ問題がある。操船方法も船長によって異なるため、評価基準は「受け入れられる」操船方法かどうかとなる。受け入れられるものがbestである可能性はあるものの、評価基準はacceptableであるかどうかである。つまり、システムが提示する計画や動きが最適かどうかの評価することはできないという事であり、システムの数だけ解が存在するということになる。同じシステムでもロジックやパラメータ調整を行う度に解が変化するということになる。どうやら、無人運航を含んだ自律運航とは、人間くさい部分があるようだ。人間には間違いがあるように、システムにも間違いがある可能性すらある。それを判断するためには、どのような計画をたて(未来)、どのような状態にある(現在)が分かるようなHMI(Human Machine Interface)が必要となる。HMIは人間とシステムの意思疎通のツールであり、本船上での利用に加えて、遠隔監視には必要不可欠なも

のであると同時に、システムの向上にも必須のものとなる。

5.3 センサによる認識・認知

話をセンサに戻そう。様々な統計が、事故原因の大半がヒューマンエラーであると示している。その中でも、見張りを行っていなかった、他船や障害物の見落とし・見誤りがあったといった見張り不十分がその原因の多くを占めている。視認度合いや海域に応じて、航海士は目視とRADAR・ECDIS等航海計器の監視による見張りを行っているが、得てして、ベテラン航海士の方が確実に他船や障害物を認知するようだ。これを勘と表現する人もいるが、経験である。晴天時、雨天時、夜間に対象物がどのように見え、どのような動きをするか、自船の動きに対してどんな反応をするか、近くに陸地はあるか、付近の水深はどうか等、複数の情報を総合的に判断する経験を重ねることで、対象物が船であるかそうでないかを認知することができるようになる。経験の少ない若手航海士には、当然難しいことである。

一方で、この環境下でのこの見え方は〇〇であるというパターンを記憶し、確率計算を行うのがコンピュータである。夜間や濃霧等の視認性が低く、人間では苦手とする環境では、優れた認知を行う可能性が高い。一方で、ベテラン航海士のレベルで認知を行うには、既述の通り複数の情報から総合的に判断を行う機能や、時間の経過とともに変化する情報から、一旦下した判断に修正を加えることができる機能等の人間が行っている認識・認知と同様のロジックを実現するアルゴリズムの開発が必要だと考える。三つ目の発見である。

5.4 センサ技術に対する投資

では、どのような種類のセンサを付ければよいのか、どれだけの数のセンサを付ければよいのか。付ければ付ける程、コストが嵩むために、大きな効果が目に見えない限り、導入のインセンティブが働かない。大きな効果は、センサそのものではなく、認知、判断、操作にまで範囲を拡げて、如何に安全運航に寄与するか、如何に船員労務負担軽減に寄与するかを提示することが必要となる。現実的には、既存のセンサに加えて付けることのできるセンサは限られているだろう。

センサで取り込めない潮流や波浪の情報をどのように推定するか、これも課題の一つである。人間が感覚で行っていることをシステム化するには、アルゴリズムを開発することで推定できるかもしれない。入手するセンサ情報を選び、認知・判断・操作に活かす体系的な設計を行うシステムインテグレーションが必要だということが、本プロジェクトを通して

分かってきた、四つ目のことである。

5.5 開発から検証にかかる時間

五つ目は、実験を行うには実に多くの時間が掛かるということだ。船は車と異なり一船毎に仕様が異なる。同じ設計図から製造した姉妹船であっても、船台が異なれば、全く同じ性能の船となる訳ではない。これは、同一性能のモデルを大量生産する車が発売前に多くの時間とモデルカーを費やして、性能テスト・耐久テストを行う自動車業界とは対照に、少量生産で製造期間が長く、個体当たりのコストが高い船に対して、船体模型を使った水槽試験やCFDによる船型開発・性能評価を行わざるを得ない海事業界の事情に起因している。つまり、一つの認知システム、一つの判断システム、一つの操作システム、それらをまとめた自律操船システムは、必ず個船毎の調整作業が発生する。個体毎の調整作業は車であっても同じかもしれないが、違いはそのタイミングと期間にある。上述の通り、車は発売前に新機能を十分に評価する。濡れた路面、視界の悪い環境、強風時、高温が続く環境、湿度の高い／低い環境、ありとあらゆる環境でのテストが行われ、テストに合格したモデルが発売となる。船の場合は、性能評価や耐久性評価が実質実船にて行うこととなるため、竣工後の調整となる。加えて、環境が異なる度に調整の必要が出てくる可能性があり、その度に運よくエンジニアが便乗していない限り、どんな場面でも使える商品となるには時間を要する。短期間で商品化し普及するには、『海事産業将来像検討会 報告書』でも言及されているように³⁾、船毎の最適なモジュールの組み合わせが判断できる程度のシステムインテグレーションのレベルアップを図り、様々な環境下での再現性の向上を目指す必要があるのではと考える。

6. 所感

MEGURI2040が開始され、早1年以上が経ち、色々なことが分かってきた。やってみなければ分からないことだらけであり、今後取り組むべきことが見えてきた。これらを一つずつ解決して、今年度後半の実験時にどのような状態になっているのか、今から楽しみである。

一方で、冗長性の担保、他船や航路管制との意思疎通及び相互協力による他船を含めた安全確保、機関部の自動化等検討しないといけない問題が山積している。最大の難関は経済合理性である。つぎ込んだコストに見合うだけの成果が得られるかということは、古くて新しい問題である。操船者が担ってい

る機能を分解し、分解したタスク毎に自動化しようとするのであるから、当然コストが掛かる。図3を使って話をすれば、外部情報を目や耳ではなく、新規開発した或いは既存のセンサで取得し、センサ値の取捨選択・補正・統合を行うシステムを開発し、それを基にどんなアクションをとるか判断するアルゴリズムを開発し、操作を指示するシステムを設置することとなる。また、それぞれの機能の精度を高めるために継続的な投資が必要となる。普及とコストダウンはニワトリ・タマゴ問題と言い切れるのか、コストを下げるのには異なるアプローチが必要なのか、運航レベルをどこに置くかの問題なのか、目的によって変わってくるものなのか。自動運航技術が実用化されている航空業界にヒントがあるかもしれない。飛行機のパイロットが、着陸時にオートパイロット機能を使わずマニュアル操作をしていることにどんな理由があるのだろうか。陸上設備によってはマニュアル操作しかできない空港があるのだろうか、パイロットの訓練の為か、事故が発生した際の最終責任をパイロットがとる為に、リスクの高い着陸の場面で機械任せにできないという心理が働くからか。未だ世間に存在しない無人運航というコンセプトに対しては、技術的・心理的な壁はより高く、その壁を正確に把握し、正面から対応する必要があると考える。使ってもらえない技術は廃れる。開発者の自己満足ではなく、実際にユーザーが使うシーンをイメージし、一つ一つ対応をしていくことが技術を利用してもらえ近道だと考える。

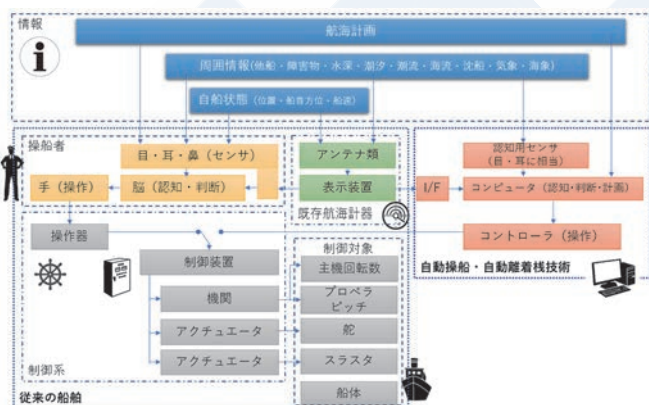


図3 既存運航船との違い

7. 結びに代えて

およそ技報に相応しくない散文的な寄稿である。タイトルから、羊頭狗肉であるとの批判もあろうかと思うが、甘んじて受けさせて頂きたい。一方で、今回の執筆は、船会社として何故このプロジェクトに参画しているのか、どんな役割をこなしているの

かという、読者の素朴な疑問に少しでも応えられるものであったなら幸いである。

筆者の所属する㈱商船三井 スマート SHIPPING 推進部の研究開発スタンスはオープンイノベーションである。自社だけではできないことを、それぞれの強み、役割を持ったものが集まって新しいモノを生み出す。それが参加会社や船員、社会の為になる。そう信じてこの研究開発を進めている。とは言え先立つものがないと、大きなことができない。やってみないと分からないことがある、歩き始めないと見えない景色がある。今回は、日本財団にそのきっかけを与えてくださった。コンソーシアムのメンバー各社の熱意と協力に応えられるように残りの期間を歩んでいきたい。

謝辞

MEGURI2040プロジェクトの助成により、技術開発の機会を頂いた日本財団に衷心より感謝申し上げます。

また、コンソーシアムメンバーは勿論のこと、国土交通省、海上保安庁、各港の海上保安部、港湾管理者、港湾管制、漁業協同組合、港湾を利用するクルーザや釣り船の利用者等多くの方々に協力を頂いた。良き理解者・支援者がいて初めて実験ができることを強く意識し、ここに感謝の意を表したい。

船主・運航者である、井本船舶㈱・井本商運㈱、商船三井フェリー㈱には、実験準備のために本船スケジュール調整で多大なる協力を頂いた。特に船員の方々は、休暇や休憩時間を実証実験等に割いて頂き、改めて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本船主協会：SHIPPING NOW 2020-2021
- 2) 海上保安庁：令和元年 海難の現況と対策
- 3) 国土交通省海事局：海事産業将来像検討会 報告書

自動運航技術の開発

— MEGURI2040 無人運航実証実験プロジェクト —

井上 総一郎*, 森 英男*

1. はじめに

船舶の運航に関しても、運航支援や自動化に対する技術開発ならびにIMOでの法整備が進められている。また我が国の内航海運においては、船員の高齢化、将来の船員確保の問題は喫緊の課題であり安全性向上とそれにつながる乗務員負荷低減ならびにコスト競争力強化には継続的に取り組む必要がある。そのため、国土交通省等においても運航支援・自動運航に関する各種事業がなされており、当社においてはこの度日本財団との技術開発共同プログラム事業にて無人運航の実証実験を実施する事となった。

当社では1980年代より、SUPER ASOS (Advanced Ship Operation Support System) や Super Bridge-Xといった運航者のための支援システムを製品化してきた経験があり、今般の実証実験では(一財)日本海事協会(NK)の「自動運航、自律運航の概念設計に関するガイドライン(暫定版)」の分類Ⅱレベルをめざし、AIや画像処理、クラウド利用等の最新の各種技術を大型フェリーに搭載し、無人運航を目指した自動運航技術の開発と検証を行う。

開発内容は、

- 1) 入出港・離着岸および航行の自動化
- 2) 就航中機関室監視および運航情報の陸上監視である。

2. 実証実験の範囲

本実証実験プロジェクトは2020年2月から2022年3月までの約2年間で、乗員配置の上で自動運航による操船実験を実施するもので、基本的には乗員によるフォールバックを前提としており、おおよそNKガイドラインのレベル2相当をターゲットとして開発を行っている。システム設計の段階においてNK殿によりリスクアナリシスを実施し安全な実証実験のための各種条件、事前準備及びODDの明確化を行っている。今般の実証実験では、実験用に開発された各機能についてその有効性、性能限界さらに今後の改良についての課題抽出を行う。

実験は、出入港、幅員海域航行、外洋航行において各周辺状況下での試験を実施し、機能、精度、各装置のシステム連携、船体運動制御、海象・気象影響、通信、機関室監視、陸上監視の有効性の検証を実施する。

3. 装備

3.1 本船概要

本船は国内航路の大型長距離フェリーで、推進装置に、2軸CPP、2舵及び船首・船尾にサイドスラスタを備えている。主要目と主要推進装備を表1に示す。

表1 本船概要

船舶所有者	新日本海フェリー株式会社
船舶運航者	東京九州フェリー株式会社
造船所	三菱造船株式会社
起工 就航	2020年8月 2021年6月末
総トン数(トン)	約15,400
載貨重量(トン)	約5,440
満載排水量(トン)	約18,000
搭載車両数	12メートルトラック154台 乗用車30台
旅客定員数	268人
船の寸法	L(長さ)= 約 222.5 (m) B(幅) = 約 25 (m) D(深さ)= 約 20.4 (m)
計画速力(ノット)	28.3



3.2 自動運航装備

今般の実証実験プロジェクトにあたっては、自動運航用に開発された装備を、本船が備えている装備に追設する事で実施する物であって、自動運航にあ

* 三菱造船株式会社

たつての完全な装備を備えた船舶を建造する事は行っていない。本実験用に装備する装置群はスマートフェリーシステムと称し、その配置概要を図1に示す。

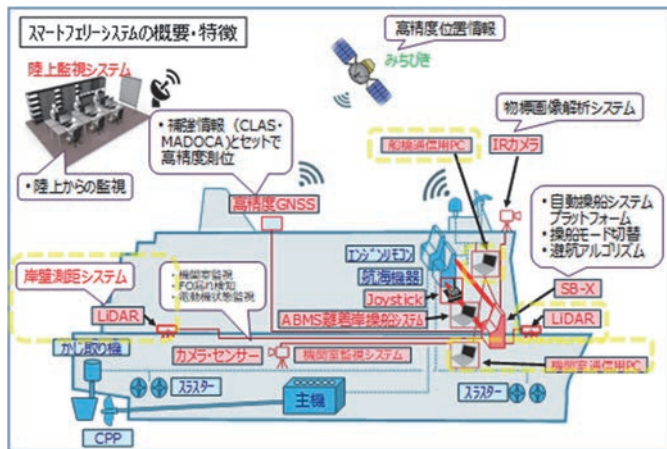


図1 スマートフェリーシステム装備配置概要

4. 各装置の機能

無人運航実証実験のシステムを構成する機能は、航海に関するものとして、他船認識・自動避航・自動離着岸の機能、また推進機器や補器類より構成される船舶のプラントの状態監視を遠隔で行う遠隔監視の機能が必須となる。本プロジェクトとしては、各装置のプロトタイプを搭載し、実証実験により実海域での各装置の有効性と、獲得されたデータによる開発課題の抽出を行ってゆく。

開発された各装置の機能概要を表2に示す。

5. 開発技術の特徴

開発は、AIや画像解析技術を用いた部分と本船の設備・装置との融合を図り船舶を操船する事と、当社およびグループ内に保有されている予兆診断技術を船舶に応用する事で早期の開発を実現した。

表2 スマートフェリーシステムにおける開発装置の機能概要

機能	対応システム	概要
他船認識	物標画像解析システム	複数の望遠カメラと広角カメラにより前方を撮影。得られた画像を、AIによる画像認識にて、船舶、ブイ等の認識を行いモニター表示する。認識された対象物標においては、その方位・距離および移動速度・移動方位を画像より算出し表示を行う。 レーダー、AISに加えて対象物の認識を強化する。
自動航海	自動操船システム	設定された航路、時間をトラッキングする操船を行う。
自動避航	自動操船システム	他船とのTCPA/DCPAに加え、自船・他船の周囲に想定した四角形に基づき、運航モード（定常航海、狭水道等）に応じた避航要否の判断、避航要の場合の避航/復帰航路作成、転舵（モードにより要すれば減速）指令を発令する。
自動離着岸	離着岸操船システム	設定された港湾の入出港航路を、高精度GPSデータ、ジャイロデータを参照し、AIシステムによるアクチュエーター制御によりトラッキングする。
岸壁測距	岸壁測距システム	船側に設置されたLidarにより岸壁との距離、相対速度、相対角度を算出し表示。距離と速度に対しアラーム発出用に使用。
遠隔監視	FO漏れ検知システム	配管からの燃料漏れを画像解析により検知。
	電動機状態監視システム	電動機の電流を監視、トレンド解析を行い電動機の異常予測診断を行う事に使用する。
	陸上監視システム	操船情報及び上記を含む機関部プラントの情報、さらに船内で得られる機関部警報を、運航事務所等陸上へ送信し陸側から本船状態を把握する。蓄積されたデータは、長期分析により本船の異常予測やメンテナンス用データとして分析に用いる。

以下に各技術の特徴を記す。

5.1 物標画像解析システム

赤外線カメラにより前方を撮影、得られた画像をリアルタイムで自動分類する。港湾や海峡通行船を撮影し約10000点の学習データでAI機械学習を行い基本システムを構築した。分類は、船舶、ブイ、漁業器具、その他と仕分けしている。これらの学習データは実証実験中も逐次取得追加する事も可能である。



図2 物標画像解析システム

さらに、これらをレーダーとAIS情報に加え避航操船情報に用いるため、対象物との距離、方位、移動速度、移動方位を画像より計算する特徴を備えている。さらに船舶動揺・姿勢変化に対応する補正機能も備え、画像による諸数値演算の精度向上を図っている。各データは、自動操船システムにおいて適切なデータ融合と分離を行い避航対象物の設定に用いる。

また、解析結果を表示するグラフィカルなGUIも備えている。

5.2 自動操船システム

操船者への情報支援である当社の航海支援システムを大幅に機能改良し、無人航行可能な設定航路の自動トラッキングと到達目標時刻設定による船速制御、自動避航航路作成と避航操船を行えるシステムとした。



図3 自動操船システム

当システムは電子海図情報を内蔵し、通常航海中は設定航路に対し自船と設定航路の偏差を少なくするように航行するトラッキング機能を備え、また電子海図の安全等水深線を設定する事により自動で浅海域を回避する航路を構築し、本船のオートパイロットやCPP遠隔操縦装置を適切に制御し操船を行う。

自動運航技術にとっての重要な課題である衝突回避に関しては、レーダー、AIS、画像解析による認知対象物に対し全てを演算し回避航路を策定するもので、その範囲や避航の設定にあたっては、航行モードすなわち定常航海、内海、狭水道、港内モードにより避航範囲と減速を含む操船パターンを変更している。

避航航路の設定機能は、全対象の最接近時間・距離演算や海上衝突予防法を基本としているが、特に今般は、内航大型フェリーの特性を踏まえるため、開発段階において多くの行き会い想定パターンをシミュレーションしながら、運航者・船長のご意見を伺い避航のアルゴリズムに、前方後方両舷行き会い距離、幅員海域での避航パターンの優先順位重みづけ等の要素を織り込んでおり、より実際的な避航航路が作成可能になっている。

5.3 離着岸操船システム

大型フェリーにとっての入出港は、限定された港湾内の範囲で、安全且つ精度の高い操船が求められる。本プロジェクトでは、それらを成立させるために、以下のような構成を用いることとした。

- 1) 準天頂衛星システムと高精度測位補正(MADOC)による、高精度な船位の把握
- 2) 実港湾を対象とした、船長による、船位・方位・船速等操船情報を、設定入出港航路データとして使用
- 3) 上記船長航路をトラッキングする、AIによる操船システムがアクチュエーターを操作

1)及び2)により、安全且つ高精度が確保され、トラッキング機能に関して3)AIを用いたアクチュエーター制御を使用する事で、外乱などに対するロバストな制御が可能となっている。

このAIシステムは、航路からの逸脱量を最小化するためのアクチュエーター制御を行う様深層強化学習手法により開発されたものであり、このような離着岸手法はこれまで国内外で報告例は無い新たな機構である。

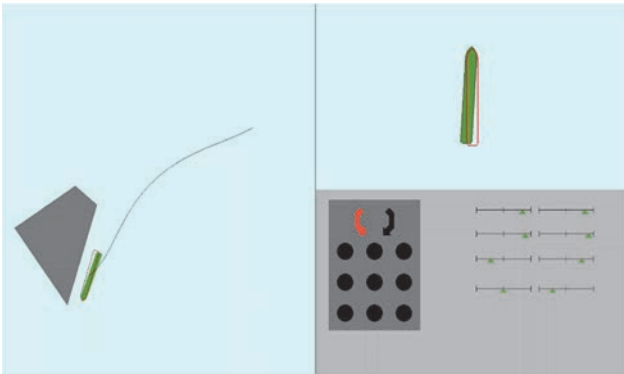


図4 離着岸操船システム シミュレーション

また大型船においては、操縦に対する応答把握、すなわち船体運動モデルが重要であり、そのため、当該船模型を使用した水槽試験による運動パラメータの取得を行ったうえでシミュレーション用の運動モデルの構築を行い、離着岸操船システムの開発を実施、さらに開発されたシステムを用い模型実験で実際の入出港操船を行う事で精度の検証を行った。さらにシミュレーションや模型実験において、風、波に対する制御のロバスト性も検証を実施した。



図5 離着岸操船システム 模型実験

5.4 岸壁測距システム

小型Lidar装置を船側の前部後部に設置し、岸壁に向かって照射する事により、中～近距離での船体と岸壁との相対距離、相対速度（船体の岸壁への近接速度）と相対姿勢を計測と演算にて求めるものであり、主として近接時のアラームとしての使用を想定した。今回は、任意の港湾での使用が可能となるように船体側に取り付け、且つ波浪ダメージを避けるため、海面からの高さを確保できる主甲板高さに取り付け、中距離から1mまでの近距離に適用可能な照射角度と演算手法の開発を実施した。

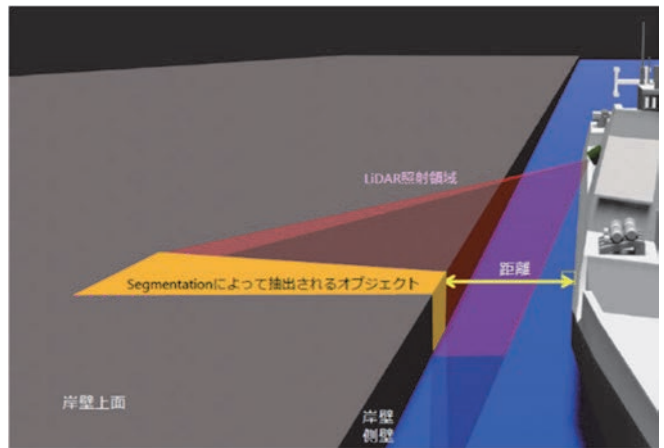


図6 岸壁測距システム概要

5.5 FO漏れ検知システム、電動機監視システム

将来の自動運航・無人運航を考えた場合、航海操船の自動化と並び船舶の各機器の故障に対する対応が必須である。機器の自動修復は物理的に不可能であり、またすべての機器の二重化も経済的にもスペース的にも現実的ではない。このことから、予防保全を行えるような仕組みが必要であり、そのための状態監視のシステムと陸上での監視がカギとなる。

FO漏れ検知システムは、機関室の火災防止において最重要課題である燃料漏れを、画像解析により検知するシステムである。システムは、カメラと画像解析演算部からなるシステムで、狭隘部にも容易にレトロフィット可能なものとした。画像解析部は、正常状態の学習により、異常状態としての燃料漏れを検知するもので、実環境の照度に合わせ、感度や検知閾値を設定した。



図7 FO漏れ検知システム

電動機監視システムは、陸上発電プラントでの技術を応用し、電動機からの電流を計測する事により異常予知を行うシステムで、継続的なデータ観測により精度の高い予知が行えるシステムとなっている。



図8 電動機監視システム センサ一部

また、本船の推進プラントのデータをM0チェックリストに倣いデータ化する事によって、本船プラント特性から予防保全につなげるデータ蓄積も実施する。

5.6 陸上監視システム

自動運航・無人運航には、陸上からの監視と支援が必須となる。本船上で取得された航海関係各センサー類のデータと機関部警報およびデータログは全てクラウドサーバーへデータとして送信され、ウェブページにて閲覧可能とした。これにより専用端末の有無に拘らず、運航側のどの陸上事務所にても監視が可能となる。

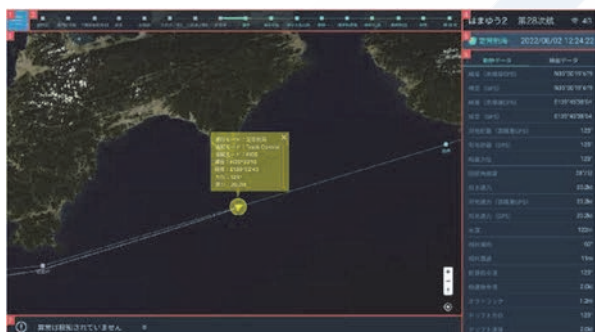


図9 陸上監視システム

さらに、特定端末では、機関室の3D設計データを用い、アラーム発生個所の3Dビジュアル化も可能とした。

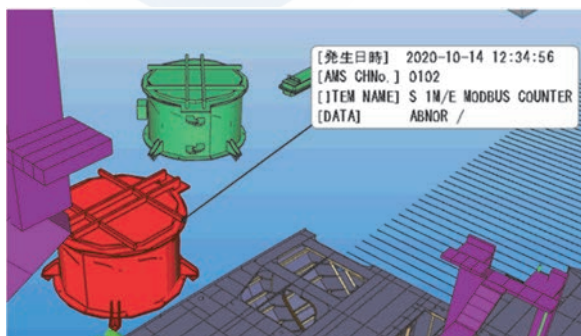


図10 アラーム発生箇所の3D表示

自動運航においての重要な課題としてサイバーセキュリティ問題がある。今回の場合、陸上からの遠隔操船は意図しておらず、本船からはクラウドサーバーへの送信のみとなるものの、各所にサイバーセキュリティ対策を施し、外部専門社によるペネトレーションテストも実施し安全対策の堅牢性を検証している。

6. 実証実験の目的と今後の課題

実証実験においては、種々計測と本船運航者による観察と評価を行い、今後の開発に寄与する。

評価項目としては、①船員操船との比較 ②実船での作動の精度 ③周辺監視装置との合理的連携 ④陸上監視としての有効性 ⑤実海象・気象下でのセンサー類の有効精度と操船精度のロバスト性、となる。

さらに、上記による性能向上とは別に、実用化に向けての今後の課題としては、条件の異なる様々な港湾への対応、船員操船へ近づける制御、装置のコスト低減、カメラの光学的限界とコスト問題、接岸に対する岸壁側との制御連携、船体運動モデルの低コスト且つ迅速な構築手法などの課題を解決してゆく必要がある。

この内、様々な港湾への入出港航路の自動構築手法については、進化計算法CMA-ESを用いたシミュレーション手法のプロトタイプを開発し、今後実用化に向けての検証を進めて行く。

7. MEGURI2040プロジェクト

本プロジェクトは、日本財団の“MEGURI2040”プロジェクトの一環として同財団との無人運航船の実証実験にかかる技術開発共同プログラムとして実施中であり、本船の船舶所有者である新日本海フェリー株式会社様のご協力と、各装置・システム開発においては、大阪府立大学、大阪大学、株式会社ブレインズ、アイディア株式会社、パイオニアスマートセンシングイノベーションズ株式会社、MHIマリンエンジニアリング株式会社、川崎重工業株式会社らの各大学様・各社様のご協力にて推進している。

2020年から2021年6月にかけて各システムを構築、本船搭載とコミッショニングとテストを実施し、本船就航後実証実験を進めて行く予定である。

自律運航船の実現に向けた操船システムの開発

— アプローチ操船制御と自動着岸操船の速報 —

三好 晋太郎*, 五百木 陵行**

1. はじめに

1.1 背景

近年、船陸間通信の高速化に伴いIoTや人工知能(AI)技術等の情報通信技術、処理制御技術を活用した様々なデジタライゼーションの動きが海洋産業分野においても活性化している。その機運の高まりと共に船舶運航の自動化・自律化に関しても、技術開発が加速しており実用化に向けた具体的な動きが活発になりつつある。特に欧州では、自律運航による無人化船について野心的なコンセプトが打ち出され、技術開発に向けた複数の取り組みがなされている。我が国においても、様々な技術開発が進められている。

一方、国内経済における産業基礎物資の輸送の約8割を支える内航海運に目を向けると、ベテラン船員の減少と高齢化が進んでおり、図1内航船員の年齢別構成¹⁾に示す様に50歳以上の割合が37%を超えており、船員年齢層の大きな山は60歳以上へ移行しつつある。また、我が国近海での海難事故においては、人的要因がその7~8割を占めており、輸送品質を確保するためには、ヒューマンエラーの防止による海難事故リスクの低減が重要である。

このように、船員数の不足と高齢化が急激に進んでいる現在、労働環境を改善し、船員の労務負担を軽減することによるヒューマンエラーの防止は喫緊の課題である。

このような社会的背景に対する取り組みの一つとして、船舶運航の自律化を目的とした技術開発が挙

げられ、さらにその先の無人化を目指した日本財団によるMEGURI2040プロジェクト²⁾の始動により、船舶運航の自律化・無人化を目指した技術開発が急速に加速している。

1.2 概要

著者らが所属する三井E&Sグループでも、国土交通省「自動離着岸機能の安全性に係る実証事業」を2018年から3ヶ年計画で(株)商船三井殿及び東京海洋大学殿と共同で実施している。また、公益財団法人日本財団によるMEGURI2040プロジェクトにおいて、「無人運航船@横須賀市猿島」と「内航コンテナ船とカーフェリーに拠る無人化技術実証実験」2つのコンソーシアムに属し、自律操船システムの開発に取り組んでいる。

船舶の運航における操船は、目視、レーダー、及び船舶自動識別装置(AIS: Automatic Identification System)等を用いて収集した周辺航行中の船舶や海域の情報、気象海象条件、機関の運転状況等、及び関連する法規も含めた情報を総合的に評価し、状況判断と意思決定が常に要求される。特に港内操船では、水深や航路等の地形的な制限のもと、低速で航行することにより相対的に外乱の影響を大きく受ける状況下で操縦特性を考慮して、舵、プロペラ、スラストなど複数の操船デバイスを同時に操作することが求められる。

これまでに、約100隻に搭載実績があるジョイスティックを用いたシステム操船装置(Mitsui ship Maneuver control System, 以下MMSという)やDPS (Dynamic Positioning System)³⁾の開発に携わっており、操縦運動及び制御技術、その中でも特に低速での操縦運動制御に関して高い技術を有しており、この技術を活用して自律運航船の実現に向けた操船制御システムの開発に取り組んでいる。

本稿では、操船システムの開発の概要、次に港内操船システムの中で最も難易度が高い自動でのアプローチ操船制御、及び実船を用いて実岸壁に対して実施したアプローチと着岸操船制御について速報としてその一部を報告する。

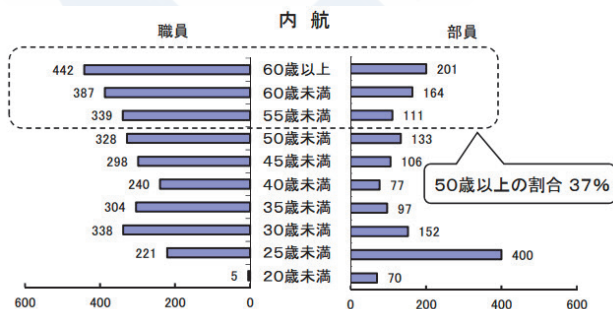


図1 内航船員の年齢別構成

* 三井E&S造船株式会社

** 株式会社三井造船昭島研究所

2. 自律操船システム開発の概要

2.1 条件設定

自律運航を実現するために不可欠な操船システムを構築するために、システムの目的及び目標、運用条件、開発システムへの要求等の条件設定を実施した。その内容を以下に示す。

- 船橋で行われている船舶を航行させるための作業を自動化・自律化するシステムとすること
- 与えられた航海計画をもとにBerth to berthをハンズフリーで航行することを目的とすること
- 常に乗組員が自船及び周囲の状況を把握していること
- システムの限定領域外又は航行の安全が維持できないと予想された時には乗組員によるフォールバックを行うこと
- 陸上からの支援なしでも機能するシステムとすること
- 製品化を考慮したシステムとすること
- 製品コストを抑えるため機器故障等に対する冗長性は考慮せず、フォールバックを要求すること
- 通常の船舶に搭載可能で且つ既存船に搭載可能なこと
- ワンアクションで乗組員が既存の操船デバイスでの操船が可能とすること
- 既存のセンサ・機器からの入力、及び既存のアクチュエータへの出力を前提とし、特にアクチュエータの制御権は常に明確にすること
- 船舶搭載機器の安全を考慮した接続とすること
- 海気象による限定領域は、個船の性能及び航行海域ごとに設定すること

2.2 操船システムに要求される機能

自律運航船を実現するために自律操船システムに求められる機能を抽出するために、乗組員が船橋で行っている作業を調査した。次に調査した作業の中で、前項で示した設定条件を考慮して自律操船システムに要求される機能を抽出し、その機能を実現するための情報の流れなどに注目して、4つ主要なタスクにまとめた。そのタスクを以下に、各タスクに分類した代表的な機能を表1に示す。

- 航海状態制御
- 状況把握
- 自動避航（航法・航路計画管理）
- 操船制御

表1 操船システムに要求されるタスク及び機能

タスク	サブタスク階層1	サブタスク階層2
1. 航海状態制御	1.2 自律操船制御の可否判断	1.2.2 システムによる判断
	1.3 モード管理	1.3.1 目標WP管理
		1.3.2 モード移行（離岸操船→港内操船）
		1.3.3 モード移行（港内操船→港外操船）
		1.3.4 モード移行（港外操船→港内操船）
		1.3.5 モード移行（港内操船→着岸操船）
2. 状況把握	2.1 見張り	1.3.6 避航操船管理
		2.1.1 他船舶静態把握
		2.1.2 航行海域把握
		2.1.3 浮遊物他把握
	2.2 船舶航行状態把握	2.1.4 座礁の危険性判断
		2.2.1 自船位置
	2.3 気象海象観測	2.2.2 自船運動把握
		2.3.1 風向風速
	2.4 船舶運動状態把握	2.4.1 主機運動状態の把握
		2.4.2 船内電力状態の把握
	2.5 アクチュエータ応答評価	2.5.1 アクチュエータ状態把握
		2.5.2 応答値評価
4. 自動避航	3.2 航路の確認	2.6 システム健全性管理
		2.6.1 システム作動状態監視(システムによる監視)
	4.1 航行空間（海域）リスク演算	3.2.1 妥当性・安全性確認
		3.2.4 実行計画航路管理
		4.1.1 航路環境設定
		4.1.2 地形・水面環境設定
		4.1.3 他船衝突リスク演算
		4.1.4 総合航行リスク演算
		4.2.1 避航計画策定
		4.2.2 避航航路策定
5. 操船制御	5.1 離着岸操船（バーシング）	4.2.3 策定航路評価
		5.1.1 操船計画演算
	5.2 港内操船（ディスプレイ、アプローチ）	5.1.2 操船制御
		5.2.1 操船計画演算
		5.2.2 操船制御
	5.3 港外操船	5.2.3 操船制御
		5.4.1 前後方向外力推定
		5.4.2 横方向外力推定
	5.4 外力推定	5.4.3 回頭方向外力推定
		5.4.4 定常航路偏差成分推定
		5.5.5 風圧力推定
	5.5 制御の状態確認・評価	5.5.1 制御結果評価
		5.5.2 制御結果予測
		5.5.3 GNSS誤差要因評価

2.3 システム構成

自律操船システムを構築する際に開発のためのコストと期間を圧縮するために、1章で示したMMSを活用することとした。MMSは、既に船級を取得済みであり、航海計器等との接続機能、操船デバイス（プロペラ・舵・スラストなど）を安全に制御する機能を有している。さらに、ジョイスティック操船、方位保持、定点保持等の制御機能を実現していることから、大幅に開発期間とコストを削減することができると同時に、信頼性の高い制御システムの構築が可能であると考えた。

また、操船者に制御を受け渡す際に、一人の操船者がジョイスティックとダイアルだけで操船が可能なのも、非常に有効である。

図2に示すように、自律操船の制御演算を行う自律操船制御システムを、MMSに接続して機能させることで、自律操船を実現する操船システムの開発を行っている。

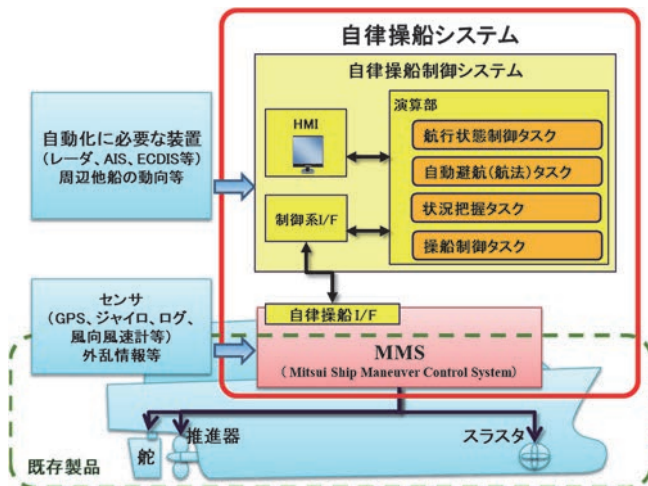


図2 自律操船システム構成図

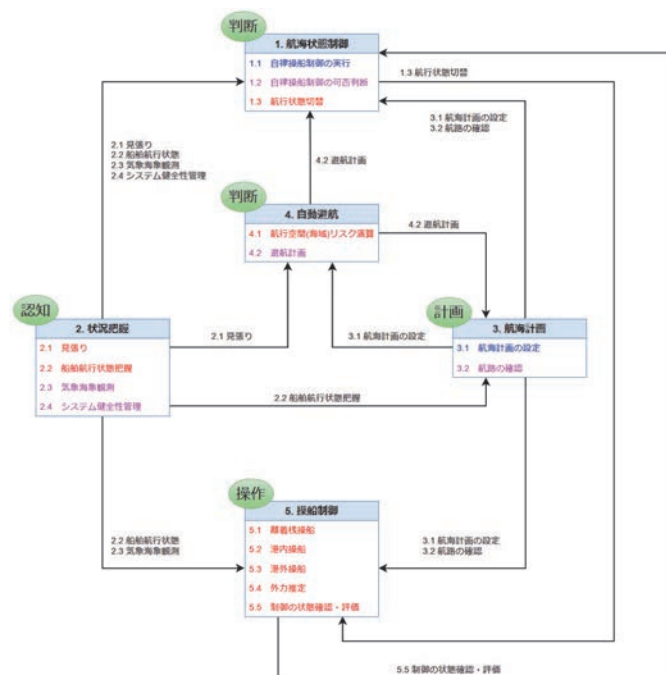


図3 自律操船制御機能タスクブロック構成図

自律操船システムは、自律操船のための制御演算を行う「自律操船制御システム」と新しく開発した自律操船とのインターフェースを備えたMMSによって構成され、MMSで入力されたセンサ等の情報を自律操船制御システムに引き渡し、演算された制御指令をMMSから舵、プロペラ、スラスト等のアクチュエータを制御することにより自律操船を実現するものである。

次に前節で分析した操船システムに要求される機能を実現するためのタスク及びタスク間のデータフローを、図3に示す。

3. 操船制御システム

3.1 操船制御システムの概要

運航フェーズによって外洋や沿岸を航行する港外操船と港湾内を航行する港内操船に分類できる。さらに港内操船は、離棧・ディスアプローチ・定常速力での航行（含む狭水道）・アプローチ・着棧に分類でき、それぞれで考慮する内容や運動自体も大きく異なるため、これらをすべて同じロジックで制御することは現実的でない。そこでそれぞれの操船フェーズに対して適した制御ロジックを用いることとした。本稿では、この中で難易度が高く海難事故につながる可能性が高いアプローチ操船制御について、説明する。

3.2 アプローチ操船制御

アプローチ操船の特徴として、一般的に航路や防波堤などの地形的に制限された水域を、減速しながら着棧点に向けて船位や船首方位を制御しながら航行するものである。

特に地形的な制限でやり直しが難しく一発勝負となること、減速することで船体運動特性が大きく変化し続けること、同時に船速が低下することで相対的に外乱の影響が大きくなることから、アプローチ操船制御を実現する上での課題として挙げられる。

3.2.1 構成

アプローチ操船は、やり直しが出来ず、運動特性や外乱影響が変化することで、単純な制御では対応ができない。そこでアプローチ操船制御を実現するために、操船者の操船を参考に複数のアルゴリズムを組み合わせることとした。

その制御アルゴリズム等の一覧を以下に示すと同時に、構成図を図4に示す。

- 航法フィルタ
- 航路保持フィルタ
- 航路保持をするためのフィードバック制御
- 定常外力に対するフィードフォワード
- 予測操船フィードフォワード制御
- 船速制御

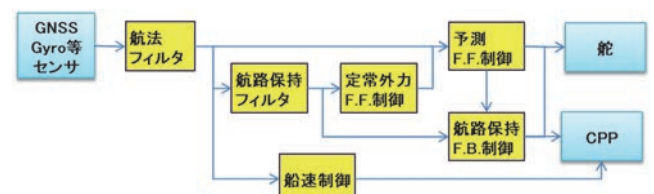


図4 アプローチ操船制御機能ブロック構成図

3.2.2 航法フィルタ

本システムにおいてはRTK測位（Real Time

Kinematic) のGNSS受信機を使用するために測位誤差は小さいが、それでもノイズ成分が含まれているために対地速度を演算する際に位置情報を微分する必要がある。ノイズの影響を大きく受けることが考えられる。そこで、滑らかで確からしい位置と速度を推定するため、今村⁴⁾、福田(田丸)⁵⁾により使用されている航法フィルタと呼ばれる線形のカルマンフィルタを採用した。

図5に示すような、基準となるWay Point (WP) を原点、北方向をX軸及び東方向をY軸の正となる地球固定の2次元座標系を定義し、定義した座標系における時刻 t_k の船体の位置、速度、加速度を状態変数とする(1)の様に定義する。(以下、上付き添字のTは転置行列を示す。)

$$x_n = [p_x(n), p_y(n), v_x(n), v_y(n), a_x(n), a_y(n)]^T \quad (1)$$

これらによって(2)式に示すような状態方程式と観測方程式からなる状態空間表現を得る。

$$\begin{aligned} \text{状態方程式} \quad x(n+1) &= Fx(n) + G\omega(n) \\ \text{観測方程式} \quad y(n) &= Hx(n) + v(n) \end{aligned} \quad (2)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta T & 0 & \Delta T^2/2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta T & 0 & \Delta T^2/2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

F, G, Hはそれぞれ状態遷移行列、駆動行列、観測行列を示す。ここで、 $y(n)$ の第1要素はカルマンフィルタから得られる緯度情報、第2要素は経度である。カルマンフィルタを使うことによってこれら2つの信号が得られたときに、(2)式の内部表現で位置、速度、加速度の推定値が得られ、スムージングされた位置と速度を求める事が出来る。

3.2.3 航路保持フィルタ

アプローチ操船を実現するために、設定されたアプローチラインを保持する航路保持制御問題と定義し、三好による最適トラッキング制御⁶⁾と同様に操縦運動モデルから得られる状態空間表現における状態変数の推定にカルマンフィルタを用いることとした。

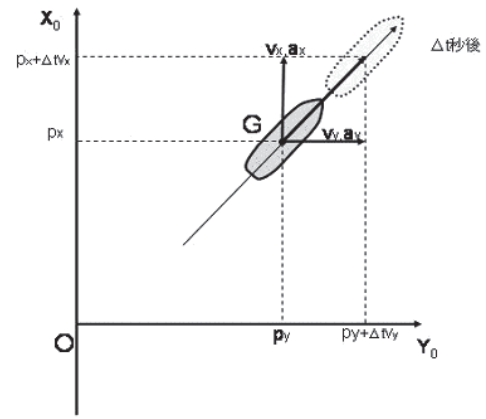


図5 航法フィルタにおける座標系

図6の座標系に示す、横方向速度： v 、角速度： r 、航路に対する船首方位の偏差： ϕ 、航路から自船位置の偏差としてクロストラック偏差量： Y_d 、舵角： δ を採用し、(3)式に示すような制御に用いるため運動モデルを用いる。その際に(3)式における a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} , b_{11} , b_{21} も三好⁶⁾による線形化された操縦運動モデルから求める手法を採用した。この手法では船体要目から運動モデルを求めることが可能であり、汎用化及び製品化に適した方法であることから採用した。

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \\ \dot{Y}_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & U_0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ r \\ \phi \\ Y_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \delta \quad (3)$$

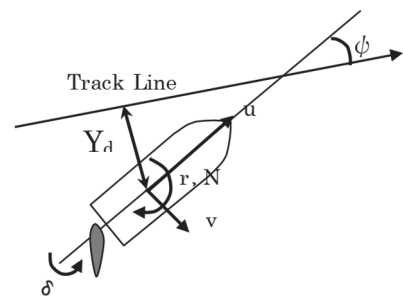


図6 航路保持制御における運動モデルの座標系

(3)式に示した連続型線形化モデルから、サンプリング時間 Δt で離散化したモデルを(4)式によって計算し、(5)式のように離散表現が得られる。

$$\Phi = e^{A\Delta t}, \quad \Gamma = B \int_0^{\Delta t} e^{A(\Delta t - \tau)} d\tau \quad (4)$$

$$\mathbf{x}(n+1) = \Phi \mathbf{x}(n) + \Gamma \mathbf{u}(n) \quad (5)$$

$$\Phi = \begin{pmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & 0 & 0 \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & 0 & 0 \\ \Phi_{31} & \Phi_{32} & 1 & 0 \\ \Phi_{41} & \Phi_{42} & \Phi_{42} & 1 \end{pmatrix}, \quad \Gamma = \begin{pmatrix} \Gamma_{11} \\ \Gamma_{21} \\ \Gamma_{31} \\ \Gamma_{41} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{x}(n) = [v \ r \ \phi \ Y_d]^T, \quad \mathbf{u}(n) = \delta(n)$$

さらに定常外力に対応するために、航路に対する横方向への変位速度 d_y を追加し(6)に示す状態変数として、(7)式の状態方程式に示す様に、システム表現の最終行で、クロストラック偏差が定常な性質を持つと表現した。

$$\mathbf{x}(n) = [v(n) \ r(n) \ \phi(n) \ Y_d(n) \ d_y(n)]^T \quad (6)$$

状態方程式

$$\mathbf{x}(n+1) = \begin{pmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & 0 & 0 & 0 \\ \Phi_{31} & \Phi_{32} & 1 & 0 & 0 \\ \Phi_{41} & \Phi_{42} & \Phi_{43} & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v(n) \\ r(n) \\ \phi(n) \\ Y_d(n) \\ d_y(n) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Gamma_{11} \\ \Gamma_{12} \\ \Gamma_{13} \\ \Gamma_{14} \\ 0 \end{pmatrix} \delta(n) + \varepsilon(n) \quad (7)$$

観測方程式

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{H} \mathbf{x}(n) + \mathbf{w} \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$\mathbf{H}$: 観測行列, ε : システムノイズ, $\mathbf{w}$: 観測ノイズ

この状態空間表現における状態変数をカルマンフィルタによって推定することにより、航路保持に関する船体運動の推定を行った。

ただし、このモデルには船速に依存する項があるためアプローチ開始から終了まで大きく船速が変化するためそのままでは適応することができない。そこで複数の船速でトラッキングモデルを設計し、船速ごとのモデルをメンバーシップ関数とするモデルを用いて、対応する船速に応じた状態変数の推定値を求めた。

3.2.4 航路保持フィードバック制御

アプローチ操船制御を実現するために、前項でえられた状態変数を用いてフィードバック制御を行った。具体的には(9)式に示す様に状態変数 $\mathbf{x}(n)$ に制御ゲイン $\mathbf{L}(n)$ を乗じて操舵量 $\mathbf{u}(n)$ を求めた。

$$\mathbf{u}(n) = -\mathbf{L}(n) \mathbf{x}(n) \quad (9)$$

ここで評価関数などを用いて $\mathbf{L}(n)$ の最適値を求める手法は一般的であるが、今回は船速の変化などの不確定要素が多いことからシミュレーションによるトライ&エラーで $\mathbf{L}(n)$ を決定した。

3.2.5 定常外力に対するフィードフォワード

これまでに述べたように、アプローチ操船では船速が低く外力の影響を大きく受けるため、アプローチ操船制御でも船体が受ける外力を考慮することが重要となる。そこで、3.2.3で述べたカルマンフィルタによって演算された、航路に対する横方向への変位速度 d_y を用いて、定常外力に対するフィードフォワード制御⁹⁾を付加した。

図7の左図に示すように、航路保持をして航行中の船舶は、 d_y と前後速度 u の合成方向に速度 U で航行する。その際に船首方位から ϕ_s の角度を持った方向に移動する。この時、 ϕ_s は微小であることから、 $d_y \approx d_y'$ として航路からの船首方位の偏角 ϕ を最適制御則に渡す際に ϕ_s を考慮することによって、図7の右図に示すように、定常的な航路偏差を小さくすることが可能になる。具体的には、この ϕ_s を次項の予測操船フィードフォワード制御で考慮することで、定常外力を考慮することができる。

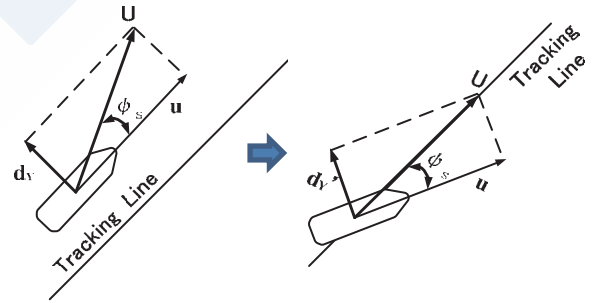


図7 定常外力に対する制御イメージ図

3.2.6 予測操船フィードフォワード制御

一般的に操船者は、現状の操船目標との偏差のみならず数十秒から数分後の自船の位置及び船首方位を予測した操船を行う。これまで着岸操船に関していくつかの研究^{9) 10) 11)}がなされていたが、いずれの研究においても減速しながらアプローチする操船フェーズにおいては、通常の操船者が行う予測操船を考慮したフィードフォワード制御は必要であると提唱されている。

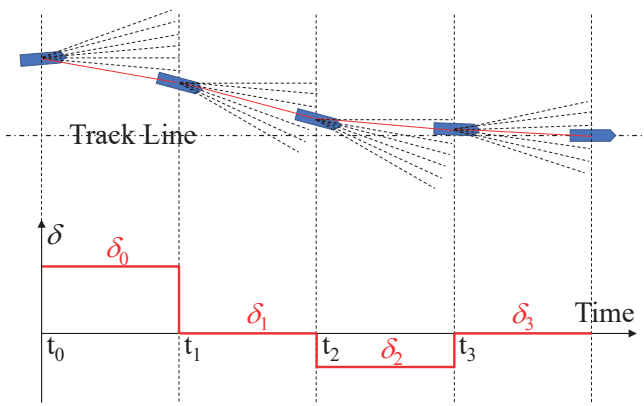


図8 シューティングメソッド探索イメージ

このような予測制御にはDeep Learningなどを用いる方法¹²⁾も考えられるが、教師データの収集などに大きな時間がかかると考え、著者らは実用化を考慮してシューティングメソッドを用いて最適な操舵計画を求めることとした。

その探索イメージを図8に示す様に、開始点から舵角を複数回変更しながら航路に復帰する最適舵角を計算する。図8の左端の航路偏差が生じた状態から一定時間ごとに舵角を変更し、航路に復帰する最適操舵を探索するイメージを示している。

そのシューティングメソッドを用いた探索方法の手順を以下に示す。

- ① MMGモデルを用いた高速シミュレーションを用意する
- ② 舵角の候補 δ をT秒間維持し、途中n回変更する組み合わせを用意する
例：
 $\delta [\text{deg}] = \{\pm 15.0, \pm 10.0, \pm 5.0, \pm 2.5, 0.0\}$
 $T[\text{sec}] = 30, n = 4$
- ③ 高速シミュレーションを用いて最適となる組み合わせを探索する
最適の定義は(10)式の評価関数が最小となること

$$J = \sum_{i=0}^n (q^{n-i} (W_y Y_{d,i}^2 + W_\psi \Delta \psi_i^2 + W_r r_i^2) + W_\delta \delta_i^2) \quad (10)$$

q : 減衰係数

W : 各種重み

$Y_{d,i}$: i 段階目終了時の航路偏差

$\Delta \psi_i$: i 段階目終了時の方位偏差

r_i : i 段階目終了時回頭角速度

δ_i : i 段階目の舵角

この時に、 $\Delta \psi_i$ を求める際に参照する航路の方位に、前項で求めた ϕ_s を考慮した方位を用いた。

4. 実証試験

これまでに説明したアプローチ操船制御とDPS等の技術を応用した着岸制御を組み合わせた港内操船制御システムを用いて、実船での実岸壁に対するアプローチ・着岸操船制御の実証を行った。本章ではその速報として、実証試験の概要を報告する。

本実証試験は、国土交通省「自動離着岸機能の安全性に係る実証事業」の(株)商船三井殿及び東京海洋大学殿と共同で実施したもので、実岸壁での実施の前に港外に仮想岸壁を設定して、十分な制御性能があることを確認したのちに実施した。

4.1 試験条件

4.1.1 供試船

実証には商船三井フェリー株式会社殿のカーフェリー「さんふらわあ しれとこ」を用いた。供試船の主要目を表2に、写真を図9に示す。

表2 「さんふらわあ しれとこ」の主要目

● 総トン数	11,410	ton
● 全長	190.0	m
● 垂線間長	175.0	m
● 型幅	26.4	m
● 型深	20.5	m
● 喫水(計画満載)	6.85	m
● 試運転最大速力	25	Kts
● 最大搭載人数	180	名
● 主機関	4cycle中速Diesel×2基 14,580kW×400rpm(/1基)	
● 推進器	CPP×2	軸
● スラスト	バウ×2	基
	スターン×1	基



図9 カーフェリー「さんふらわあ しれとこ」全景

4.1.2 試験海域及び操船シナリオ

実証試験は、茨城県大洗港及び中央西岸壁バース

で実施した。その際に用いた操船シナリオを図10に示す。また、目標着岸点は、通常運航時の着岸点より手前に配置し、前方及び右舷側の岸壁に対しそれぞれ25m及び10mのクリアランスを確保するように設定した。

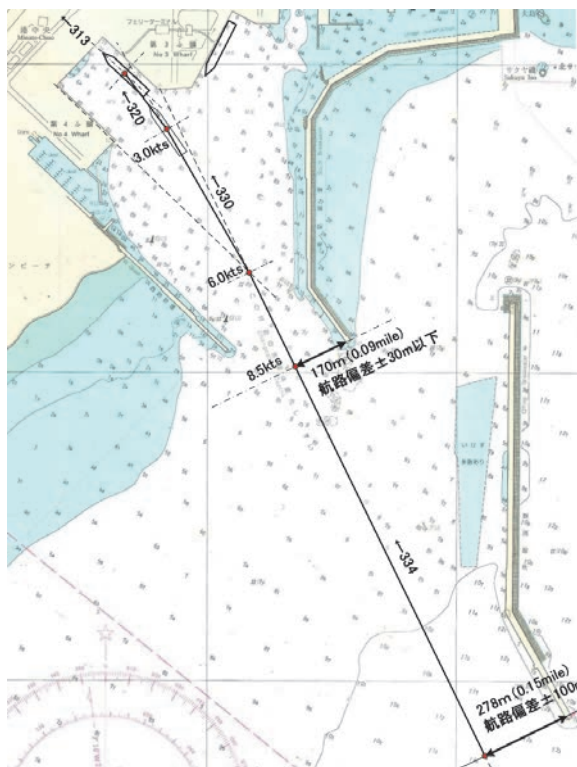


図10 実証試験操船シナリオ

4.1.3 試験条件

実証試験を実施した際の試験条件を表3に示す。また試験は図10に示した大洗港沖防波堤先端付近の最初のWP (Way Point) の手前約1.0マイルの地点から初期船速12.0ktsで開始した。

表3 実証試験条件一覧表

海気象条件	
天候	晴
視程	良好 (約12Mile)
風向	NE~ENE
風速 (港外)	10.0~14.0 m/s
風速 (港内)	4.5~10.0 m/s
波高 (港外)	1.5 m
波向き (港外)	NE
その他の条件	
試験時間	昼間
喫水	6.4 m

4.2 試験結果

実岸壁に対し4回の実証試験を実施した。いずれ

の試験も設定した操船シナリオに沿って航路保持及び減速し、目標着岸点に対し0.5~2.0mの精度で停船 (船速0.1kts未満) 出来たことを確認した。

その一例として航跡図を図11に、試験システムの時系列画面を図12に示す。尚、本稿では速報ということで時系列に関する説明は割愛する。

航跡図から分かる様に、沖防波堤・防波堤の間・内側の防波堤を通過時に蛇行しているのがわかる。この現象はシミュレーション及び港外での仮想岸壁での試験では確認できなかった。原因として防波堤による遮蔽によって風速が大きく変化したこと、及び防波堤の間に局所流が発生していた等の環境変化が大きく影響したと考えられる。

4.3 考察

今回の実証試験において、これまでに開発した操船制御システムの有効性が確認できた。一方、実際の港湾及び実岸壁では、地形等の影響による外乱変化が、船体運動に大きく影響を及ぼすことを改めて確認すると同時に、外乱変化に素早く対応可能な制御システムが要求されることを確認した。

実証試験時に予測操船 (シューティングの結果) と実際の船体運動に差異が出ることを確認された。これは港内に入ると水深が浅くなりUKCが0.8~1.5mになっていて、浅水影響により操縦運動モデル自体が変化していたと考えられ、対策の検討が必要であることを確認した。

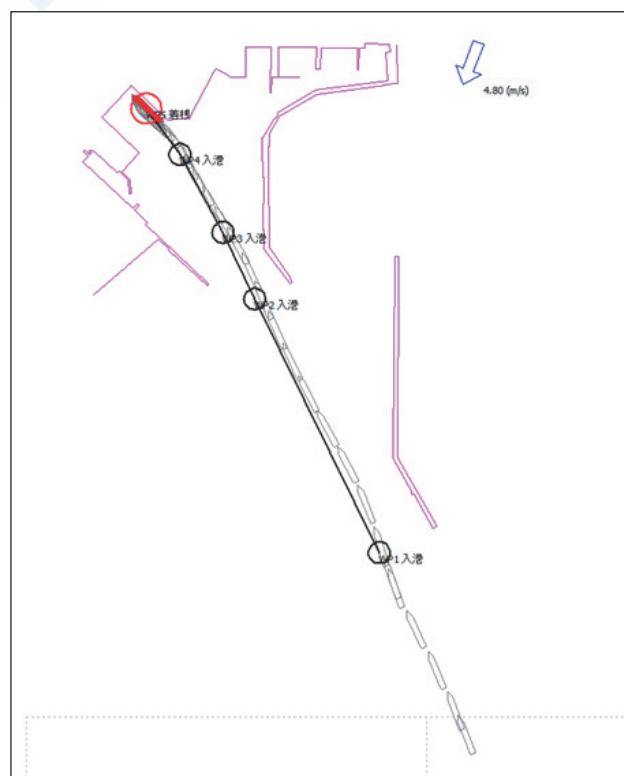


図11 実証試験航跡

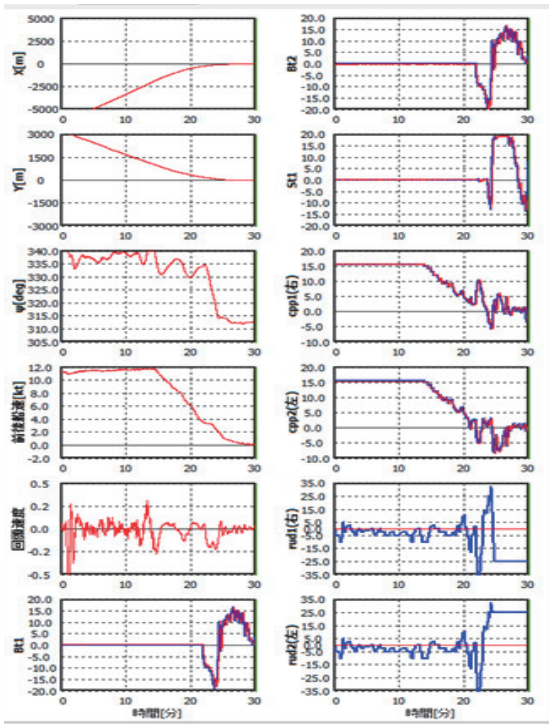


図12 試験システムの時系列画面

5. まとめ

自律運航を実現するために不可欠な操船システムの要件を示した後に、概念設計及び基本設計の概要について説明した。

次に、操船システムを構成する重要な機能で、船舶の動きを制御する操船制御システム、特に本稿ではアプローチ操船制御について構成及び技術的な説明を行った。

最後に、説明したアプローチ操船制御及び着岸制御が組み込んだ港内操船制御システムを用いて、実際の大型フェリーで実岸壁に対して、アプローチ・着岸操船制御の実証試験の速報について報告した。

現在開発している船舶の自律運航を目指した操船システムの有効性が確認されたが、同時に様々な課題も明らかになった。

今後も操船制御を中心とした技術開発を行い、シミュレーションや実船試験などで安全性や実用化に向けた課題を明らかにし、自律運航のための操船システムの実用化に向けた技術開発を続けると同時に、航海機器メーカーを含めた関連する技術を有する企業と協力し、出来るだけ早く自律運航船を実用化して、日本の海運業界に貢献していくことを目指す。

謝辞

本研究開発の一部は、MEGURI2040プロジェクトの助成により行われており、研究開発の機会を頂

いた日本財団に御礼申し上げます。また、技術開発のために多大なるご指導を頂いた東京海洋大学岡崎教授、実証試験にご協力いただいた株式会社商船三井フェリー殿及び「さんふらわあ しれとこ」の乗組員の方々、特に実証試験の成功には、「さんふらわあ しれとこ」の吉田船長のご尽力が不可欠なものでした。改めて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省海事局：平成30年度船員需給総合調査結果報告書の概要，P3
- 2) 日本財団ホームページプレスリリース：
<https://www.nippon-foundation.or.jp/who/news/pr/2020/20200612-45056.html>, 2021.05
- 3) 三井E&S造船ホームページ,
<https://www.mes.co.jp/shipbuilding/business/special/system.html>, 2021.05
- 4) 今村智之：船舶の自動着岸システム構築に関する研究，東京商船大学修士論文，1999.
- 5) 福田（田丸）人意，金城智仁，大津皓平，小山健夫：船位推定フィルタディファレンシャルGPSを用いた推定方法の開発，電子情報通信学会誌B Vol.J84-B No.12, pp.2220-2226, 2001.
- 6) 三好晋太郎，原洋輔，大津皓平：カルマンフィルタを用いた最適トラッキング制御に関する研究，日本航海学会論文集，Vol.118号，2007.
- 7) 三好晋太郎，原洋輔，大津皓平：線形化モデルを用いた最適トラッキング制御に関する研究，日本航海学会論文集，Vol.117号，2007.
- 8) 三好晋太郎：船舶の最適トラッキング制御システムに関する研究，東京海洋大学博士論文，2008
- 9) 正司公一，大津皓平：最適制御理論による操船の最適化と自動化について，日本造船学会論文集，No.172, pp365-373 (1992)
- 10) 大和 裕幸ほか，エキスパートシステムによる自動着岸制御，日本造船学会論文集，No.174, pp.327-337
- 11) 岡崎忠胤，大津皓平，福田人意：学習型フィードフォワード制御方式による自動着岸制御システムの設計
- 12) 岩本 才次，学習型フィードフォワード制御方式による自動着岸制御システムの設計，日本船舶海洋工学会論文集2005年2巻pp.179-188

自動運航船関連技術に対する安全性評価について

山田 智章*

1. はじめに

1.1 背景

近年、センシング技術やAI、IoT（Internet of Things）等の技術が急速な進歩を遂げており、様々な分野で活用されている。

船舶の分野においても、ヒューマンエラー防止による安全性の向上や、乗組員の作業負担の軽減による労働条件の改善等を目的として、国内及び海外において、自動運航技術の開発が盛んになってきている。既に研究段階から開発段階へ移行しており、いくつかの具体的な開発プロジェクトが世界各地で立ち上がっている。日本国内においては、国土交通省による自動操船機能、遠隔操船機能、自動離着機機能の3つの機能を対象とした実証事業が2020年度で終了し、これらの実証実験から得られた知見の取りまとめが行われている。また、日本財団による無人運航船プロジェクトMEGURI2040に代表されるように、複数のプロジェクトが立ち上げられており、規則整備と技術開発の両面から、2025年までの自動運航船の実用化を目指している。

1.2 自動化・遠隔化の対象

自動車と異なり、船舶には多種多様の船上作業が存在している。そのため、まずはどの船上作業を対象とするのかの整理から始める必要がある。

船上作業は、甲板部、機関部の2つに大別できる（表1参照）。これらのうち、現在は甲板部の航海当直に関する船上作業の自動化・遠隔化に関する技術開発が中心に進められている。

最近では、機関部の船上作業についても、自動化・遠隔化の検討が議題に上がるようになってきた。機関部においては、船上保守管理作業の低減を目指しCBM（Condition Based Maintenance）に関する技術開発が先行して進められていたが、これらの技術の自動運航船への取入れが検討されている。

1.3 「船」のレベルと「システム」のレベル

自動運航船の自動化・遠隔化のレベルについても、様々な議論がなされている。船としての自動運航レベルについては、IMOでも暫定案（表2）が示されており、国土交通省が公表している自動運航船の実

表1 船上作業の概略

甲板部	航海当直（見張り、通信、操舵等） 入出港関連（準備作業、係船・解らん、投錨・抜錨、記録・報告等） 船体関連（船体保守・整備、船内巡検、清掃等） 貨物管理（積載計画、貨物状態管理、荷役準備作業、荷役コントロール、船体姿勢維持等）
機関部	機関当直（主機操縦、見回り（トラブル対応含む）、アラーム対応、記録、定期整備・点検） 入出港関連（準備作業（点検、作動確認、燃料切替、予備発電機始動等）、主機関負荷調整、主機減速中の潤滑油調整、燃料消費量最小化、水深に応じた海水取入口の切替、記録、主機手仕舞い作業等） 掃除

用化に向けたロードマップの中でも、自動運航船のフェーズがⅠ～Ⅲに分けて記載されている（表3）。

表2 MSC 100/20/Add.1 Annex 2

Degree one	Ship with automated processes and decision support
Degree two	Remotely controlled ship with seafarers on board
Degree three	Remotely controlled ship without seafarers on board
Degree four	Fully autonomous ship

表3 国土交通省による自動運航船のフェーズ

フェーズⅠ	IoT技術活用船
フェーズⅡ	陸上からの操船やAI等による行動提案を行い最終的な意思決定者である船員をサポートする船舶
フェーズⅢ	自律性が高く最終意思決定者が船員ではない領域が存在する船舶

システムの自動化・遠隔化のレベルについては、船級協会の発行しているガイドライン等にその考え方が示されている。それらを比較したものを表4に示す。なお、本会以外の船級協会についての記載は、便宜上、非公式な簡易和訳を当て込んでいる。

* 一般財団法人日本海事協会 技術研究所

表4 主要船級協会による自動化・遠隔化レベル¹⁾⁻⁵⁾

ABS	<System Autonomy Levels> 自律機能によるタスクはMonitoring, Analysis, Decision, Actionの4つに分けられ, どの範囲を機械が担うかにより, Smart, Semi-Autonomous, Autonomousの3つのレベルに分けられる。
BV	<Level of autonomy> レベル0: 人間がすべての決定を下し, 全ての機能を制御する レベル1: システムがアクションを提案し, 人間が判断と対応を行う レベル2: システムが機能を実行し, 人間が特定の時間内に決定を拒否する事ができる レベル3: システムが人間の反応を待たずに機能を実行する レベル4: システムが緊急の場合を除いて人間に通知せずに機能を実行する。
DNV	<Levels of autonomy for navigation function> M: 手動操作機能 DS: 意思決定支援機能 DSE: 条件付システム実行機能の付帯した意思決定支援機能 (ヒューマン・インザループ (人の関与), 実行前に人の確認が必要) SC: 自動制御機能 (システムが操作を実行するが, 人が動作を変更することができる。「ヒューマン・オンザループ」 (人の介入) と言われることがある) A: 自律型機能 (システムが操作を実行し, 通常人が介入する可能性はない)
LR	<Autonomy level (AL)> AL0: 人間がすべての決定を下し, 全ての機能を制御する AL1&2: 人間がすべての決定を下し, 全ての機能を制御するが, 意思決定支援機能を有する。 AL3: システムが人間の監視下で, 機能を実行する (人間の承認が必要) AL4: システムが人間の監視下で, 機能を自動で実行する (人間の承認は不要) AL5: システムが機能を自動で実行する (人間は監視のみ) AL6: システムが機能を自動で実行する (人間の監視が不要)
NK	下記①～③の組合せ ①自動化の範囲の分類 レベル0: 人間が全ての意思決定サブタスクを実行 レベルⅠ: 一部の意思決定サブタスクをコンピュータシステムが実行 レベルⅡ: 全ての意思決定サブタスクをコンピュータシステムが実行 ②遠隔制御の範囲の分類 レベル0: 船上の乗組員が全てのサブタスクを実行 レベルⅠ: 一部の意思決定サブタスクを遠隔で実行 レベルⅡ: 全ての意思決定サブタスクを遠隔で実行 ③フォールバック実行主体の分類 レベル0: フォールバックを人間が実行 レベルⅠ: フォールバックを人間とコンピュータシステムが分担して実行 レベルⅡ: フォールバックをコンピュータシステムが実行

各船級とも共通しているのは, 船上作業の自動化・遠隔化は, これまでに船員がシステムの一部として果たしてきた意思決定プロセスの部分が段階的に自動化・遠隔化されることによって進められるという考え方である。

システムによって, 船舶のどの機能 (操船, 推進, 電力管理, 貨物管理等) が, どのくらい (意思決定プロセスの一部なのか全部なのか) 自動化・遠隔化されており, 有事の際の対応をだれが行うのか (船員かシステムか) といったことを整理することが重要である。

なお, 意思決定プロセスの分け方には, 各船級協会で個性があるが, 本会では図1のように, 認知, 判断, 対応の3つに分けている。

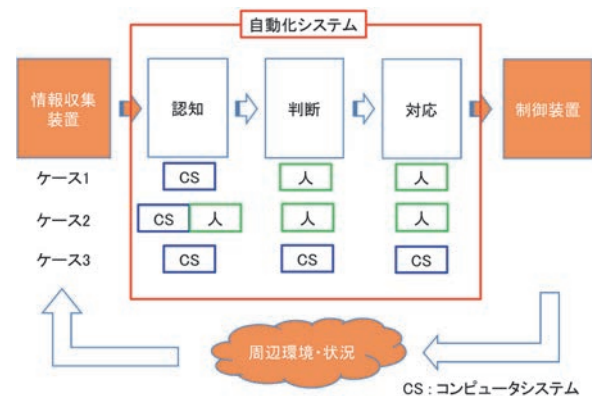


図1 自動化システムの概念図

1.4 運用の概念 (ConOps)

近年, ConOps (Concept of Operation) という

言葉を自動運航船関連の文書でよく目にするようになった。筆者が調べた限りにおいては、システム・エンジニアリングで用いられている言葉のようで、ISO/IEC/IEEE 29148の中に記載されている（図2参照）。ConOpsは、システムの利用・運用の概念、概要をまとめた文書のことを指しており、ステークホルダー要件、システム要件を引き出す上で重要な文書として位置づけられている。システムの要件定義は、必要とする能力や機能に目が行きがちなため、システムのライフサイクル全体を網羅した利用・運用のシナリオを描くことで、漏れのない（あるいは少ない）要件定義が可能になるとされている。

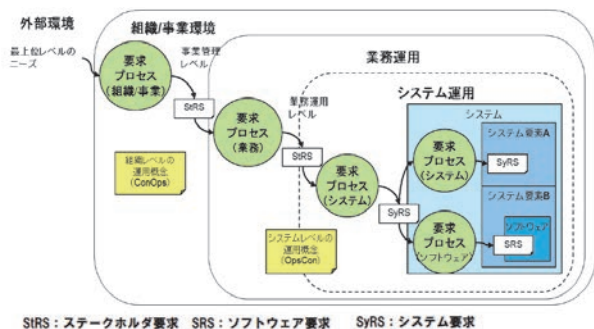


図2 要件定義プロセスの流れと対応する要件仕様の例（出典：ISO/IEC/IEEE 29148）

自動運航船の場合、高度に複雑化されたシステムが搭載されることになり、そういった大規模なシステムほど、一律の要件を設定することは難しい。同じ機能を有するシステムであっても、こういった状況下でこういった運用を行うのかによって、規定すべき要件や性能基準も異なってくるためである。この観点から、ConOpsを事前に明示したうえで、要件を設定するというアプローチは、自動運航関連のシステムの安全性を検証する際に、非常に効果的なアプローチといえる。

1.5 技術開発

自動運航関連技術の開発においては、いくつかのやり方がある。AIに代表されるような最新技術を持ち込む、船舶での使用実績はないが他業界で既に確立された技術を持ち込む、既に船舶でも確立されている既存技術をこれまでにない形で組み合わせることで新しい機能を実現させる等、アプローチは様々である。

対象とする船上作業の性質を考慮しながら、「自動化」と「遠隔化」の2種類の技術を、適宜選定もしくは組み合わせることで、自動運航の実現が目指されている。

1.6 規則整備

自動運航関連技術を社会実装するためには、規則

の整備も並行して進めなければならない。

IMOにおいて、2017年6月に開催されたMSC98から自動運航船が議題として取り上げられるようになり、自動運航船に関わるIMOの諸規制の論点整理（RSE：Regulatory Scoping Exercise）が開始された。2019年6月に開催されたMSC101では、自動運航船を開発する際のトライアルに関する暫定ガイドライン⁶⁾（以下、IMO暫定ガイドライン）が承認され、自動運航船関連のシステムやインフラの試験的な運用の際に考慮すべき基本方針が取りまとめられている。2021年5月に開催されたMSC103において、RSEが完了したことが報告された。RSEの結果、既存の条約要件と自動運航船に必要とされる要件に潜在的なギャップがあること、及び今後の作業の優先順位について、共通の認識が得られた。審議の結果、既存の条約とは独立した自動運航船のための要件を検討する方針が合意された。

本会では、2020年1月に自動運航、自律運航に関するガイドライン（Ver. 1.0）（以下、NKガイドライン）を発行した（図3参照）。当該ガイドラインは、自動運航技術に関する船級としての考え方や認証手順を示したものである。



図3 自動運航、自律運航に関するガイドライン

まずは、現在開発されている技術がどのようなものであるのか、既存技術からの「差分」を、概念設計の段階から正しく理解し、それを船級も含めた関係者で共有する。最初から一律に規範的要件を規定するのではなく、リスク評価等の手法を活用しながら、合理的に自動運航技術の評価を行う必要がある。このプロセスを踏むことで、船級は規則面の整備も進めることができ、システム所有者も具体的な使用イメージ（ビジネスイメージ）を構築することができる。システム供給者やシステム統合者も開発の方向性を明確化することができる。また、自動運航船の認証の手順を明確にしておくことで、システム供給者、システム統合者、システム所有者のそれぞれ

が、いつ、何をしなければならないのかがわかりやすくなり、社会実装を加速させることにつながることを期待している。これからは、船級協会も含めた海事業界全体でのより一層の連携が重要になってくる。

2. 自動運航船の安全について

2.1 安全の定義

「安全とは何か」について、改めて整理をしておきたい。例えば、ISO/IEC GUIDE 51:2014では、安全とは「許容できないリスクがないこと」といった定義がなされている。

「リスクをゼロにする（絶対安全）」が理想ではあるが、現実的な観点で物事を考えると、前述のような定義になるのであろう。これを船舶に当てはめると、「許容できないリスクをなくす」ための手段が、既存船の場合は船員であり、自動運航船の場合は、システムと船員の協業ということになる。

船員の最低限の能力要件については、STCW条約に明記されている。この能力要件をそのままシステムに適用すべきかどうかについては議論が必要であるが、自動運航船において、システムが船員のタスクを部分的にでも代替する場合、これらの能力要件をどのようにシステムが達成するかについては、重要な視点となる。

2.2 機能安全

安全には、本質安全と機能安全がある。本質安全とは、機械が人間や環境に危害を及ぼす原因そのものを低減、あるいは除去することを言い、機能安全とは、機能的な工夫（安全を確保する機能：安全機能）を導入して、許容できるレベルの安全を確保することをいう。身近な例として、鉄道の立体交差は本質安全、踏切は機能安全といった整理となる。

機能安全の考えは、様々な業界で取り入れられており、鉄道だとIEC 62278、自動車だとISO 26262といったように、機能安全規格群が存在している。一例として、自動車の機能安全規格であるISO 26262は、機能安全の考え方により人的被害ゼロを目指す、安全性を軸に開発業務全体を見える化し、説明責任を果たすとともに、訴訟に耐えうる証拠をそろえる、といったことが制定背景にある。

船舶における機能安全規格はまだ存在していないが、自動運航船においても、機能安全の考え方は大いに参考になる。

2.3 同等性

自動運航船の安全性を議論する際、既存船が有する安全性との比較が1つの基準となる。船舶に高度

なシステムを搭載する目的は、安全性を向上する他にも、利便性を上げる、経済性を上げる、といった目的も存在する。そのため、自動運航船だからといって、既存船以上の安全性を求めるものではない。

既存船は船員（正規のトレーニングを受けた有資格者）が船上作業を行うことで、船舶を安全に運航しており、この仕組みは世界的に合意されたものである。この観点から、既存船は、船員によって「リスクを最小化された状態」ということができる。

自動運航船においては、この「リスクが最小化された状態」を自動運航技術（自動化・遠隔化）によって実現することになる。つまり、既存船と自動運航船の差分を確認し、その差分によって既存船の有する安全性が損なわれていないことを確認する必要がある。

2.4 平常時の安全と非常時の安全

安全については、「平常時」と「非常時」で分けて考える必要がある。「平常時」においては、事前に定義された最低要件を常に達成していなければならない。一方で、「非常時」においては、事前に定義された最低要件（平常時の安全条件）を下回った状態であることから、事態を「悪化させない」ことが重要な視点となる。

2.5 MRCとMRM

自動車の自動運転の場合は、Minimum Risk Maneuver (MRM) という言葉が用いられており、安全に走行できない事象が発生した場合の対処として、Minimum Risk Condition (MRC) (事故リスクが十分低い状況での停止状態) に至るまでの車両運動制御を指している。一方で、船舶においては、非常時における事故リスクが十分低い状態（非常時のMRC）を、一様に定義することは難しい。自動車と異なり、波や潮流の影響を受ける船舶においては、仮に主機を停止したとしても漂流してしまう。また、1か所にとどまるためにアンカーをうつという行為も状況によってはむしろ船舶の状態を危険にさらしてしまうこともありうる。周囲の状況、気海象、船舶に発生した異常モード等を考慮した上での柔軟な対応が必要となる。既存船の場合、船員が状況に応じて「事態を悪化させない」ための行動（自動車というMRM）を適宜判断しており、この船員の柔軟な対応力が船舶の安全運航を支えている。

自動運航船において、非常時におけるMRMをシステムが対応するとすると、技術的にとても難しい。そのため、当面は船員がフォールバックする必要があるだろう。この非常時対応をシステムが自動で対応できるようになる、あるいは、発生確率を限りなくゼロに近づけることができた際に、完全自律船が

登場することになるのだろう。

2.6 リスク評価

自動運航船においては、様々な運用シナリオにおいて、予測される不具合が引き起こされないように十分な考慮が払われなければならない。その観点において、自動運航船の安全性を評価する手法として、リスク評価は非常に有効である。

本会も含め、複数の船級協会から自動運航船に関するガイドラインが既に発行されているが、その全てにおいてリスク評価が重要視されており、IMO暫定ガイドライン⁶⁾やいくつかの旗国から発行されているガイドライン^{7)・9)}でもリスク評価の実施が明記されている。国際的にも、自動運航船の安全性をリスク評価で行うという流れに疑いの余地はない。

2.7 安全性確保のための基本要素

NKガイドラインにおいて、概念設計の段階から以下に示す8つの安全性確保のための基本要素を明確化することが重要である旨記載している。

- ① 自動化・遠隔化の対象
- ② システムと人間の役割分担
- ③ 搭載に関する前提仕様
- ④ 限定領域（運航設計領域）
- ⑤ フォールバック
- ⑥ ヒューマンマシンインターフェース（HMI）
- ⑦ サイバーセキュリティ
- ⑧ コンピュータシステムの信頼性

本会においては、自動運航船の安全性は、これらの要素の組み合わせで考えることとなるが、ここに前述したMRCとMRMの考え方を加えると図4のようなイメージとなる。

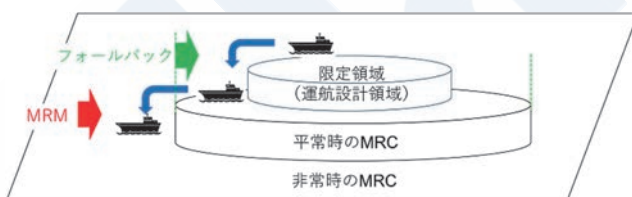


図4 限定領域（運航設計領域）とフォールバックとMRCとMRMの関係性

このように、地理的条件や環境条件、陸上支援の有無などを含めた限定領域（運航設計領域）をどのように定義し、どういった状況下でシステムを運用するのか（ConOps）、また、限定領域（運航設計領域）から逸脱するなどして、システムが正常に機能しなくなったときに、どうやって船員へタスクを委譲（フォールバック）するのかについては、安全性評価の上で非常に重要な視点となる。

2.8 課題

前述したとおり、自動運航船の安全性を評価する手法としてリスク評価が非常に有効であるが、課題も多い。

船上作業は多種多様であり、どういった状況下で、どの作業を、どの程度、自動化・遠隔化するのか、また、有事の際は誰（船員もしくはシステム）がどういったタイミングで対応するのか、によってリスクの大小は変動する。

そのため、リスク評価においては、非常に多面的な角度からハザードを抽出しなければならない。また、抽出されたハザードに対し、そのハザードが有するリスクを「許容可能なレベル」まで低減するための対策を講じることになるが、この「許容可能なレベル」を定量化することが難しい。当面は、先に述べた通り「既存船と同等」であるか否かを一つの指標としつつ、定量化のための知見を蓄えていく必要がある。

3. 操船業務を対象としたシステム例

3.1 対象

船舶には多種多様な船上業務が存在しているため、自動運航船の議論は発散しやすい傾向がある。また、抽象論の段階では、個人の知識レベルや用語の定義がそろっていないことも多く、建設的な議論を効率的に進めるためには、極力具体的な事例をあげ、共通の理解のもと、各々の専門性を持ち寄って議論を行えるような状況を整える必要がある。

そこで、現状では操船（甲板部の航海当直業務等）に関する自動化・遠隔化が先行して検討されていることに鑑み、「操船業務」の自動化・遠隔化に必要なシステムの構成について、理解共通化のためのサンプルとして活用できるよう、仮想的な整理を行った。ただし、船員の配員は現行規則に沿ったものを前提に考えており、無人船については対象外としている。

なお、類似の先行研究¹⁰⁾も実施されており、こういった研究を通じて、業界内の理解共通化が加速されることを期待している。

3.2 システム構成の一例

自動運航船における操船作業のイメージを図5に示す。ここでは、船舶内部の構成要素を、意思決定プロセスのフローをベースに、情報収集装置、認知、判断、対応、制御装置の5つのモジュールに分けている。また、遠隔制御施設は、制御装置以外のモジュールに対して、必要に応じた監視・支援・制御を遠隔オペレーターが行うと想定した。

(1) 情報収集装置

既設のセンサ群を活用することを前提に、航海当直者が実施している見張りの支援もしくは代替となるセンサ（便宜上、見張りセンサと表現した）が搭載されることになると想定。航海当直者の完全な代替となるような見張りセンサの開発は難易度が高いと考えているが、そういった見張りセンサが開発された場合には、航海当直者の見張りとの同等性を評価できるような性能基準も合わせて開発する必要がある。

(2) 認知

情報収集装置から得られた情報を統合することで、情報の信頼性を確認しつつ、正確に自船がおかれている状況を把握する必要がある。

センサフュージョン技術により情報の信頼性や完全性が向上し、船員が理解しやすいような工夫がなされたヒューマンマシンインターフェース（HMI：Human Machine Interface）を有する情報表示装置（他船との衝突リスクや座礁リスク等の重畳表示）や、与えられた情報から自船の状態を正確に分析することができるアルゴリズム等が開発されることを想定。

(3) 判断

航路を保持するか、避航行動に移るかを機械的に判断するためには定量的な指標が必要である。また、避航行動が必要な場合には、避航航路を計画する機能も必要となる。これらを考慮した上で信頼性の高い自動避航アルゴリズムが開発されることを想定。

運用は段階的に進むと考えており、システムが提案したものを船員が承認するスタイルから

導入される。実績が積まれ、システムのアルゴリズムに対する信頼性が高まったタイミングで、船員の監視下であれば人の承認なしで対応に移るようになる。

前述の認知の信頼性や完全性とも関連するため、自動操船における判断は、当面は船上の船員が担うものと考えているが、遠隔制御施設と連携する場合は、権限と責任の整理を船陸間で事前に行っておく必要がある。

(4) 対応

航路を保持するにせよ、避航行動を行うにせよ、指示された航路にそって自船を制御するための計算が行われる。既にHCS（Heading Control System）やTCS（Track Control System）が存在しており、これらの技術が適用されることも考えられる。一方で、要求される精度（オフトラック幅等）については、自船の運動性能や判断モジュールの避航航路計画で用いられるパラメータと相関があるはずであり、それらも考慮した上で適切に調整される必要がある。

(5) 制御装置

当面は既存の装置が使用されると想定。

(6) 遠隔制御施設

情報収集のモジュールに対しては、遠隔制御施設からは、最新の気海象情報や交通情報、中長期の航海計画の更新等の支援が行われると想定。

認知のモジュールにおいては、船舶から送られてくる情報の網羅性と適時性によって、遠隔制御施設における作業内容が大きく変わってく

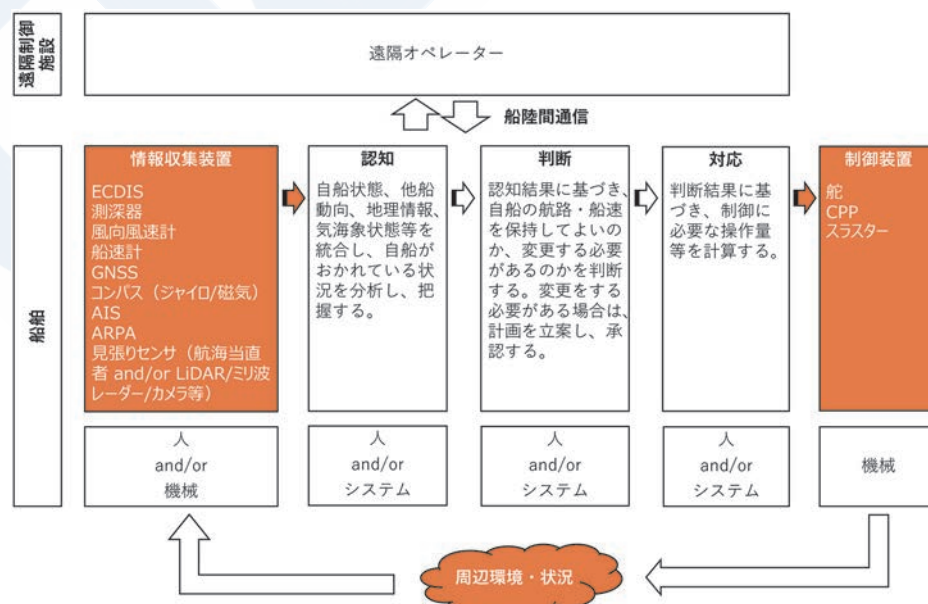


図5 操船業務の自動化・遠隔化のイメージ

る。例えば、遠隔オペレーターによる遠隔操船（目視外での操船）を行う場合は、視覚映像等も含めた認知が遠隔制御施設でも必要となり、船上とほぼ同等の認知品質が求められる。加えて、高品質な認知品質を安定的に再現できるかどうかは通信環境にも依存する。一方で、センサーデータ等の情報から、船上機器の状態監視や状態評価を行うことを目的とする場合は、求められる通信環境も緩和される。

判断のモジュールにおいては、計画立案やアドバイスといった支援が中心になると想定。

対応、制御装置のモジュールに対しては、支援対象外となることを想定。

操船関連の自動化・遠隔化を行うシステムの安全性を評価する際には、上記5つのモジュール単位でそれぞれの信頼性を確認したうえで、これらのモジュールを統合した状態で機能確認を行うといった2段階の検証を考えている。

なお、技術開発は継続的に進められ、各モジュールのアップデートも行われることになる。そういったときに、差分をとりやすくなることは、モジュール単位で検証を進めていくことの大きなメリットになると考えている。

4. NK技術研究所の取り組み

本会では、自動運航関連技術の安全性評価を行うための具体的な手法について研究を進めている。特に、リスク評価の際のハザードの抽出方法と定量的評価のためのコンピュータシミュレーションに注力している。

前述の通り、自動運航関連技術といっても多種多様であることから、自動化・遠隔化の対象を一旦操船に限定した上で詳細検討を行い、そこで得た知見を軸に、ほかの船上業務の自動化・遠隔化について

も検証を広げていくことを考えている。

4.1 網羅的なハザード抽出方法の検討

自動運転車でも予見可能な事故を防ぐというのが考え方にあるようだが、自動運航船でもそれは同じである。どういった状況下で、どの作業を、どの程度自動化・遠隔化するのか、また、有事の際は誰（船員もしくはシステム）がどういったタイミングで対応するのかについて考慮した上でハザードを抽出し、それらのリスクの大きさを見積もらなければならない。そのためには、既存船との技術の差分がどこに存在しているのかを正確に把握する必要がある。自動運航船を既存船と比較した場合、総合的なリスクは下がると考えているが、既存船にはなかった新しいリスクが発生する可能性はある。そういったところをきちんと見極め、適切な安全率を設けた上で運用することが当面は大事になるだろう。

そこで、本会では、まずハザードを網羅的に抽出するための手法について検討を進めている。具体的には、前述した8つの安全性評価のための基本要素をベースに、自動化・遠隔化する機能を明確にし、意思決定プロセスフローを考慮しながら整理することで、ハザードを抽出しやすくなるようなやり方を検討している。これまで本会が関わらせていただいた実証事業等から得た知見を表5に示すフォーマットで整理を進めている。統一的なフォーマットで複数の事例を比較検証することで、共通要件と特別要件の整理を図っていききたい。

自動運航船のリスク評価においては、機器故障に着目したハザードに加え、システム間連携やシステムと人間の協業に関するハザードについて検証することが重要となる。その観点から、以下のような視点で検証を進めているところである。

- ① システムと人の協業時に発生するハザード
- ② 情報収集装置→認知→判断→対応→制御装置の意思決定プロセスの流れの中に潜むハザード
- ③ 限定領域（運航設計領域）の妥当性検証

表5 安全性評価のための基本要素をベースとした意思決定プロセスフローの分析用フォーマット

タスク	モード	搭載に関する前提仕様								限定領域 (運航設計領域)	フォールバック
		情報収集装置 (Input)	認知		判断		対応		制御装置 (Output)		
			実行者	場所	実行者	場所	実行者	場所			
例)											
操船	輻輳海域	ECDIS 測深器 風向風速計 船速計 GNSS コンパス（ジャイロ/磁気） AIS ARPA 見張りセンサ	支援システム ＋ 船員	本船	【計画】システム ＋ 【承認】船員	本船	システム	本船	舵	地理条件： 環境条件： その他の条件：	船員

- ④ フォールバック発生シナリオの抽出
- ⑤ モードの切り替え時に発生しうるハザード

なお、HMIやサイバーセキュリティ、個々のモジュールにおけるコンピュータシステムの信頼性については、詳細設計が完了した段階において検証することになる。その際の検証方法としては、リスク評価というよりは、実機における接続試験やコンピュータシミュレーションといった手法が適していると考えている。

4.2 定量的評価方法の確立

リスク評価だけでは社会実装につなげることは難しい。船級協会としては、一定の基準を設け、それをクリアしてもらう必要がある。その視点から、コンピュータシミュレーションに注目している。現在検討を進めている定量的評価手法のイメージを図6に示す。

開発された自動操船のアルゴリズムの安全性を評価するためには、事故につながるシナリオに適切に対応できるかどうかの検証が必要である。様々な他船遭遇パターンと外乱の組み合わせをファストタイムシミュレーションで網羅的に検証することになる。

これに加え、フルミッション型シミュレータを用いたリアルタイムシミュレーションを行うことで、緊急時に船員へタスクを引き継ぐタイミングや必要なHMIについても検証を行うことを考えている。

シミュレーションの結果を定量的に評価するためには、評価指標を決める必要がある。そこで、日本の海技者に協力をお願いし、操船の定量的評価の手法^{11)・14)}についても開発を進めている。コンピュータシミュレーションを行う際のシナリオの作成や、シミュレーション結果を評価するための指標として何が適切かについて検討を進めており、本年度中には一度検討結果をまとめたいと考えている。

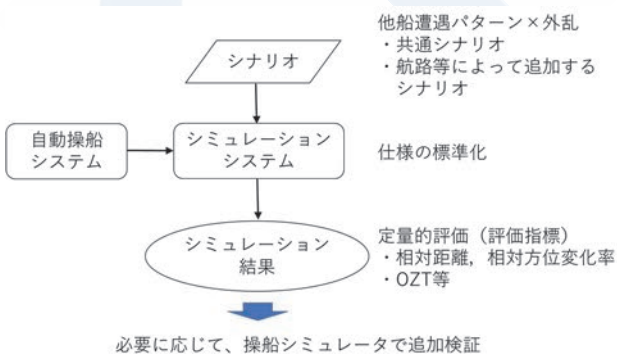


図6 自動操船システムの定量的評価方法

4.3 遠隔制御に関する要件の確立

自動運航船において、遠隔化の技術は、監視、支援（情報提供、計画作成支援等）、制御（直接的な

操作等）といった3種類の活用方法がある。遠隔制御施設において、どの性質の作業を担うのかによって、規定すべき要件は異なってくる。

また、遠隔特有の事情についても考慮する必要がある。具体的には、通信インフラや遠隔制御施設で使用する機器、従事するオペレーター等についても要件を整理しなければならない。本船だけでは完結しない。自動化技術の場合は、人と機械の連携の部分に注意する必要があるが、遠隔化技術の場合は、本船の船員と遠隔オペレーターの間での意思疎通を、どのように、どの程度まで図るかといったことも整理しなければならない。ここでも前述のConOpsの明確化が重要となってくる。

本会では、こういった遠隔化技術特有の事情を考慮した上で、主に下記3つの視点から検討を進めているところである。

- ① 通信の安定性の評価方法の確立
- ② 遠隔制御施設の要件の具体化
- ③ 遠隔制御従事者の要件の具体化

5. おわりに

自動運航船の分野において、自動運航船に対する合理的な規則を作ることが船級協会の役割である。本会は、これまで2018年5月と2020年1月にガイドラインを発行するなど、日本のステークホルダーと協力しながら、準備を着々と進めてきた。今後も、技術開発に遅れることなく、必要十分な自動運航船の安全要件を設けることができるよう、しっかりとしたバランス感覚をもって進めていきたい。

参考文献

- 1) ABS : ADVISORY ON AUTONOMOUS FUNCTIONALITY 2020
- 2) BV : Guidelines for Autonomous Shipping December 2017 Guidance Note NI 641 DT R00 E
- 3) DNV : Class guideline — DNVGL-CG-0264. Edition September 2018 Autonomous and remotely operated ships
- 4) LR : Code for Unmanned Marine Systems (February 2017)
- 5) 日本海事協会：自動運航、自律運航に関するガイドライン（Ver. 1.0）（2020年1月）
- 6) IMO : MSC.1/Circ.1604 (2019), INTERIM GUIDELINES FOR MASS TRIALS
- 7) 国土交通省海事局（令和2年12月）：自動運航

船の安全設計ガイドライン

- 8) VTMIS : EU OPERATIONAL GUIDELINES FOR SAFE, SECURE AND SUSTAINABLE TRIALS OF MARITIME AUTONOMOUS SURFACE SHIPS (MASS)
- 9) Norwegian Maritime Authority, RSV 12-2020: Guidance in connection with the construction or installation of automated functionality aimed at performing unmanned or partially unmanned operations
- 10) 塩莉恵, 伊藤博子, 柚井智洋, 石村恵以子, 三宅里奈, 工藤潤一, 河島園子: システムモデリングによるリスク解析手法の自動運航船の概念設計への適用, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第32号, 令和3年5月-6月
- 11) Shinya Nakamura, Naoki Okada: Development of Automatic Collision Avoidance System and Quantitative Evaluation of the Maneuvering Results, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TRANSSNAV), Vol 13, No.1, pp 133-141, 2019.3.
- 12) 中村紳也, 岡田尚樹: 自動避航システムの安全性評価, 本航海学会論文集, 142巻, pp18-28, 2020年10月.
- 13) 田丸人意, 西崎ちひろ, 榎野純, 今津隼馬: OZT 分布を用いた避航アルゴリズムの構築に関する基礎的研究, 日本航海学会論文集 第139巻 pp. 1-9, 2018
- 14) 間島隆博, 南真紀子, 澤田涼平, 福戸淳司: 自動避航操船の計算アルゴリズムの開発, 第19回海上技術安全研究所研究発表会 講演資料, 2019

単胴船に作用する6自由度のFroude-Krylov力の簡易算式の開発

松井 貞興*, 篠本 恭平**, 杉本 圭**, 芦田 晋作***

1. はじめに

船舶の設計において、波浪中の船体運動は乗船者の安全性や乗心地、船体構造設計のための波浪荷重、推進性能における波浪中抵抗増加など、多様な観点においてその高精度な推定が求められている。今日では、波浪中の船体運動をストリップ法や3次元パネル法等の耐航性ツールによって合理的に推定することができ、これらのツールは設計現場において実用に供されている。一方で、船体運動を数値解析に依らない簡易手法によって推定する事にも高い需要が存在する。例えば、構造強度評価のための波浪荷重推定では、船殻構造設計の工数上、個船毎に波浪荷重解析を実施する事のハードルが高く、鋼船規則であるCSR(Common Structural Rules)¹⁾では波浪荷重は船舶の主要パラメータを用いた簡易算式によって規定されている。またIMOの復原性基準²⁾においても、同様の理由で、横揺れの有効波傾斜係数や減衰力を簡易推定法によって求めたうえで安全性の判定を行うことが要求されている。

一般に、簡易推定法の“簡便さ”と“推定精度ならびに適用範囲”はトレードオフの関係にある。シリーズ計算の結果に対するフィッティングによって算式開発を行った場合、採用したサンプルデータから外れた対象に対する精度の保証は難しくなる。例えば、現状のCSR¹⁾において規定される船体運動ならびに加速度の算式は、同規則の適用船であるばら積み船と油タンカーのシリーズ計算に対するフィッティングによって決定されたもので、簡便ではあるが想定されていない船種やサイズの船舶に用いるには適さないものである。他方で、IMOの復原性基準²⁾において規定される有効波傾斜係数の推定式は、船体の横断面毎の形状情報を要するものであり、厳密性は高いがその分簡便さには欠く。これらに対し、“簡便さ”と“推定精度ならびに適用範囲”を両立することは、物理的考察に基づき、支配的因子を抽出し、その影響を調べ、最後に簡易化を行うという手順を踏むことで実現できると著者らは

考える。

以上を受け、本研究では、任意の船種及びサイズの単胴船の波浪中運動を簡易に推定することを目的に、物理的考察に基づく線形のFroude-Krylov力の簡易算式の開発を行う。目的を同じくする過去の研究としてJensenによる研究³⁾が挙げられるが、 $L \times B \times d$ の均一な箱船に対するストリップ法の定式化に立脚しており、船体形状の肥瘦の影響はいくつかの船舶に合うように係数処理によって考慮されている。これに対し本研究では、瘦せ型船型から肥大船型までのあらゆる船種を対象とするために、船舶の主要寸法やファインネス係数等の船型パラメータを適切に考慮した算式の開発を行う。開発した算式の推定精度を検証するため、77隻×2積付条件の実船型を用いて、線形の3次元耐航性プログラムによってあらゆる波向き、波長のFroude-Krylov力を計算し、比較を行った。

本論文ではFroude-Krylov力の算式開発に限定しているが、Froude-Krylov力は船体に作用する流体力のうち主要な成分を占め、この成分を陽な式で示すことはそれだけで完結した意義を持つ。その重要度は運動モードによって異なり、heave及びpitchについては、Froude-Krylov力は長波長域でleading termとなる主要成分である^{4) 5)}が、運動が大きくなる波長域ではradiation/scattering流体力も重要となる。これに対し、rollやsurgeについてはFroude-Krylov力が運動に対して特に支配的であることが知られている。Rollに関しては、scattering流体力とsway起因のradiation流体力が相殺するため、波浪強制力にFroude-Krylovモーメントのみを用いた一自由度運動方程式によって十分な精度で推定することができ^{6) 7)}、復原性基準にもその考えが採用されている²⁾。Surgeに関しては、船舶が前後に細長いため近似的にFroude-Krylov力と船体重量のみによる推定が可能で、船体表面法線ベクトルの船長方向成分を考慮しないストリップ法の多くではこの計算法が採用されている⁸⁾。本論文で提案するFroude-Krylov力の簡易算式は、これら

* 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所

** 船体開発部

*** 川崎重工業株式会社（研究当時、日本海事協会）

の運動を簡易的に推定する上で特に有効に活用されるものと考えられる。

2. 諸定義

2.1 算式に用いる船型パラメータ

本論文で算式に用いる船型パラメータは、船長 L (垂線間長 L_{pp})、全幅 B 、平均喫水 d 、方形係数 C_b ($=\nabla/LBd$: ∇ は排水容積)、水線面積係数 C_w ($=A_w/LB$: A_w は水線面積)、中央横断面積係数 C_m 、キール上重心高さ KG 、重心基準の浮面心前後位置 x_f ($=$ (浮面心前後位置 LCF) $-$ (重心前後位置 LCG))の8つとする。 x_f は、後述の式(18)によって定義される。また、本論文では適宜、柱形係数 C_p ($=C_b/C_m$) および堅柱形係数 C_{vp} ($=C_b/C_w$) を用いる。また別途、後述の式(19)、(20)で定義される縦メタセンタ高さ GM_L および横メタセンタ高さ GM を用いた場合の算式についても開発する。

2.2 座標系及び入射波

座標系及び運動の向きの定義を図1に示す。 x, y, z 座標原点はそれぞれ重心前後位置 LCG 、センターライン、静水面高さにとる。

本論文では、線形理論に基づき規則波中の周波数応答を仮定し、複素振幅で表示する。すなわち、周期変動する量 $a(t)$ は、全て次式で定義される複素数 A によって扱う。

$$\begin{aligned} a(t) &= \Re[Ae^{i\omega_e t}] \\ &= \Re[A] \cos \omega_e t - \Im[A] \sin \omega_e t \\ &= |A| \cos(\omega_e t + \arg(A)) \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 ω_e は出会い波周波数であり、 $\Re[A]$ 、 $\Im[A]$ 、 $|A|$ 、 $\arg(A)$ はそれぞれ複素数 A の実部、虚部、振幅、偏角を意味する。

入射波は図1の右図に示すとおり定義し、その速度ポテンシャルは波の山が船体の重心位置に達する瞬間を時刻の基準($t=0$)とすると、次のように表される。

$$\phi_0 = \frac{ig\zeta_a}{\omega} e^{kz-ik(x \cos \beta + y \sin \beta)} \quad (2)$$

ここに、 g 、 ζ_a 、 ω 、 $k(=\omega^2/g)$ 、 β はそれぞれ重力加速度、入射波の振幅、波周波数、波数、波向きである。以降は、 $\omega/ig\zeta_a$ で無次元化された以下の単位速度ポテンシャルを用いる。

$$\varphi_0 = e^{kz-ik(x \cos \beta + y \sin \beta)} \quad (3)$$

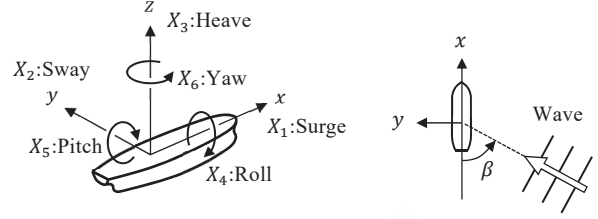


図1 Definitions of coordinate system, motion and incident wave.

2.3 Froude-Krylov力の定義と長波長域の漸近値

線形のFroude-Krylov力は、入射波の速度ポテンシャルの喫水線下の船体表面 S_H 上の積分として次式のように定義される。

$$E_i^{FK} = -\rho g \zeta_a \int_{S_H} \varphi_0 n_i dS \quad (i=1\sim 6) \quad (4)$$

$E_i^{FK}(i=1\sim 6)$ はそれぞれsurge, sway, heave, roll, pitch, yaw方向のFroude-Krylov力である。式(4)の定義は、基礎流場を一樣流れと近似する場合、前進速度に依らず成り立つもので、前進速度の影響は、出会い波周波数 ω_e においてのみ表れる。式(4)において、 ρ は海水密度、 n_i ($i=1\sim 6$)は船体表面の外向き単位法線ベクトル $\{n_x, n_y, n_z\}^T$ を6自由度(重心まわり)に拡張したもので、次のように定義される。

$$n_i = \begin{cases} n_x & (i=1) \\ n_y & (i=2) \\ n_z & (i=3) \\ yn_z - (z-z_G)n_y & (i=4) \\ (z-z_G)n_x - xn_z & (i=5) \\ xn_y - yn_x & (i=6) \end{cases} \quad (5)$$

ただし、 z_G は重心の z 座標である($z_G = KG - d$)。加えて、単位厚さの横断面に作用するsurge, sway, heave, roll方向のFroude-Krylov力(以下、断面Froude-Krylov力と呼ぶ)を、船体の横断面の外周線 $C_H(x)$ 上の積分として次式のように定義する。

$$f_i^{FK}(x) = -\rho g \zeta_a \int_{C_H(x)} \varphi_0 n_i dl \quad (i=1\sim 4) \quad (6)$$

このとき、 E_i^{FK} は $f_i^{FK}(x)$ を用いて次式のように表せる。

$$E_i^{FK} = \begin{cases} \int_{x_A}^{x_F} f_i^{FK}(x) dx & (i = 1 \sim 4) \\ \int_{x_A}^{x_F} -x f_3^{FK}(x) dx & (i = 5) \\ \int_{x_A}^{x_F} x f_2^{FK}(x) dx & (i = 6) \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 x_A, x_F はそれぞれA.P.とF.P.の x 座標である。ただし、式(7)の E_5^{FK}, E_6^{FK} では、 n_x に起因する項の影響は小さいとして、無視している。

以降は、無次元化された量にover barをつけることにし、Froude-Krylov力を次のように無次元化する。

$$\bar{E}_i^{FK} = \frac{E_i^{FK}}{\rho g \zeta_a L B \varepsilon_i} \quad (i = 1 \sim 6) \quad (8)$$

$$\bar{f}_i^{FK}(x) = \frac{f_i^{FK}(x)}{\rho g \zeta_a B \varepsilon_i} \quad (i = 2 \sim 4) \quad (9)$$

ここに、 ε_i は次で定義される代表長さである。

$$\varepsilon_i = \begin{cases} 1 & (i = 1 \sim 3) \\ B & (i = 4) \\ L & (i = 5, 6) \end{cases} \quad (10)$$

同様に、位置変数には x を L で無次元化した $\bar{x}$ ならびに y, z をそれぞれ B で無次元化した $\bar{y}, \bar{z}$ を用いる。

Froude-Krylov力の長波長域における漸近値は復原力に対応し、両者の整合性が運動の漸近値に影響を及ぼすことが知られている⁴⁾。ここでは、簡易算

式の長波長域における漸近値の評価のために、Froude-Krylov力の厳密な漸近値を示しておく。入射波の速度ポテンシャルの式(3)を k についてマクローリン展開し、式(4)に代入してスカラー場に対するガウスの発散定理（以下、ガウスの勾配定理と呼ぶ）を適用することで、次の表示を得る。

$$\bar{E}_1^{FK} = i \bar{k}_l \frac{dC_b}{L} + O(k^2) \quad (11)$$

$$\bar{E}_3^{FK} = C_w - i \bar{k}_l \bar{x}_f C_w - k d C_b + O(k^2) \quad (12)$$

$$\bar{E}_5^{FK} = i \bar{k}_l \frac{dC_b}{L^2} \text{GM}_L - \bar{x}_f C_w + O(k^2) \quad (13)$$

$$\bar{E}_2^{FK} = i \bar{k}_w \frac{dC_b}{B} + O(k^2) \quad (14)$$

$$\bar{E}_6^{FK} = \frac{\bar{k}_l \bar{k}_w}{L^3 B^2} \int_{V_H} (x^2 - y^2) dV + O(k^3) \quad (15)$$

$$\bar{E}_4^{FK} = -i \bar{k}_w \frac{dC_b}{B^2} \text{GM} + O(k^2) \quad (16)$$

ここに、 $O(k^n)$ はランダウの記号、 V_H は排水領域、 $\bar{k}_l, \bar{k}_w$ はそれぞれ次で定義される船長方向、幅方向の無次元波数である。

$$\bar{k}_l = kL \cos \beta, \bar{k}_w = kB \sin \beta \quad (17)$$

式(12), (13)の変形には以下の浮面心前後位置LCFの定義を用いている。

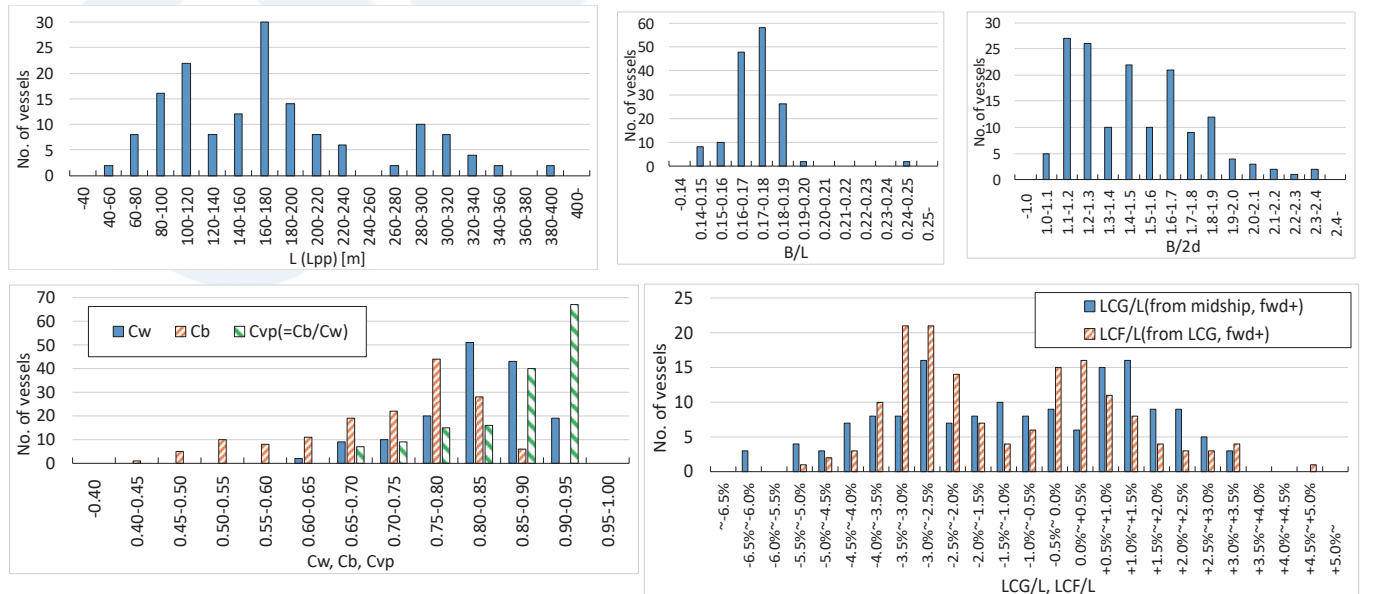


図2 Histogram of hull-form parameters of target ships.

$$\bar{x}_f = \frac{1}{C_w} \int_{\bar{x}_A}^{\bar{x}_F} \bar{x} \bar{B}_w(\bar{x}) d\bar{x} \quad (18)$$

ここに、 $\bar{B}_w(\bar{x})$ は水線幅 $B_w(\bar{x})$ を B で除した値である。また、式(13)右辺の GM_L は縦メタセンタ高さ（ここでは重心まわりとして定義する）、式(16)右辺の GM は横メタセンタ高さで、それぞれ浮心高さ z_B と重心高さ z_G を用いて次のように表す。

$$GM_L = \frac{L^2}{dC_b} \int_{\bar{x}_A}^{\bar{x}_F} \bar{x}^2 \bar{B}_w d\bar{x} + z_B - z_G \quad (19)$$

$$GM = \frac{B^2}{dC_b} \int_{\bar{x}_A}^{\bar{x}_F} \frac{\{\bar{B}_w(\bar{x})\}^3}{12} d\bar{x} + z_B - z_G \quad (20)$$

式(19)、(20)の右辺の下線部はそれぞれ縦メタセンタ半径 BM_L 、横メタセンタ半径 BM である。

式(12)～式(16)より、Froude-Krylov力の長波長域における漸近値が復原力に対応していることが確認できる。式(12)右辺第1項はheaveの無次元復原力係数、式(13)右辺第1項の $GM_L \times dC_b/L^2$ はpitchの無次元復原力係数、式(12)、(13)右辺第2項の $-\bar{x}_f C_w$ はheave-pitch連成の無次元復原力係数、式(16)右辺第1項の $GM \times dC_b/B^2$ はrollの無次元復原力係数にあたる。

2.4 算式の精度検証のためのシリーズ計算

算式の精度検証のため、77隻×2積付条件（満載及びバラスト積付状態）の存在する船舶を用いて、日本海事協会が開発した線形の3次元耐航性プログラム⁹⁾による計算を実施した。当プログラムは一樣流れ近似に基づくもので、喫水線下の船体表面パネルから式(4)の積分によってFroude-Krylov力を計算している。一般的な商船を対象としているため、喫水線以下は左右対称かつ単胴船に限定されるが、用いた船種はばら積貨物船、油タンカー、鉱石運搬船、一般貨物船、LNG船、LPG船、コンテナ運搬船、木材チップ運搬船、自動車運搬船、RO-RO船、冷蔵貨物運搬船、セメント運搬船等、多種にわたり、図2に示す通り幅広い範囲の $L, C_w, C_b, B/L, B/2d$ をカバーしている。

本論文において算式との比較に用いた波条件は、波向き $\beta = 90^\circ$ （横波） $\sim 180^\circ$ （向波）の 30° 刻みとし、波長は波長船長比 $\lambda/L = 0.5, 0.7, 1.0, 1.5$ とした。Rollについてはより長波長域の推定が重要となるケースも有るが、別途長波長の漸近値の評価を数式上で行っているため数値的な比較は実施していない。波向きは $\beta = 90^\circ \sim 180^\circ$ に限定しているが、左右対

称船舶に作用するFroude-Krylov力の実部と虚部は波向きに関して前後/左右対称あるいは反対称となるので、実部と虚部それぞれに対して検証を行うにあたり $\beta = 90^\circ \sim 180^\circ$ は過不足のない波向きの範囲である。なお、Froude-Krylov力は式(4)に基づいて計算されるため船速に依存しない。

3. Froude-Krylov力の簡易算式の開発

3.1 開発の基本方針

Froude-Krylov力は既知のスカラー場の船体表面積分であるから、簡易算式の開発の要は“船体形状をどのように近似するか”にある。本研究では、Froude-Krylov力を主要な船型パラメータと波条件のみを変数に持つ初等関数で表現することを目的としているため、船体形状を船舶の主要な船型パラメータによって一意に定まるような解析的に積分可能な関数で近似する。船体形状の近似は以降の節で詳しく述べるが、算式が簡潔に、かつ積分値の評価として正しい近似となるように運動モード毎に異なる形状を選択する。特に、長波長域の漸近値が2.3節で示した厳密式に一致あるいは良い近似となるように気を付けて決定している。また、船体表面積分については、断面Froude-Krylov力 $\bar{f}_i^{FK}(\bar{x})$ を求め、それを船長方向に積分するというアプローチをとり、その際に適宜被積分関数の簡略化を行う。例えば断面Froude-Krylov力にはスミス修正係数（ $e^{-kd'(\bar{x})}$ ： $d'(\bar{x})$ は断面喫水）が現れるが、この長手方向分布を扱うと積分が煩雑あるいは不可能になるため、断面喫水 $d'(\bar{x})$ を積分値が等価になるような定数 d_e （以降等価喫水と呼ぶ）に置き換えることで被積分関数を単純化している。

3.2 Surge

$\bar{E}_1^{FK}$ を簡易に計算する方法の出発点として、式(4)にガウスの勾配定理を適用した次の表示が用いられることが多い。

$$\begin{aligned} \bar{E}_1^{FK} &= -\frac{1}{LB} \int_{V_H} \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} dV \\ &= i\bar{k}_l \int_{\bar{x}_A}^{\bar{x}_F} e^{-i\bar{k}_l \bar{x}} \left\{ \int_{A_H(\bar{x})} e^{kz - iky \sin \beta} \frac{dy dz}{LB} \right\} d\bar{x} \end{aligned} \quad (21)$$

ここに、 $A_H(\bar{x})$ は喫水線下の横断面である。流体力の計算に n_x を用いないストリップ法プログラムでは、通常 $\bar{E}_1^{FK}$ は式(21)に基づいて計算され、その中には $A_H(\bar{x})$ 上の積分を数値的に解く方法、あるいはより簡単に入射波の波粒子速度を一点で代表して解く方法等がある^{8) 10)}。ここでは、断面を矩形で近似

した上で解析的に求める。断面形状を幅 $B'(\bar{x})$ 、深さ $d'(\bar{x})$ としたとき、 $A_H(\bar{x})$ 上の積分は次のように表される。

$$\int_{A_H(\bar{x})} e^{kz - iky \sin \beta} \frac{dydz}{LB} = \frac{1 - e^{-kd'(\bar{x})}}{kL} \frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w \bar{B}'(\bar{x})}{2} \quad (22)$$

ここに $\bar{B}'(\bar{x}) = B'(\bar{x})/B$ である。式(22)を式(21)に代入して次のように近似する。

$$\bar{E}_1^{FK} \cong i(1 - e^{-kd_e}) \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \frac{\bar{k}_l}{kL} \int_{\bar{x}_A}^{\bar{x}_F} e^{-i\bar{k}_l \bar{x}} \bar{B}'(\bar{x}) d\bar{x} \quad (23)$$

式(23)の近似では積分を簡単にするため

$$\sin \frac{\bar{k}_w \bar{B}'(\bar{x})}{2} \cong \bar{B}'(\bar{x}) \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \quad (24)$$

としており、さらにスミス修正係数 $e^{-kd'}$ の喫水 $d'(x)$ を等価喫水 d_e に置き換え積分の外に出している。ここで、水面下形状の y - z 平面への投影面は $B \times dC_m$ の矩形に近似し得ると考え、 $d_e = dC_m$ とする。また、 $\bar{B}'(\bar{x})$ の分布は浮心前後位置LCBを中心とした前後対称の面積 C_p の台形分布で仮定する：

$$\bar{B}'(\bar{x}) = \begin{cases} 1 & \text{for } |\bar{x}| \leq C_p - 0.5 \\ \frac{0.5 - |\bar{x}|}{1 - C_p} & \text{for } C_p - 0.5 < |\bar{x}| \leq 0.5 \end{cases} \quad (25)$$

面積を C_p としたのは無次元排水量を $C_b (= C_p C_m)$ とするためである。以上を式(23)に代入し、次の提案算式を得る。

$$\bar{E}_1^{FK} = i(1 - e^{-kdC_m}) \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \times \left(\frac{2}{kL} \sin \frac{C_p \bar{k}_l}{2} \right) \left\{ \frac{2}{(1 - C_p) \bar{k}_l} \sin \frac{(1 - C_p) \bar{k}_l}{2} \right\} \quad (26)$$

提案算式(26)を k について展開すると、その長波長域における漸近値は厳密値(11)に一致する事が確認できる。

開発した算式(26)と、2.4節で示した実船のシリーズ計算値を比較したものを図3に示す。図3より、 $\Im[\bar{E}_1^{FK}]$ はいずれの船舶、波条件においても良好な精度を有していることが分かる。 $\Re[\bar{E}_1^{FK}]$ については、

算式では前後対称船型を仮定したために奇関数の対称領域積分より0となる。これに対して、実船の値も高々 $\Re[\bar{E}_1^{FK}] = 0.02$ 程度であり、船型の前後非対称影響は無視し得ることが確認できる。

なお、一般商船の船体中央横断面積係数は殆どが $C_m > 0.96$ の範囲にあるため、算式で $C_m = 1$ としても多くの場合精度は殆ど低下しない。また、 $\bar{B}'(\bar{x})$ を式(25)にみられる台形ではなく面積 C_p の矩形分布で近似した場合、 $\bar{E}_1^{FK}$ は式(26)右辺の中括弧を除いた式となるが、その場合短波長域における推定精度が著しく低下することが確認された。 n_x は主に船首尾付近で値を持つため、他の流体力よりも船首尾の形状近似の重要性が高く、幅の船長方向分布を実船型に近い台形(表1を参照)とすることで高精度の算式が得られた。

3.3 Heave及びpitch

船体の横断面形状を幅 $B'(\bar{x})$ 、深さ $d'(\bar{x})$ の矩形とみなしたとき、 z 方向の断面Froude-Krylov力 $\bar{f}_3^{FK}(\bar{x})$ は次式となる。

$$\bar{f}_3^{FK}(\bar{x}) = \left\{ \frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w \bar{B}'(\bar{x})}{2} \right\} e^{-kd'(\bar{x}) - i\bar{k}_l \bar{x}} \quad (27)$$

式(27)を式(7)に代入し、式(24)の近似を行い、さらに等価喫水 d_e を用いてスミス修正係数を積分の外に出すことで、 $\bar{E}_3^{FK}, \bar{E}_5^{FK}$ は次のように表すことができる。

$$\bar{E}_3^{FK} \cong e^{-kd_e} \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \int_{\bar{x}_A}^{\bar{x}_F} e^{-i\bar{k}_l \bar{x}} \bar{B}'(\bar{x}) d\bar{x} \quad (28)$$

$$\bar{E}_5^{FK} \cong e^{-kd_e} \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \int_{\bar{x}_A}^{\bar{x}_F} -\bar{x} e^{-i\bar{k}_l \bar{x}} \bar{B}'(\bar{x}) d\bar{x} \quad (29)$$

ここで等価喫水 d_e は、水面下の痩せを考慮して $d_e = dC_{vp}$ とする。また、 $\bar{E}_3^{FK}, \bar{E}_5^{FK}$ は n_z に関する積分なので、船型の z 方向投影面形状、すなわち水線面形状が支配的であると考えられる。このことから、 $\bar{B}'(\bar{x})$ は水線幅 $\bar{B}_w(\bar{x})$ に相当すると考え、LCFを中心とした面積 C_w の矩形分布であると仮定する：

$$\bar{B}'(\bar{x}) = \begin{cases} 1 & \text{for } |\bar{x} - \bar{x}_f| \leq C_w/2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (30)$$

以上を用いた場合、式(28)、(29)の積分は次の通りとなる。

$$\int_{\bar{x}_A}^{\bar{x}_F} e^{-i\bar{k}_l \bar{x}} \bar{B}'(\bar{x}) d\bar{x} = e^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f} \left(\frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{C_w \bar{k}_l}{2} \right) \quad (31)$$

$$\begin{aligned} & \int_{\bar{x}_A}^{\bar{x}_F} -\bar{x} e^{-i\bar{k}_l \bar{x}} \bar{B}'(\bar{x}) d\bar{x} \\ &= i e^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f} \frac{1}{\bar{k}_l} \left\{ \left(\frac{2}{\bar{k}_l} + 2i\bar{x}_f \right) \sin \frac{C_w \bar{k}_l}{2} - C_w \cos \frac{C_w \bar{k}_l}{2} \right\} \end{aligned} \quad (32)$$

式(31), (32)右辺にある $e^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f}$ は, 入射波の位相が船体の重心基準となっているのに対し, Froude-Krylov力の作用中心がLCFとなっていることによる位相差である。一方で, 式(32)右辺に見られる小括弧内の $\bar{x}_f$ は, $\bar{E}_5^{FK}$ が重心まわりのモーメントとして定義されていることによる重心と作用中心のレバーである。

以上の式は, 結果的に船体を“LCFを中心とした $LC_w \times B \times dC_{vp}$ の箱船”とみなすことで導出された式である。水線面形状を $LC_w \times B$ の矩形かつ喫水を dC_{vp} で一樣とみなす事は, 横波の場合は入射波面が $e^{-i\bar{k}_l \bar{x}} = 1$ と船長方向に均一になるため正しい近似であると言える。しかしながら, 縦波の短波長域では波面 $e^{-i\bar{k}_l \bar{x}}$ が船長方向に変化することで船型の重みが船長方向で一樣ではなくなるため, 船体形状を箱型で近似することに無理が生じる。そこで, 算式の簡潔さを損なうことなく縦波の短波長域において水線面ならびに水面下の肥瘦の影響を考慮するため, 算式の $\bar{k}_l$ を次の $\bar{k}_l'$ に置き換えることにする。

$$\bar{k}_l' = C_b^{-0.15} \bar{k}_l \quad (33)$$

船長方向無次元波数 $\bar{k}_l$ に修正を施したのは, 縦波かつ短波長域における値を変化させるためであり, 修正に C_b を用いたのは, $C_b = C_w C_{vp}$ より, 水線面の肥瘦(C_w)と水面下の肥瘦(C_{vp})の両方に対して補正を施すためである。指数の -0.15 は実船型の結果を踏まえ, 一致度が高くなるように決定している。

以上の議論から, 次式をheave, pitchのFroude-Krylov力の簡易算式として提案する。

$$\bar{E}_3^{FK} = e^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f - kdC_{vp}} \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \left(\frac{2}{\bar{k}_l'} \sin \frac{C_w \bar{k}_l'}{2} \right) \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \bar{E}_5^{FK} &= i e^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f - kdC_{vp}} \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \\ &\times \frac{1}{\bar{k}_l'} \left\{ \left(\frac{2}{\bar{k}_l'} + 2i\bar{x}_f \right) \sin \frac{C_w \bar{k}_l'}{2} - C_w \cos \frac{C_w \bar{k}_l'}{2} \right\} \end{aligned} \quad (35)$$

上式のうち, $e^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f}$ については $\bar{k}_l'$ ではなく $\bar{k}_l$ を用いているが, これは, 入射波の山/谷がLCF位置に達した瞬間に $\bar{E}_3^{FK}$ が最大/最小となるべきとの考えに基づいている。

開発した算式(34), (35)とシリーズ計算値を比較したものをそれぞれ図4, 図5に示す。いずれの船舶, 波条件においても良好な実用的な精度を有する算式であることが確認できる。船体形状の前後非対称性に起因する $\Im[\bar{E}_3^{FK}]$, $\Re[\bar{E}_5^{FK}]$ についても良い相関が見られ, このことは, z方向力の作用中心がLCFにあるとみなすことが妥当であることを意味する。

式(34), (35)の振幅は, 図2より $\bar{x}_f$ の値は ± 0.05 程度と小さいので $\bar{x}_f$ の二乗の項を無視し, 次式のように表せる。

$$|\bar{E}_3^{FK}| = e^{-kdC_{vp}} \left| \frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right| \left| \frac{2}{\bar{k}_l'} \sin \frac{C_w \bar{k}_l'}{2} \right| \quad (36)$$

$$\begin{aligned} |\bar{E}_5^{FK}| &= e^{-kdC_{vp}} \left| \frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right| \\ &\times \left| \frac{1}{\bar{k}_l'} \left(\frac{2}{\bar{k}_l'} \sin \frac{C_w \bar{k}_l'}{2} - C_w \cos \frac{C_w \bar{k}_l'}{2} \right) \right| \end{aligned} \quad (37)$$

すなわち, $\bar{x}_f$ は主に位相の計算に対して用いられるもので, 振幅への影響は無視し得る。以上の算式において, $\bar{k}_w = 0, C_w = C_b = 1$ とするとJensenによる算式³⁾と一致することが確認できる。提案算式は, 数式の煩雑さはJensenの算式とさほど変わらず, 船体形状パラメータ C_b, C_w の影響を適切に考慮し, さらに位相の情報も $\bar{x}_f$ によって明確に得られるという点で高度化された算式となっている。

Heaveの提案算式(34)の長波長域の漸近値は, 厳密式(12)に一致することが確認できる。一方でpitchの算式(35)は, 長波長域で次の値に漸近する。

$$\bar{E}_5^{FK} \sim i \bar{k}_l' \frac{C_w^3}{12} - \bar{x}_f C_w \quad \text{as } k \rightarrow 0 \quad (38)$$

右辺を厳密式(13)と照らし合わせると, pitchの無次元復原力係数 $dC_b/L^2 \times GM_L$ に相当する量が次のように対応していることが分かる。

$$\frac{dC_b}{L^2} GM_L \leftrightarrow C_b^{-0.15} \frac{C_w^3}{12} \quad (39)$$

式(39)右辺は $\bar{B}_w(\bar{x})$ を矩形分布(式(30)右辺)で近似した時のpitchの無次元復原力係数 $C_w^3/12$ に補正 $C_b^{-0.15}$ が掛けられた式で, 式(39)左辺とは一致しな

いものの悪く無い近似となっており、長波長において実用上問題ない精度を有していることは図5から確認できる。なお、 $\bar{B}'(\bar{x})$ を式(30)のような矩形ではなく台形分布で近似した場合についても検討を行ったが、算式が煩雑になる割には大きな精度の向上はみられなかった。結果的に、矩形分布近似に式(33)の修正を施した式(34)、(35)が簡潔さと精度を兼ね揃えており、本研究ではこれらを提案算式とした。

3.4 Sway及びyaw

船体の横断面形状を幅 $B'(\bar{x})$ 、深さ $d'(\bar{x})$ の矩形とみなしたとき、 y 方向の断面Froude-Krylov力 $\bar{f}_2^{FK}(\bar{x})$ は次式のようにになる。

$$\bar{f}_2^{FK}(\bar{x}) = i\{1 - e^{-kd'(\bar{x})}\} \left\{ \frac{2}{KB} \sin \frac{\bar{k}_w \bar{B}'(\bar{x})}{2} \right\} e^{-i\bar{k}_l \bar{x}} \quad (40)$$

式(40)を式(7)に代入し、式(24)の近似を行い、等価喫水 d_e を用いてスミス修正係数を積分の外に出すことで、 $\bar{E}_2^{FK}, \bar{E}_6^{FK}$ を次のように表す。

$$\bar{E}_2^{FK} \cong i(1 - e^{-kd_e}) \left(\frac{2}{KB} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \int_{\bar{x}_A}^{\bar{x}_F} e^{-i\bar{k}_l \bar{x}} \bar{B}'(\bar{x}) d\bar{x} \quad (41)$$

$$\bar{E}_6^{FK} \cong i(1 - e^{-kd_e}) \left(\frac{2}{KB} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \int_{\bar{x}_A}^{\bar{x}_F} \bar{x} e^{-i\bar{k}_l \bar{x}} \bar{B}'(\bar{x}) d\bar{x} \quad (42)$$

ところで、 $\bar{f}_2^{FK}(\bar{x})$ の定義式(6)は表面積分による定義であるが、これにガウスの勾配定理を適用することで、 φ_0 の横断面上の面積分に置き換えることもできる。この事実から、等価喫水は喫水線下の痩せの影響を考慮して $d_e = dC_{vp}$ と近似する。ただし、 $\bar{E}_6^{FK}$ については本節末にて後述の長波長域における漸近値を考慮して $d_e = dC_{vp}^2$ と与える。また、幅 $\bar{B}'(\bar{x})$ の分布はLCBを中心とした面積 C_w の矩形分布と仮定する：

$$\bar{B}'(\bar{x}) = \begin{cases} 1 & \text{for } |\bar{x}| \leq C_w/2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (43)$$

式(43)を式(41)、(42)に代入することで、結局次の簡易算式を得る。

$$\bar{E}_2^{FK} = i(1 - e^{-kdC_{vp}}) \left(\frac{2}{kB} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \left(\frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{C_w \bar{k}_l}{2} \right) \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \bar{E}_6^{FK} &= (1 - e^{-kdC_{vp}^2}) \left(\frac{2}{kB} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \\ &\times \frac{1}{\bar{k}_l} \left(\frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{C_w \bar{k}_l}{2} - C_w \cos \frac{C_w \bar{k}_l}{2} \right) \end{aligned} \quad (45)$$

開発した算式(44)、(45)とシリーズ計算値を比較したものをそれぞれ図6、図7に示す。いずれの船舶、波条件においても良好な精度を有していることが分かる。 $\Re[\bar{E}_2^{FK}]$ と $\Im[\bar{E}_6^{FK}]$ については算式では0で、計算値でも高々 $\Re[\bar{E}_2^{FK}] = 0.01$ 、 $\Im[\bar{E}_6^{FK}] = 0.002$ 程度であり、殆ど0とみなしてよい。この事実は、 y 方向力の作用中心がLCBにあるとみなすことが妥当であることを意味している。提案算式は、 $\bar{E}_3^{FK}, \bar{E}_5^{FK}$ と同じく、船体を $LC_w \times B \times dC_{vp}$ の箱型とみなした式となっている。3.3節では、船体を箱型とみなした場合、 z 方向Froude-Krylov力は縦波の短波長域で精度が低下すると説明したが、縦波における y 方向力はそもそも0であるために、 $\bar{E}_2^{FK}, \bar{E}_6^{FK}$ については式(33)のような補正を施さなくとも十分実用的な精度を有している。

Swayの簡易算式(44)を k で展開すると、その長波長域における漸近値は厳密値(14)に一致することが確かめられる。一方でyawの簡易算式(45)は、 k の二次のオーダーまで展開すると次のように表される。

$$\bar{E}_6^{FK} \sim \bar{k}_w \bar{k}_l \frac{d C_w C_b^2}{B} \frac{1}{12} \quad \text{as } k \rightarrow 0 \quad (46)$$

式(46)と厳密式(15)の右辺同士を照合すると、次のように対応することが確かめられる。

$$\frac{1}{L^3 B d} \int_{V_H} (x^2 - y^2) dV \leftrightarrow \frac{C_w C_b^2}{12} \quad (47)$$

$\bar{E}_6^{FK}$ において $d_e = dC_{vp}^2$ とした理由は、式(47)の対応を考慮した結果である。すなわち、 $d_e = dC_{vp}^2$ とすることで導かれた式(47)の右辺は、左辺の積分のよい近似となっている。等価喫水を $\bar{E}_2^{FK}$ と同じ $d_e = dC_{vp}$ とした場合、式(47)の右辺は $C_w^2 C_b / 12$ となり、その近似精度は落ちる。事実、等価喫水を dC_{vp} とするよりも dC_{vp}^2 とした方が、全体的に $\bar{E}_6^{FK}$ の推定精度が高いことが確認された。

3.5 Roll

まず、 x 軸（喫水線高さ）まわりの断面Froude-Krylovモーメントを $\bar{f}_{40}^{FK}(\bar{x})$ 、Froude-Krylovモー

ントを $\bar{E}_{40}^{FK}$ と書くと、重心まわりの値 $\bar{f}_4^{FK}(\bar{x})$, $\bar{E}_4^{FK}$ との関係は、 n_4 の定義式(5)より次式の通りとなる。

$$\begin{aligned}\bar{f}_4^{FK}(\bar{x}) &= \bar{f}_{40}^{FK}(\bar{x}) + \bar{z}_G \bar{f}_2^{FK}(\bar{x}) \\ \bar{E}_4^{FK} &= \bar{E}_{40}^{FK} + \bar{z}_G \bar{E}_2^{FK}\end{aligned}\quad (48)$$

以降は、 x 軸まわりのモーメント $\bar{f}_{40}^{FK}(\bar{x})$, $\bar{E}_{40}^{FK}$ について考える。

断面形状を幅 $B'(\bar{x})$ 、深さ $d'(\bar{x})$ の矩形とみなしたとき、断面Froude-Krylovモーメント $\bar{f}_{40}^{FK}(\bar{x})$ は次式のようになる。

$$\begin{aligned}\bar{f}_{40}^{FK}(\bar{x}) &= ie^{-i\bar{k}_l \bar{x}} \left\{ \frac{2}{KB} \sin \frac{\bar{k}_w \bar{B}'(\bar{x})}{2} \right. \\ &\quad \times \left[\frac{1 - \{1 + kd'(\bar{x})\}e^{-kd'(\bar{x})}}{KB} \right] \\ &\quad \left. - ie^{-i\bar{k}_l \bar{x} - kd'(\bar{x})} \frac{1}{\bar{k}_w} \left\{ \frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w \bar{B}'(\bar{x})}{2} - \bar{B}'(\bar{x}) \cos \frac{\bar{k}_w \bar{B}'(\bar{x})}{2} \right\} \right\}\end{aligned}\quad (49)$$

右辺第1項は左右の側壁からの寄与、第2項は底面からの寄与である。式(49)は、梅田らによる有効波傾斜係数の簡易推定式¹¹⁾と同様のものである。ただし、梅田らによる E_4^{FK} の推定法は、横断面毎に $d'(x)$, $B'(x)$ の情報を与え、 $f_4^{FK}(x)$ を数値積分することを要求しており、推定精度は高いがその分必要とされるパラメータの数は多い。

さて、式(49)を式(7)に代入し、式(49)の右辺第1項には式(24)の近似を適用し、第2項には次の近似を適用する。

$$\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w \bar{B}'}{2} - \bar{B}' \cos \frac{\bar{k}_w \bar{B}'}{2} \cong \bar{B}'^3 \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} - \cos \frac{\bar{k}_w}{2} \right)\quad (50)$$

式(50)の近似は、左辺を $\bar{k}_w$ で展開したときのleading termが $\bar{B}'^3$ に比例することを根拠にしている。さらに、式(49)の右辺第1項、第2項はそれぞれ n_y , n_z に関する積分項なので、両方で異なる形状近似を行うべく、それぞれ異なる等価喫水 d_{e1} , d_{e2} ならびに幅 $\bar{B}'_1(\bar{x})$, $\bar{B}'_2(\bar{x})$ を用いて区別することにする。以上によって、 $\bar{E}_{40}^{FK}$ を次のように表す。

$$\begin{aligned}\bar{E}_{40}^{FK} &\cong i \left\{ \frac{1 - (1 + kd_{e1})e^{-kd_{e1}}}{kB} \right\} \left(\frac{2}{kB} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \\ &\times \int_{\bar{x}_A}^{\bar{x}_F} \bar{B}'_1(\bar{x}) e^{-i\bar{k}_l \bar{x}} d\bar{x} - ie^{-kd_{e2}} \frac{1}{\bar{k}_w} \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} - \cos \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \\ &\times \int_{\bar{x}_A}^{\bar{x}_F} \{\bar{B}'_2(\bar{x})\}^3 e^{-i\bar{k}_l \bar{x}} d\bar{x}\end{aligned}\quad (51)$$

続いて式(51)右辺の積分の近似値を考える。式(51)の右辺第1項、すなわち側壁に起因する項については、喫水がモーメントのレバーとして強く影響するため $d_{e1} = d$ とする。また、 $\bar{B}'_1(\bar{x})$ をLCBを中心とした面積 C_b の矩形と仮定する：

$$\bar{B}'_1(\bar{x}) = \begin{cases} 1 & \text{for } |\bar{x}| \leq C_b/2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}\quad (52)$$

LCBを中心としたのは、本項は n_y に関する積分であるから $\bar{E}_2^{FK}$, $\bar{E}_6^{FK}$ と同様と考えたためであり、面積を C_b としたのは、 $d_{e1} \bar{B}'_1(x)$ の積分値を排水容積 $LBdC_b$ に一致させるためである。以上により式(51)の右辺第1項は次のように表される。

$$(\text{第1項}) = i \left\{ \frac{1 - (1 + kd)e^{-kd}}{kB} \right\} \left(\frac{2}{kB} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \left(\frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{C_b \bar{k}_l}{2} \right)\quad (53)$$

次に、式(51)の右辺第2項、すなわち底面に起因する項は n_z に関する積分であるため、heave, pitchのFroude-Krylov力と同様に $d_{e2} = dC_{vp}$ 、かつ $\bar{B}'_2(\bar{x})$ は水線幅 $\bar{B}_w(\bar{x})$ に相当すると考え、LCFを中心とした面積 C_w の台形分布とみなす：

$$\begin{aligned}\bar{B}'_2(\bar{x}) &= \begin{cases} 1 & \text{for } |\bar{x} - \bar{x}_f| \leq C_w - 0.5 \\ \frac{0.5 - |\bar{x}|}{1 - C_w} & \text{for } C_w - 0.5 < |\bar{x} - \bar{x}_f| \leq 0.5 \end{cases}\end{aligned}\quad (54)$$

ところが式(54)の形状を採用した場合、 $\{\bar{B}'_2(\bar{x})\}^3 e^{-i\bar{k}_l \bar{x}}$ の積分値の表示が煩雑になる。そこで、入射波面の船長方向分布 $e^{-i\bar{k}_l \bar{x}}$ が横波で $e^{-i\bar{k}_l \bar{x}} = 1$ となることを利用し、横波における推定精度を低下させずに式の簡略化を行うことにする。すなわち、台形分布の式(54)を用いた $\{\bar{B}'_2(\bar{x})\}^3 e^{-i\bar{k}_l \bar{x}}$ の積分値は横波において

$$\int_{\bar{x}_A}^{\bar{x}_F} \{\bar{B}'_2(\bar{x})\}^3 d\bar{x} = \frac{3C_w - 1}{2} \quad (55)$$

と簡潔に表されることを踏まえ、 $\bar{B}'_2(\bar{x})$ の分布を“LCFを中心とした面積 $(3C_w - 1)/2$ の矩形分布”とみなせば、横波における精度を保ったまま積分の複雑化を避けることができる。この場合、式(51)の右辺第2項の積分は次のように表される。

$$\int_{\bar{x}_A}^{\bar{x}_F} \{\bar{B}'_2(\bar{x})\}^3 e^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f} d\bar{x} = e^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f} \frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{(3C_w - 1)\bar{k}_l}{4} \quad (56)$$

結果、式(51)の右辺第2項は次のようになる。

$$\begin{aligned} (\text{第2項}) &= -ie^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f - kdC_{vp}} \frac{1}{\bar{k}_w} \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} - \cos \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \\ &\quad \times \left\{ \frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{(3C_w - 1)\bar{k}_l}{4} \right\} \end{aligned} \quad (57)$$

最終的に、重心まわりのrollのFroude-Krylovモーメントとして次の簡易算式を得た。

$$\begin{aligned} \bar{E}_4^{FK} &= i \left\{ \frac{1 - (1 + kd)e^{-kd}}{kB} \right\} \left(\frac{2}{\bar{k}_B} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \left(\frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{C_b \bar{k}_l}{2} \right) \\ &\quad - ie^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f - kdC_{vp}} \frac{1}{\bar{k}_w} \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} - \cos \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \\ &\quad \times \left\{ \frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{(3C_w - 1)\bar{k}_l}{4} \right\} + \bar{z}_G \bar{E}_2^{FK} \end{aligned} \quad (58)$$

開発した簡易算式(58)について、シリーズ計算値と比較したものを図8に示す。短波長域で若干の精度低下がみられるが、簡易算式としては十分実用的な精度を有していることが分かる。

提案算式(58)右辺の各項は、 k について展開することで、長波長域でそれぞれ次の値に漸近することが確かめられる。

$$(\text{第1項}) \sim -i\bar{k}_w \frac{dC_b}{B^2} \left\{ -\frac{d}{2} \right\} \quad \text{as } k \rightarrow 0 \quad (59)$$

$$\begin{aligned} (\text{第2項}) &\sim -i\bar{k}_w \frac{dC_b}{B^2} \left\{ \frac{B^2 (3C_w - 1)}{24} \right\} \\ &\quad \text{as } k \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (60)$$

$$\begin{aligned} (\text{第3項}) &\sim -i\bar{k}_w \frac{dC_b}{B^2} \{-z_G\} \quad \text{as } k \\ &\rightarrow 0 \end{aligned} \quad (61)$$

厳密値(16)と比較すると、式(59)~(61)の中括弧で括った中身の和はGMに一致し、上から順に式(20)右辺の z_B , BM , $-z_G$ にあたることがわかる。第1項の式(59)では側壁の形状を箱型で近似したために $z_B = -d/2$ となり、第2項の式(60)では式(20), (55)より水線幅 $\bar{B}_w(\bar{x})$ を台形分布で近似したときの BM となっている。第2項の算式化において、 $\bar{B}'_2(\bar{x})$ の分布を単なる面積 C_w の矩形で近似した場合、実際の BM の値と乖離し、長波長域の精度が低下し、それに伴い短波長における精度も低下することが確認された。横波における精度を保つために $\bar{B}'_2(\bar{x})$ の分布の面積に式(55)右辺を用いたことが、全波条件における推定精度の向上につながっている。

3.6 縦/横メタセンタ高さをを用いたpitch/rollモーメントの算式

前3.3節で示したpitchモーメント $\bar{E}_5^{FK}$ の式(35)および3.5節で示したrollモーメント $\bar{E}_4^{FK}$ の式(58)は、長波長域において厳密な漸近値である復原力係数を近似した値に漸近することを説明した。これに対し、算式に船舶の復原力係数すなわち縦/横メタセンタ高さを認めた場合には、これらを用いて厳密な漸近値をとる $\bar{E}_5^{FK}$, $\bar{E}_4^{FK}$ の算式を示すことができる。本節では、縦/横メタセンタ高さをを用いた $\bar{E}_5^{FK}$, $\bar{E}_4^{FK}$ の表現を示し、すでに開発した算式(35), (58)と比較する。

まず $\bar{E}_5^{FK}$ の算式について考える。 $\bar{E}_5^{FK}$ の算式(35)のうち $C_w \bar{k}'_l$ 依存の関数を次のように変形する。

$$\begin{aligned} \frac{1}{\bar{k}'_l} \left\{ \frac{2}{\bar{k}'_l} \sin \frac{C_w \bar{k}'_l}{2} - C_w \cos \frac{C_w \bar{k}'_l}{2} \right\} &= \bar{k}_l \frac{C_w^3 C_b^{-0.15}}{12} \\ &\quad \times 3 \left(\frac{2}{C_w \bar{k}'_l} \right)^2 \left(\frac{2}{\bar{k}'_l C_w} \sin \frac{C_w \bar{k}'_l}{2} - \cos \frac{C_w \bar{k}'_l}{2} \right) \end{aligned} \quad (62)$$

右辺の下線部は式(39)よりpitchの無次元復原力係数 $dC_b/L^2 \times GM_L$ に対応する量であるから、これを $dC_b/L^2 \times GM_L$ に置き換えることで $\bar{E}_5^{FK}$ の次の表示が得られる。

$$\begin{aligned} \bar{E}_5^{FK} &= e^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f - kdC_{vp}} \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \\ &\quad \times \left\{ i\bar{k}_l \frac{dC_b}{L^2} GM_L f(C_w \bar{k}'_l) \right. \\ &\quad \left. - \frac{2\bar{x}_f}{\bar{k}'_l} \sin \frac{C_w \bar{k}'_l}{2} \right\} \end{aligned} \quad (63)$$

ここに $f(x)$ は $x \rightarrow 0$ で1に漸近する次の関数である。

$$f(x) = \frac{12}{x^2} \left(\frac{2}{x} \sin \frac{x}{2} - \cos \frac{x}{2} \right) = 1 + O(x^2) \quad (64)$$

式(62)において下線部を $dC_b/L^2 \times GM_L$ に置き換えたことで、 GM_L の正しい値を用いれば、式(63)は長波長域で厳密値(13)に漸近する。また式(63)は、 $\bar{x}_f$ を無視すれば、smith修正係数と、長波長で1に漸近する波長依存の関数 $f(C_w \bar{k}_l)$ 、正しい漸近値 $\bar{k}_l dC_b/L^2 \times GM_L$ の積で表された物理的意味の理解しやすい構成をしている。式(63)は、長波長域は勿論、短波長域においても式(35)より若干精度が向上することが確認された。したがって縦メタセンタ高さ GM_L が既知の場合は(63)を用いるとよいと考えられる。

続いて $\bar{E}_4^{FK}$ の算式について考える。 $\bar{E}_4^{FK}$ の算式(58)において $\beta = \pi/2$ すなわち横波を前提とした簡略化をし、さらに k についてマクローリン展開して2次の項までとると次のように表される。

$$\begin{aligned} \bar{E}_4^{FK} &= -\frac{ikdC_b}{B} \left\{ -\frac{d}{2} \left(1 - \frac{2}{3}kd \right) - z_G (1 - kdC_{vp}) \right. \\ &\quad \left. + \frac{B^2}{dC_b} \frac{3C_w - 1}{24} (1 - kdC_{vp}) \right\} + O(k^3) \\ &\cong -ikBe^{-kdC_{vp}} \frac{dC_b}{B^2} GM \end{aligned} \quad (65)$$

式(65)最右辺の近似は、3.5節で説明したように式(65)の下線部の和がGMに対応することと、 $e^{-kdC_{vp}} \sim 1 - kdC_{vp}$ を考慮した結果である。上式は横波に限定して簡易化したものであるが、斜め波にも対応させるため、式(16)との対応から式(65)の kB を $\bar{k}_w$ に置き換え、さらに縦方向無次元波数による補正係数 $(2/C_w \bar{k}_l) \sin(C_w \bar{k}_l/2)$ （水線面を $C_w L \times B$ の矩形と近似したときの値）を乗じて次式を得た。

$$\bar{E}_4^{FK} = -i\bar{k}_w e^{-kdC_{vp}} \left(\frac{2}{C_w \bar{k}_l} \sin \frac{C_w \bar{k}_l}{2} \right) \frac{dC_b}{B^2} GM \quad (66)$$

本算式はGMを用いない式(58)比べると非常に簡潔であり、さらに復原力係数 $dC_b/B^2 \times GM$ と入射波の副波面(sub-surface)の傾斜角 $\bar{k}_w e^{-kdC_{vp}}$ の積といった物理的に極めて明確な式になっている。GMを既知とした場合の式(66)の精度は、図9に示す通り、 λ/L が0.7より短波長において式(58)の精度（図8）より若干低下するものの、おおむね良好であることがわかる。また、式(66)の実部は0なので、式(58)

とは違って位相の情報は得られない。ただし、式(66)は式(58)に比べて長波長域の漸近値が厳密で、簡単かつ分かりやすい物理量で構成されている点で優れている。横メタセンタ高さGMもごく基本的な量で既知であることが多いため、簡易推定としては十分に実用的と考えられる。

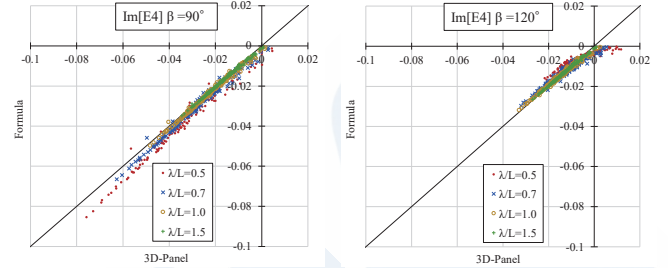


図9 Comparison of $\bar{E}_4^{FK}$ between proposed Formula (66) and numerical calculation.

3.7 計算上の留意事項

以上によって6自由度の簡易算式が提示された。ただし、簡易算式を計算する上で、分母が0となる条件の処理に注意を払う必要がある。解析的には有限の極限值を取るため問題ないが、数値計算では $\bar{k}_w$ が0となる縦波、 $\bar{k}_l$ が0となる横波において、数値エラー、あるいは丸め誤差が過大に表れ不合理な値となる。このような場合、極限値の式を条件分岐によって与える方法で回避するか、あるいはより簡単に、波向きを 0° や 90° からわずかに（ 0.1° 程度）ずらすことでも正常な値を得ることができる。

また、開発した算式は複素振幅で表されているが、振幅を得る場合は、3.3節で述べたように、 $\bar{x}_f = 0$ として絶対値をとるだけでよい。一方で位相については、式(1)にあるように複素振幅の偏角 $\arg(\bar{E}_i^{FK})$ を計算すればよいが、複素数を扱えないソルバーを用いる場合は、実部と虚部に分けて扱う必要がある。その場合、

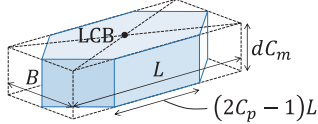
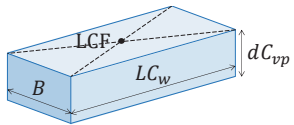
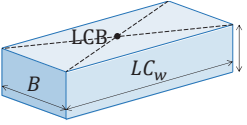
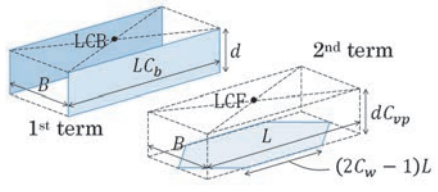
$$e^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f} \cong 1 - i\bar{k}_l \bar{x}_f \quad (67)$$

と近似して $\bar{x}_f$ の二次以上の項を無視することで式の複雑化を避けられる。図3～図8に示した算式の値も、そのように計算している。

加えて、提案算式は、波の山が船体の重心位置に達する瞬間を時刻の基準としていることに注意が必要である。時刻の基準を波の山が $x = x_1$ 位置に達する瞬間としたい場合は、提案算式 $\bar{E}_i^{FK}$ に対して次のように位相を乗じればよい。

$$\bar{E}_i^{FK} \rightarrow e^{i\bar{k}_l x_1} \bar{E}_i^{FK} \quad (68)$$

表1 Summary of proposed formulae and hull-form approximations.

Mode	Proposed Formula	Hull-form approximation
Surge	$\bar{E}_1^{FK} = i(1 - e^{-kdC_m}) \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \left(\frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{C_p \bar{k}_l}{2} \right) \left\{ \frac{2}{(1 - C_p) \bar{k}_l} \sin \frac{(1 - C_p) \bar{k}_l}{2} \right\}$	
Heave	$\bar{E}_3^{FK} = e^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f - kdC_{vp}} \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \left(\frac{2}{\bar{k}_l'} \sin \frac{C_w \bar{k}_l'}{2} \right)$	
Pitch around COG	$\bar{E}_5^{FK} = ie^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f - kdC_{vp}} \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \frac{1}{\bar{k}_l'} \left\{ \left(\frac{2}{\bar{k}_l'} + 2i\bar{x}_f \right) \sin \frac{C_w \bar{k}_l'}{2} - C_w \cos \frac{C_w \bar{k}_l'}{2} \right\}$ $\bar{E}_5^{FK} = ie^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f - kdC_{vp}} \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \left\{ \bar{k}_l \frac{dC_b}{L^2} \text{GM}_L f(C_w \bar{k}_l') + \frac{2i\bar{x}_f}{\bar{k}_l'} \sin \frac{C_w \bar{k}_l'}{2} \right\}$ where, $f(x) = \frac{12}{x^2} \left(\frac{2}{x} \sin \frac{x}{2} - \cos \frac{x}{2} \right)$	+ Correction for $\bar{k}_l \rightarrow C_b^{-0.15} \bar{k}_l$
Sway	$\bar{E}_2^{FK} = i(1 - e^{-kdC_{vp}}) \left(\frac{2}{\bar{k}_B} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \left(\frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{C_w \bar{k}_l}{2} \right)$	
Yaw around COG	$\bar{E}_6^{FK} = (1 - e^{-kdC_{vp}^2}) \left(\frac{2}{\bar{k}_B} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \frac{1}{\bar{k}_l} \left(\frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{C_w \bar{k}_l}{2} - C_w \cos \frac{C_w \bar{k}_l}{2} \right)$	dC_{vp}^2 for $\bar{E}_6^{FK}$
Roll around COG	$\bar{E}_4^{FK} = i \left\{ \frac{1 - (1 + kd)e^{-kd}}{kB} \right\} \left(\frac{2}{\bar{k}_B} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \left(\frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{C_b \bar{k}_l}{2} \right)$ $- ie^{-i\bar{k}_l \bar{x}_f - kdC_{vp}} \frac{1}{\bar{k}_w} \left(\frac{2}{\bar{k}_w} \sin \frac{\bar{k}_w}{2} - \cos \frac{\bar{k}_w}{2} \right) \left\{ \frac{2}{\bar{k}_l} \sin \frac{(3C_w - 1) \bar{k}_l}{4} \right\}$ $+ \bar{z}_G \bar{E}_2^{FK}$ $\bar{E}_4^{FK} = -i\bar{k}_w e^{-kdC_{vp}} \left(\frac{2}{C_w \bar{k}_l} \sin \frac{C_w \bar{k}_l}{2} \right) \frac{dC_b}{B^2} \text{GM}$	
Where: $C_p = \frac{C_b}{C_m}$, $C_{vp} = \frac{C_b}{C_w}$, $\bar{k}_l = kL \cos \beta$, $\bar{k}_w = kB \sin \beta$, $\bar{k}_l' = C_b^{-0.15} \bar{k}_l$, $\bar{x}_f = \frac{\text{LCF} - \text{LCG}}{L}$, $\bar{z}_G = \frac{KG - d}{B}$		

4. まとめ

本論文では、船種やサイズに依らず適用可能な、波浪中船体運動の簡易推定のための6自由度のFroude-Krylov力の簡易算式を開発した。本研究のように、主要な船型パラメータのみによってFroude-Krylov力を推定できるような実用的算式を物理的考察に立脚して開発することはこれまでにない新たな試みであり、実用に足る汎用的かつ高精度の算式の開発に成功したと著者らは考える。開発した算式と形状近似をまとめたものを表1に示す。

簡易算式の開発における要点は次の通りである。

- 船種を限定せずに適用可能な算式とするため、船体形状を船舶の8つの船型パラメータ ($L, B, d, C_b, C_w, C_m, x_f$ (LCG基準のLCF), KG) によって一意に定まる関数で近似することで、Froude-Krylov力を船型パラメータと波条件を変数に持つ初等関数で示すというアプローチをとった。また、pitchおよびrollモーメントについてはそれぞれ縦メタセンタ高さ GM_L および横メタセンタ高さ GM が既知である場合を想定した

算式についても示した。

- 船体形状の近似は、幾何学的考察に基づき、かつ長波長域の漸近値が正しい値をとるように、6自由度モード毎に船体を適切な形状で近似した。Froude-Krylov力の長波長域の漸近値は復原力係数に対応するが、提案算式の漸近値はsurge, sway, heave力については厳密値に、roll, pitch, yawモーメントについては復原力係数等を船型パラメータで近似した値に近づく。縦/横メタセンタ高さをを用いたpitch, rollモーメントの式については、厳密値に漸近する。
- 仮定する船型の中心位置を、 n_x, n_y に関する項についてはLCB, n_z に関する項についてはLCFとすることで、入射波に対する位相差の情報を適切に考慮した。

最後に、開発した簡易算式の特長と価値、それらがもたらす効果について列挙し、本論文の結びとする。

- 提案算式は、船種やサイズを限定しない77隻×2 (満載・バラスト) 積付条件の実船型に対し、あらゆる波向き、波長において良好な推定精度

を有する。特に長波長域ほどその精度は高い。一様流れ近似に基づく場合Froude-Krylov力は船速に依存しないため、本算式は線形理論の範囲であれば実質全ての波浪条件に対して適用することができる。

- ii) 計算に必要なのは船舶の主要な船型パラメータ8つ（縦/横メタセンタを用いる場合は9つ）のみであるため、船体の詳細な情報がなくともFroude-Krylov力を合理的に推定することができる。このことは設計の初期段階における運動性能の検討に役立つ。船型パラメータのうち x_f は一般的な主要目ではないため他と比べて得にくい、これは主に位相に対して影響するパラメータで、振幅を調べたい場合は x_f の情報は不要である。
- iii) 本研究のように、船型パラメータのみによって表されるFroude-Krylov力の推定算式を理論的アプローチによって得た例は、著者らの知る限り過去に存在しない。目的を同じくするJensenの研究³⁾では、箱船に対するFroude-Krylov力の算式を示し、それにファインネス係数による補正を与えている。それに対し提案算式は、数式の煩雑さはJensenのそれとさほど変わらず、船体形状パラメータの影響を幾何学的考察から適切に考慮し、さらに位相の情報も明確に得られるという点で高度化された算式となっている。また、rollのFroude-Krylovモーメントについては復原性基準において用いられる簡易推定算式が存在する¹¹⁾が、船体の横断面毎の形状情報を要するものであり、これに対し提案算式は主要目のみによって合理的な推定ができるものとなっている。
- iv) Froude-Krylov力の簡易算式は、緒言にて述べたように特にrollやsurgeの簡易推定においてとりわけ高い価値を持つ。その他の運動モードについても流体力のうちの主要な成分であることに違いはなく、本研究で開発した簡易算式は波浪中船体運動の簡易推定に有効に活用されるものと考えられる。例えば、本提案算式から現状のCSRにおける運動・加速度の規定に存在しないような支配的パラメータが見出されたため、それらを用いることで算式の精度と汎用性の向上につなげることができる。と考える。

謝辞

本研究の遂行及び論文執筆にあたり、適切なアドバイスを戴いた海上技術安全研究所の深沢塔一博士、

黒田貴子博士、また、本研究のデータ分析等にご協力いただいた、日本海事協会の河邊寛博士、福元佑輔氏、日本郵船の赤松達哉氏、商船三井の大宮知起氏、協田薫平氏、葛谷知史氏、今治造船の松脇淳也氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) IACS: Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, 2019.
- 2) IMO: Adoption of the International Code on Intact Stability, 2008 (2008 IS Code), Resolution MSC.267/85, MSC 85/26/Add.1 Annex 2, 2008.
- 3) Jorgen, J. J., Alaa E. M., and Anders S. O.: Estimation of Ship Motions Using Closed-Form Expressions, Ocean Engineering Vol. 31, pp. 61-85, 2004.
- 4) Kashiwagi, M.: Asymptotic Values of Heave and Pitch Motions in a Very Long Wave, Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No. 242, pp. 45-51, 2004 (in Japanese).
- 5) Peters, A. S., and J.J. Stoker: The motion of a ship as a floating rigid body in a seaway, Communications on Pure and Applied Mathematics, Vol. 10, pp. 399-490, 1957.
- 6) Tasai, F.: Study on Equation of Ship Roll Motion, Reports of Research Institute for Applied Mechanics Kyushu University, Vol. 25, 1965 (in Japanese).
田才福造：船の横揺れの運動方程式について、九州大学応用力学研究所所報、第25号、1965.
- 7) Kashiwagi, M., and Iwashita, H.: Series of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 4, Seakeeping Performance, Chapter 7, Seizando-Shoten Publishing Co., Ltd., 2012 (in Japanese).
柏木正，岩下英嗣：船舶海洋工学シリーズ④ 船体運動 耐航性能編，第7章，成山堂書店，2012.
- 8) Takaishi, T., and Kuroi, M.: Practical Calculation Method of Ship Motion in Waves, 2nd Symposium of Seakeeping Performance, pp.109-133, 1977(in Japanese).
高石敬史，黒井正明：波浪中船体運動の実用的計算法，第2回 耐航性に関するシンポジウム，pp. 109-133, 1977.

- 9) Oka, M., Ando, T., Ma, C., et al, H.: Numerical Calculation Procedure of Global Ship Motion of LNG Carrier Considering LNG Liquid Dynamic Effect in Wave Condition, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 26, pp. 103-118, 2017 (in Japanese).
- 10) Motora, S.: On Measuring of Ship's Resistance in Waves by Gravity Dynamometer Method, and Surging of Ship in Waves, Journal of Zosen Kiokai, Vol. 94, pp. 43-52, 1953 (in Japanese).
- 11) Umeda, N., and Tsukamoto, I.: Simplified Prediction method for Effective Wave Slope Coefficient and its Effects on Capsizing Probability Calculation, Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 5E, pp. 23-26, 2008 (in Japanese).

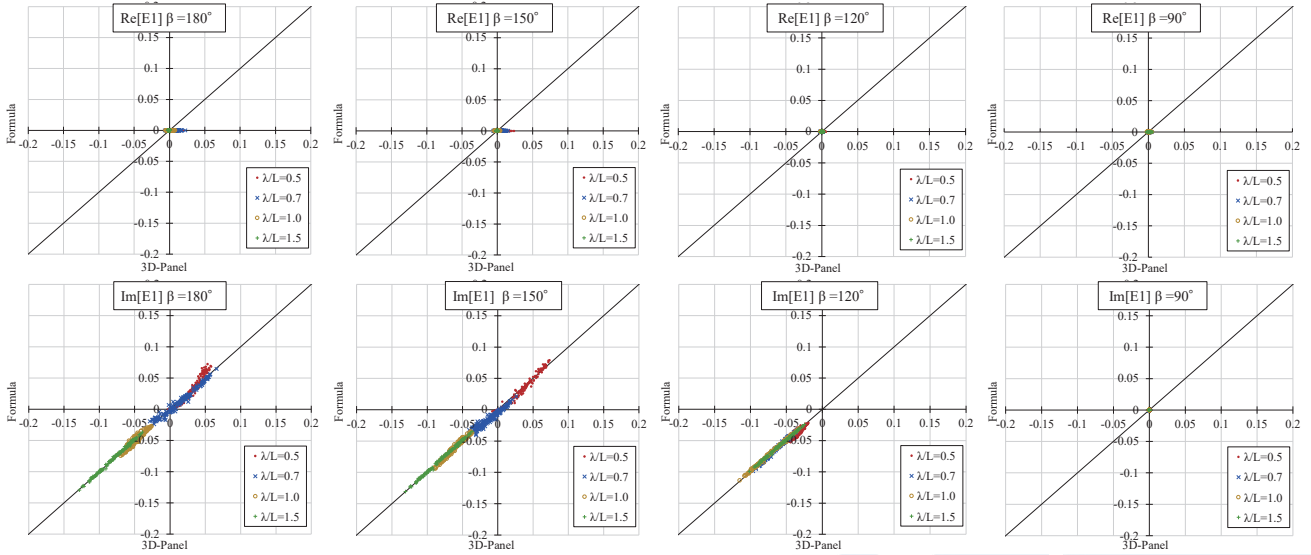


図3 Comparison of $\bar{E}_1^{FK}$ between proposed formula and numerical calculation for target ships.

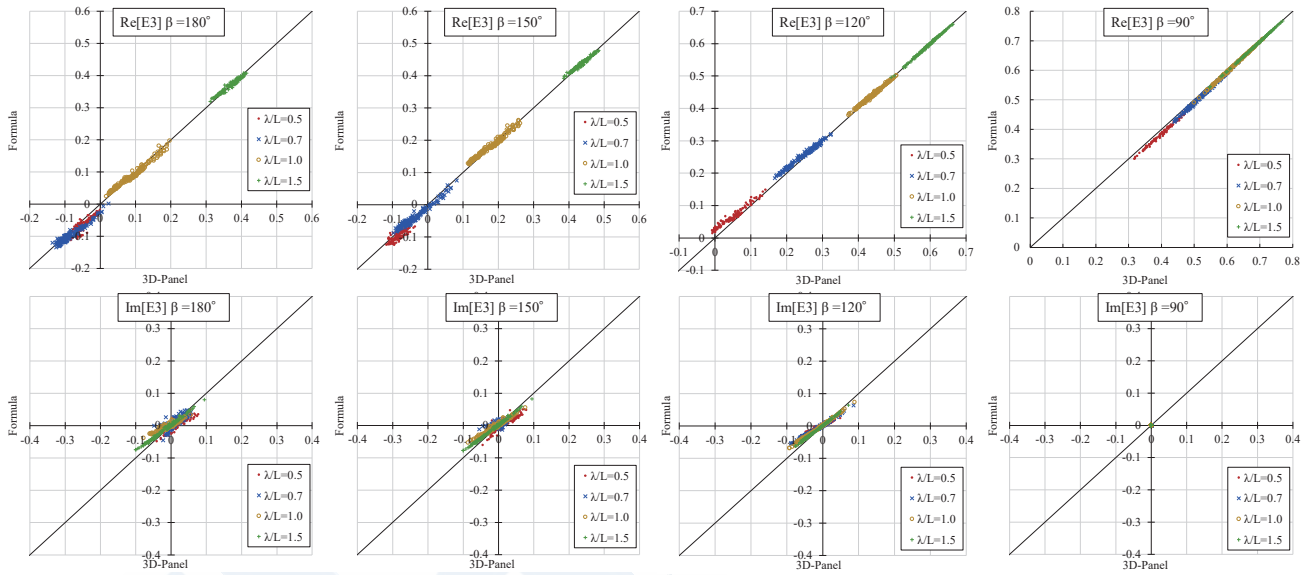


図4 Comparison of $\bar{E}_3^{FK}$ between proposed formula and numerical calculation for target ships.

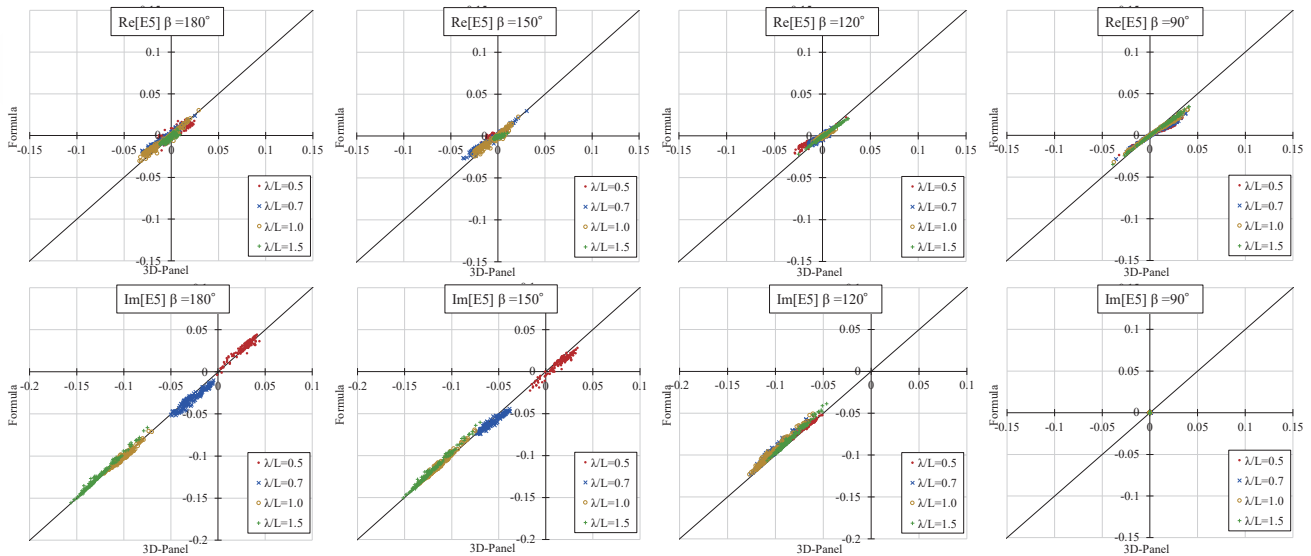
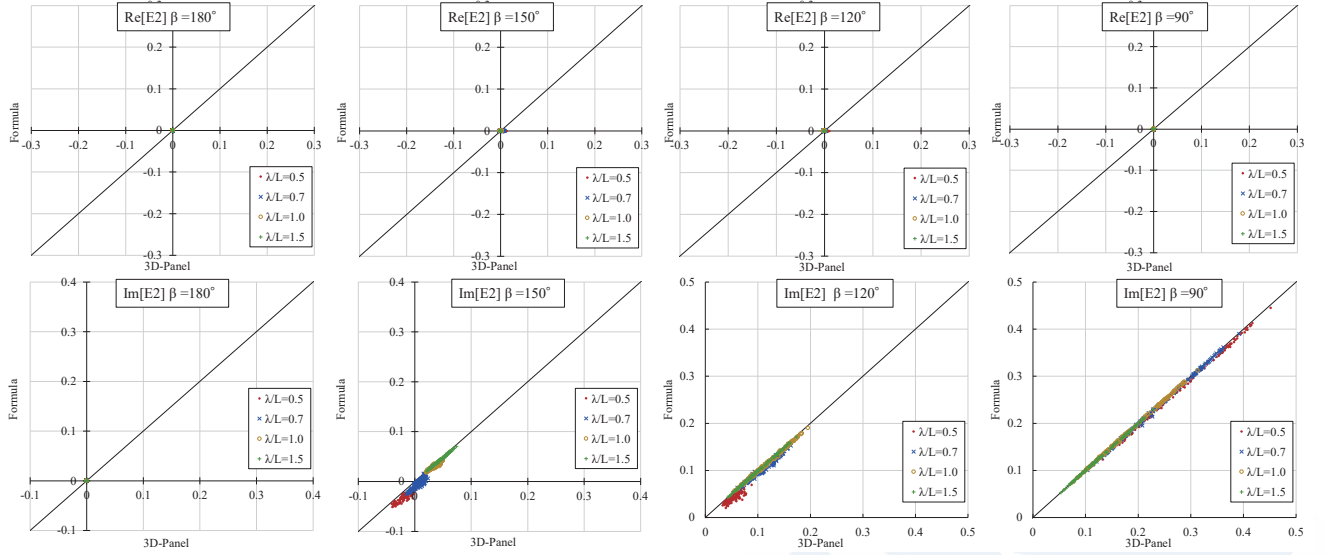
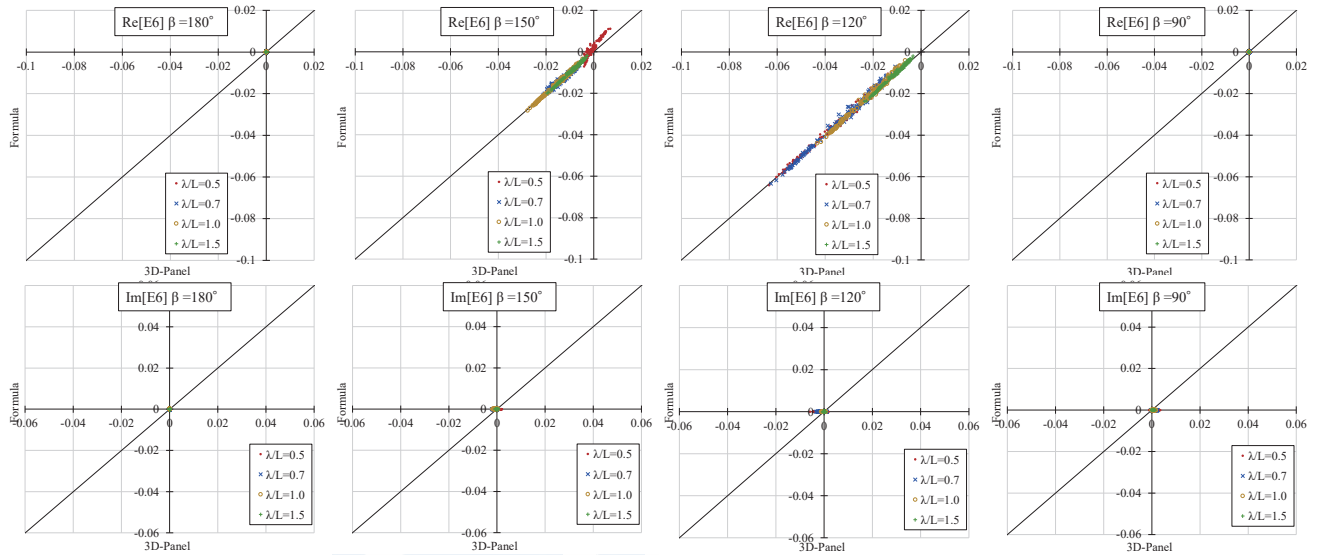
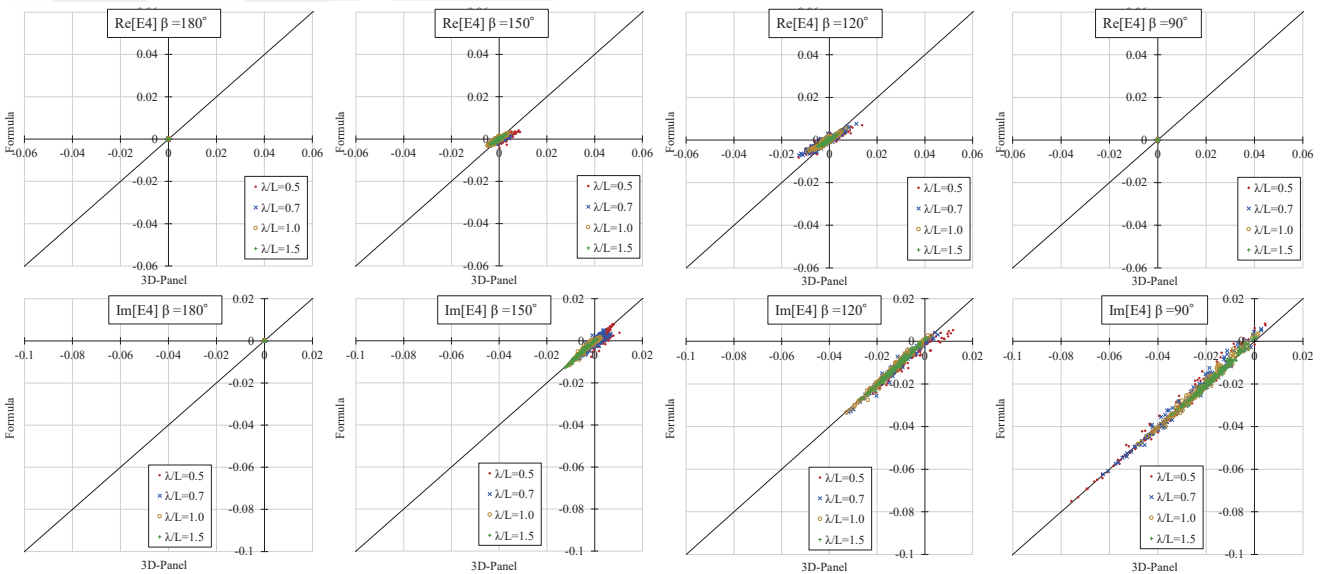


図5 Comparison of $\bar{E}_5^{FK}$ between proposed formula and numerical calculation for target ships.


 図6 Comparison of $\bar{E}_2^{FK}$ between proposed formula and numerical calculation for target ships.

 図7 Comparison of $\bar{E}_6^{FK}$ between proposed formula and numerical calculation for target ships.

 図8 Comparison of $\bar{E}_4^{FK}$ between proposed formula and numerical calculation for target ships.

長期予測をベースとした波浪荷重の簡易算式の開発

— Heave加速度及びPitch角 —

篠本 恭平*, 松井 貞興**, 杉本 圭*, 芦田 晋作***

1. 緒言

船舶の設計において、乗船者の安全性や乗心地、船体構造設計のための波浪荷重など様々な側面から波浪中の船体運動の合理的な推定が求められている。今日では、3次元パネル法等の耐航性ツールによって精度よく波浪中の船体運動を推定することができ、設計現場や規則開発において実用に供されている¹⁾。一方で、数値解析に依らない船体運動の簡易的な推定手法にも高い需要が存在する。例えば、個船毎に構造強度評価のための波浪荷重を数値解析で推定することは、船体構造設計の工数を考えるとハードルが高いとされる。そのため、船級規則^{2) 3)}では船舶の主要パラメータを用いた簡易算式による波浪荷重の推定手法が採用されている。

これまで多くの場合、船舶の最大荷重は、線形重ね合わせ理論を応用したエネルギースペクトル法を利用することで不規則波中の船体応答の解析、さらに、評価海域の波浪発生頻度表を利用した長期予測が行われることで推定されてきた^{4) 5)}。船級規則^{2) 3)}においても、最大荷重の線形項は超過確率 10^{-8} レベルの長期予測値と同等な値となるよう規定されている。このことから、長期予測は船舶の最大荷重の線形項を推定するために確立された手法であると言えることができる。

本研究の目的は、長期予測を定式化し、汎用的かつ高精度な超過確率 10^{-8} レベルの最大荷重の簡易算式を開発することである。目的を同じくする過去の研究として、河邊らによる研究⁶⁾が挙げられるが、ストリップ法による計算結果を用いた構造解析を行い、波浪による応力の長期分布を求めて最大荷重を予測する手法を提案している。また、河邊らや重見ら⁷⁾の研究では、不規則波中の船体応答の標準偏差の定式化などは行っていない。加えて、同研究はばら積貨物船と油タンカーのみを対象としていたため、その結果を他の船種やサイズの船舶に対しての精度保証は難しいと考える。本研究では、不規則波中の船体応答の標準偏差や不規則波の方向分布を考慮している。また、船舶の主要パラメータを用いた長期予測の定式化を図っている。船種やサイズを限定しない簡易算式を開発するため、一步一步段階を踏んで波浪荷重の支配的な要因とその傾向を検討し、任意の船種及びサイズのモデルを用いた数値解析により精度検証を行った。これにより、汎用的かつ高精度な簡易算式を開発できたと考える。

本稿はHeave加速度とPitch角に焦点を当て、簡易算式を提案している。

簡易算式に含まれる応答振幅（以下、RAO）には、数値解析で得られたRAOを用いたが、Jensenら⁸⁾や松井ら⁹⁾が提案するRAOの簡易算式を用いる

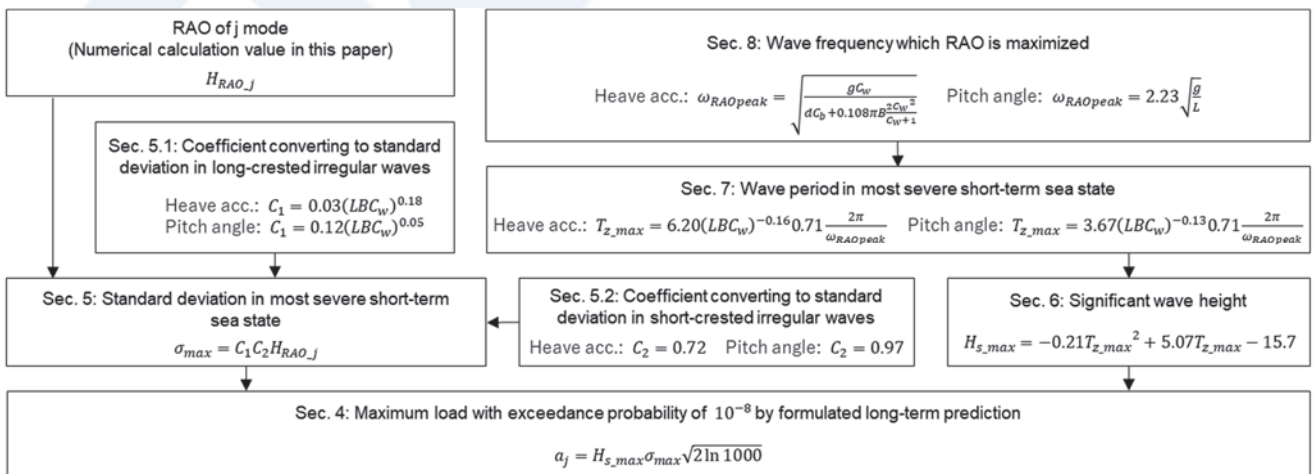


図1 定式化された長期予測のフロー図

* 船体開発部

** 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所

*** 川崎重工業株式会社（研究当時、船体開発部）

ことも可能である。

超過確率 10^{-8} の長期予測値を得るためのフロー図を図1に示す。図1の通り、長期予測は構成要素に分けることができ、それぞれ第4章以降で説明する簡易算式で表すことができる。これらの構成要素を可能な限り理論的なアプローチで発展させて長期予測を定式化した。数学的に定式化することが困難な要素もあったが、数値解析に使用した船舶の多様性と総数を活かして定式化を試みた。

2. 3次元耐航性プログラムによる数値解析

提案した超過確率 10^{-8} レベルの最大荷重の簡易算式の精度を検証するため、日本海事協会が開発した線形の3次元耐航性プログラムによる計算を実施した。当該プログラムは、Papanikolauらが提案した前進速度影響を加味したGreen関数法に基づくプログラムである^{10) 11)}。杉本らは曳航試験を行い、数値解析の結果との比較により当該プログラムの精度を検証している¹⁾。当該検証により、当該プログラムで計算された船体運動や船体曲げモーメントなどの応答と低波高条件での実測値はよく一致することが分かった。しかし、当該プログラムにはいくつかの制限があり、これらの制限によって実験値と計算値の間にわずかな誤差が生じる可能性があることを理解しておく必要がある。計算モデルのパネルサイズが波長に対して相対的に粗いことに起因すると予想される実験値と計算値の誤差がその一例である。

数値解析には154の計算モデル（実在する船舶77隻×1隻あたり満載積付状態及びバラスト状態の2つの状態）を用いた。提案した簡易算式は、一般的な商船を対象としているため、喫水線以下の没水部の形状が左右対称である単胴船に計算対象を限定した。図2に示すように、 L や C_b 、 C_w などの値が幅広くなるよう解析対象の船舶を選定している。また、用いた船種はアスファルト運搬船、ばら積貨物船、コンテナ運搬船、セメント運搬船、木材チップ運搬船、一般貨物船、液化ガス運搬船（LNG、LPG）、

ケミカルタンカー、鉱石運搬船、油タンカー、自動車運搬船、冷蔵運搬船、RO-RO船と多岐にわたる。なお、Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers¹²⁾を参考に、大波高中での船速低下を考慮し、前進速度は5 knotとした。

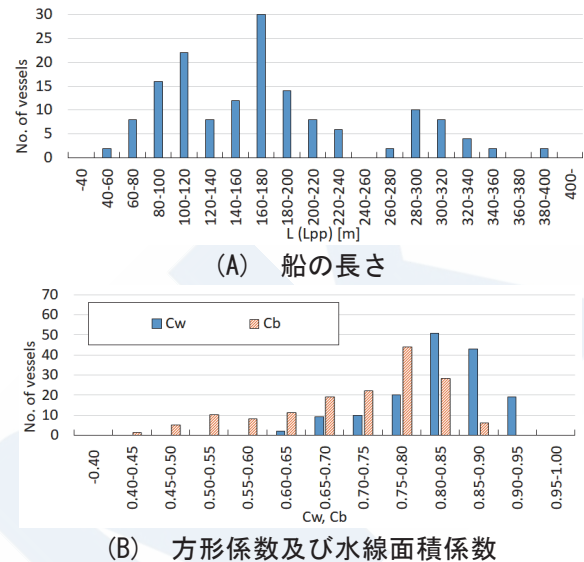


図2 数値解析対象船のヒストグラム

3. 海象条件

海象条件には、IACS Recommendation No. 34¹³⁾の波浪発現頻度表を用いた。図3に当該波浪発現頻度表を示す。

4. 超過確率 10^{-8} レベルの最大荷重の簡易算式

極値 a が閾値 a_j を超える短期不規則海象中の応答の確率分布をRayleigh分布で近似し、当該海象の発現確率を乗じて数値積分することで、長期の a_j を超える確率 $Q[a > a_j]$ が式(1)のように表される。

$$Q[a > a_j] = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\langle \int_0^{\infty} \exp \left\{ -\frac{a_j^2}{2[H_s \sigma(T_z, \chi)]^2} \right\} p(H_s, T_z) dH_s dT_z \right\rangle d\chi \quad (1)$$

Hs/Tz	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	SUM
0.5	0	0	1.3	133.7	865.6	1186	634.2	186.3	36.9	5.6	0.7	0.1	0	0	0	0	0	0	3050.4
1.5	0	0	0	29.3	986	4976	7738	5569.7	2375.7	703.5	160.7	30.5	5.1	0.8	0.1	0	0	0	22575.4
2.5	0	0	0	2.2	197.5	2158.8	6230	7449.5	4860.4	2066	644.5	160.2	33.7	6.3	1.1	0.2	0	0	23810.4
3.5	0	0	0	0.2	34.9	695.5	3226.5	5675	5099.1	2838	1114.1	337.7	84.3	18.2	3.5	0.6	0.1	0	19127.7
4.5	0	0	0	0	6	196.1	1354.3	3288.5	3857.5	2685.5	1275.2	455.1	130.9	31.9	6.9	1.3	0.2	0	13289.4
5.5	0	0	0	0	1	51	498.4	1602.9	2372.7	2008.3	1126	463.6	150.9	41	9.7	2.1	0.4	0.1	8328.1
6.5	0	0	0	0	0.2	12.6	167	690.3	1257.9	1268.6	825.9	386.8	140.8	42.2	10.9	2.5	0.5	0.1	4806.3
7.5	0	0	0	0	0	3	52.1	270.1	594.4	703.2	524.9	276.7	111.7	36.7	10.2	2.5	0.6	0.1	2586.2
8.5	0	0	0	0	0	0.7	15.4	97.9	255.9	350.6	296.9	174.6	77.6	27.7	8.4	2.2	0.5	0.1	1308.5
9.5	0	0	0	0	0	0.2	4.3	33.2	101.9	159.9	152.2	99.2	48.3	18.7	6.1	1.7	0.4	0.1	626.2
10.5	0	0	0	0	0	0	1.2	10.7	37.9	67.5	71.7	51.5	27.3	11.4	4	1.2	0.3	0.1	284.8
11.5	0	0	0	0	0	0	0.3	3.3	13.3	26.6	31.4	24.7	14.2	6.4	2.4	0.7	0.2	0.1	123.6
12.5	0	0	0	0	0	0	0.1	1	4.4	9.9	12.8	11	6.8	3.3	1.3	0.4	0.1	0	51.1
13.5	0	0	0	0	0	0	0	0.3	1.4	3.5	5	4.6	3.1	1.6	0.7	0.2	0.1	0	20.5
14.5	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	1.2	1.8	1.8	1.3	0.7	0.3	0.1	0	0	7.7
15.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0	0	2.8
16.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0	0	0	0.9
SUM:	0	0	1.3	165.4	2091.2	9279.9	19921.8	24878.8	20869.9	12898.4	6244.6	2479	836.7	247.3	65.8	15.8	3.4	0.7	10000

図3 IACS REC. 34¹³⁾の波浪発現頻度表

a : 極値

a_j : j モードの閾値 (独立変数)

H_s : 有義波高

$\sigma(T_z, \chi)$: 短期不規則海象中の有義波高1mあたりの標準偏差

$p(H_s, T_z)$: 短期不規則海象の発現確率密度

T_z : 短期不規則海象のゼロアップクロス平均波周期

χ : 短期不規則海象の波の主流向

この手法は1960年代半ばに提案され、現在我が国でも長期予測のスタンダードな手法として広く用いられている¹⁴⁾。なお、式(1)では船舶が長期間にわたって航海すると、あらゆる方向の波と出会う状況になると考えられるため、波浪との出会角は一樣に分布していると考ええる。また、短期不規則海象の平均波周期を約10sと仮定すると、船舶が一生のうちに遭遇する波の数は概ね 10^8 となる。このことから、長期予測を行う際は超過確率 10^{-8} を想定している。

本研究では、河邊ら^{6) 14) 15)}が提唱する最悪短期海象理論 (超過確率 10^{-8} 付近の最大値は、長期分布を構成する短期不規則海象中の船体応答の短期パラメータ (船体応答の標準偏差 $H_s\sigma(T_z, \chi)$) が最大となる短期不規則海象中の船体応答が支配的である) を利用することとした。短期不規則海象中の応答の最大値 (正確にはゼロアップクロス平均波周期中の極大値) は、応答のスペクトルが狭帯域であることより、その確率分布はRayleigh分布で近似できる。また、超過確率 10^{-8} の最大荷重が生じる最悪短期海象は、短期パラメータが最大の短期不規則海象として定義される。よって、式(1)の()内の算式は、式(2)のように近似される。

$$\begin{aligned} & \int_0^\infty \exp\left\{-\frac{a_j^2}{2[H_s\sigma(T_z, \chi)]^2}\right\} p(H_s, T_z) dH_s dT_z \\ &= \sum \exp\left[-\frac{a_j^2}{2(H_{s,i}\sigma_i)^2}\right] p(H_{s,i}, T_{z,i}) \Delta H_s \Delta T_z \\ &\approx \exp\left[-\frac{a_j^2}{2(H_{s,max}\sigma_{max})^2}\right] p(H_{s,max}, T_{z,max}) \Delta H_s \Delta T_z \end{aligned} \quad (2)$$

$H_{s,max}$: 最悪短期海象の有義波高

$T_{z,max}$: 最悪短期海象のゼロアップクロス平均波周期

σ_{max} : 最悪短期海象中の有義波高1mあたりの標準偏差

よって、超過確率 10^{-8} の閾値は近似的に式(3)のように表すことができる。

$$a_j|_{Q=10^{-8}}$$

$$\approx \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left[-\frac{a_j^2}{2(H_{s,max}\sigma_{max})^2}\right] \times p(H_{s,max}, T_{z,max}) \Delta H_s \Delta T_z d\chi \quad (3)$$

ここで、短期不規則海象の継続時間を2時間と仮定すると、船舶が一生のうちに短期不規則海象に遭遇する回数は、概ね 10^5 回となる。このことから、超過確率 10^{-8} の最大荷重が生じると想定した場合、最悪短期海象中の最大荷重の発生確率は 10^{-3} ($=10^{-8}/10^{-5}$)と近似的に求められる。したがって、 10^{-5} の発現確率の短期不規則海象中の1000波最大期待値を求めることで、超過確率 10^{-8} レベルの最大荷重と同等レベルの荷重を求めることができる。超過確率が 10^{-3} に対する最大期待値は式(4)の様に表される。

$$a_j = H_{s,max}\sigma_{max}\sqrt{2\ln 1000} \quad (4)$$

本稿では式(4)を超過確率 10^{-8} レベルの最大荷重の簡易算式のベースとする。

長期予測の結果より求められたHeave加速度及びPitch角の最悪短期海象中の支配的な波向きを図4に示す。この結果から、それぞれの最悪短期海象の波向きを90deg及び180deg (向波) とした。

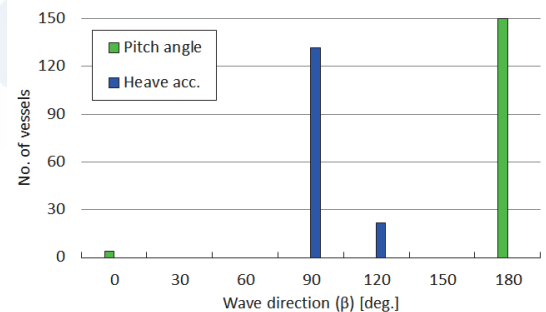


図4 最悪短期海象中の支配的な平均波向き

5. 最悪短期海象中の標準偏差

最悪短期海象中の有義波高1mあたりの標準偏差 σ_{max} は、式(5)のように表される。

$$\sigma_{max} = C_1 C_2 H_{RAO,j} \quad (5)$$

C_1 : RAOを有義波高1mあたりの標準偏差へ変換する変換係数

C_2 : 長波長不規則波から短波頂不規則波へ変換する変換係数

$H_{RAO,j}$: j モードのRAOの最大値

5.1 有義波高1mあたりの標準偏差への変換

有義波高1mあたりの標準偏差 σ を求めるため、RAOを σ に変換させる。一般に、短期予測を行う場合は、船体応答を用いて、線形重ね合わせ理論を応用したエネルギースペクトル法を用いる。そのため、 σ は式(6)で表される。

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\infty} H_{RAO-j}(\omega, \chi - \beta)^2 S(\omega, T_z) D(\chi - \beta) d\omega d\beta} \quad (6)$$

$H_{RAO-j}(\omega, \beta)$: jモードのRAO

$S(\omega, T_z)$: 有義波高1mあたりのPierson-Moskowitz型の波スペクトル

$D(\beta)$: 方向分布関数

ω : 波周波数

β : 素成波の方向

方向分布関数を除いた式(6)を便宜的にRAOの最大値で除算し、式(7)を変換係数 C_1 と定めることとした。なお、この時の海象は最悪短期海象である。

$$C_1 = \frac{\sqrt{\int_0^{\infty} H_{RAO-j}(\omega, \chi_{max})^2 S(\omega, T_{z,max}) d\omega}}{H_{RAO-j}(\omega_{RAOpeak}, \chi_{max})} \quad (7)$$

$\omega_{RAOpeak}$: RAOが最大となる時の波周波数

χ_{max} : 最悪短期海象中の支配的な波の主方向

簡単に言えば、 C_1 は規則波中のRAOを不規則波の波スペクトル形状を考慮して標準偏差に変換する係数である。 C_1 は船体応答によってその大きさが異なることから、船体応答ごとに求める必要がある。

船体運動を求める際に必要な船体に作用する流体力のうち、Froude-krylov力が主要な成分を占めている。HeaveやPitch等の縦運動における当該流体力は、 n_z に関する積分なので、船型のz方向投影面形状、すなわち水線面形状に大きく寄与する。このことから、Heave加速度及びPitch角の C_1 をこれら水線面積 LBC_w で表すことができると考え、式(8)のように定めた。

$$\begin{aligned} \text{Heave加速度} & C_1 = 0.03(LBC_w)^{0.18} \\ \text{Pitch角} & C_1 = 0.12(LBC_w)^{0.05} \end{aligned} \quad (8)$$

図5は式(8)から得られた C_1 の値と数値解析結果の比較である。いずれの C_1 も概ね推測通り水線面積 LBC_w に相関があったことから、比較的精度の高い

算式を設定できたことが分かる。なお、 C_1 を計算する中で使用した不規則波の波スペクトルは、IACS Rec.34¹³⁾で推奨されている北大西洋の有義波高とゼロアップクロス平均波周期によって定める方式のPierson-Moskowitz型の波スペクトルである式(9)を使用している。ここでのPierson-Moskowitz型の波スペクトルの算式は、便宜的に H_s^2 で除算していることに留意されたい。

$$S(\omega, T_z) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{2\pi}{T_z} \right)^4 \omega^{-5} \exp \left[-\frac{1}{\pi} \left(\frac{2\pi}{T_z} \right)^4 \omega^{-4} \right] \quad (9)$$

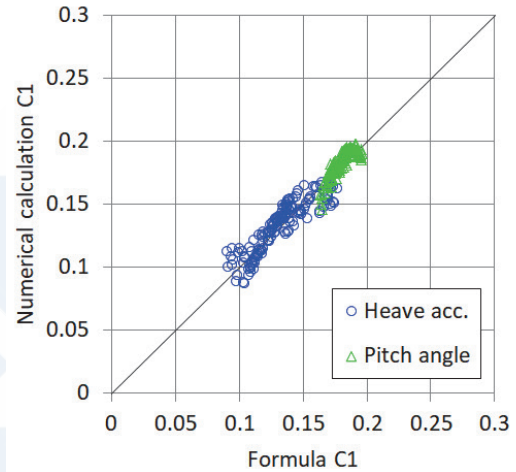


図5 式(8)と数値解析結果の比較

5.2 短波頂不規則波への変換

船体応答スペクトルの積分から分散 σ^2 が求められるが、この時求められる σ^2 は長波頂不規則波における値である。実際の海域の波は長波頂不規則波であることは稀で、多方向からの無数の長波頂不規則波が重なった短波頂不規則波である。すなわち、周波数の異なる素成波の集合及び平面的な広がりを持つ短波頂不規則波は、式(10)で示すような方向分布関数 $D(\beta)$ を用いて近似的に表現される¹⁶⁾。

$$D(\beta) = \frac{(2n)!}{\pi(2n-1)!} [\cos(\chi - \beta)]^{2n} \quad \left(-\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (10)$$

福田法¹⁷⁾による船体応答の短期予測では、 $n=1$ を採用して、式(11)とすることが多い。

$$D(\beta) = \frac{2}{\pi} [\cos(\chi - \beta)]^2 \quad \left(-\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (11)$$

短波頂不規則波の標準偏差を σ_{short} 、長波頂不規則波の標準偏差を σ_{long} とすると、 σ_{short} は式(12)で表すことができる。

$$\sigma_{short} = \sqrt{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sigma_{long}^2 D(\chi - \beta) d\beta} \quad (12)$$

σ_{short} : 短波頂不規則波中の応答の標準偏差

σ_{long} : 長波長不規則波中の応答の標準偏差

最も厳しい短期不規則海象において、長波頂不規則波を短波頂不規則波に変換する係数 C_2 は、式(13)で定義された。

$$C_2 = \frac{\sigma_{short}(T_{z_max}, \chi_{max})}{\sigma_{long}(T_{z_max}, \chi_{max})} \quad (13)$$

船体運動を考える場合、基本的に船体応答の波向き毎の割合は船舶の大きさにかかわらず概ね同一であると推察される。数値解析の結果から、 C_2 は図6のようにプロットされることを確認し、概ね推測通りであることが分かる。

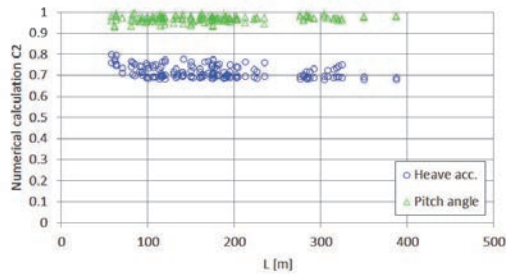


図6 C_2 の数値解析結果

この結果から、 C_2 を式(14)のように表すこととした。

$$\begin{aligned} \text{Heave加速度} & C_2 = 0.72 \\ \text{Pitch角} & C_2 = 0.97 \end{aligned} \quad (14)$$

6. 最悪短期海象における有義波高

IACS Rec. 34における有義波高の算式を検討するにあたり、式(15)のように有義波高に対する波周期

の条件付確率分布（対数正規分布）と有義波高の周辺確率分布（Weibull分布）の結合確率分布を¹⁸⁾を用いる。

$$\begin{aligned} & p(T_z|H_s)p(H_s) \\ &= \frac{1}{T_z \sqrt{2\pi\sigma_T(H_s)}} \exp\left\{-\frac{[\ln T_z - m_T(H_s)]^2}{2\sigma_T^2(H_s)}\right\} \\ & \times \frac{\beta(H_s - \gamma)^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \exp\left[-\left(\frac{H_s - \gamma}{\alpha}\right)^\beta\right] \end{aligned} \quad (15)$$

α : 尺度パラメータ

β : 形状パラメータ

γ : 閾値

ただし、条件付確率分布における平均 $m_T(H_s)$ 及び分散 $\sigma_T^2(H_s)$ は、式(16)の通りである。

$$\begin{aligned} m_T(H_s) &= E(\ln T_z(H_s)) \\ \sigma_T^2(H_s) &= \text{Var}(\ln T_z(H_s)) \end{aligned} \quad (16)$$

この時、図3に示すIACS Rec. 34¹³⁾の波浪発現頻度表を用い、式(15)における短期不規則海象の発現確率が 10^{-5} であるとして、当該確率における有義波高を多項式近似により式(17)のように定めた。

$$H_{s_max} = -0.21T_{z_max}^2 + 5.07T_{z_max} - 15.7 \quad (17)$$

式(17)は波浪発現頻度表上にプロットした場合、図7のようにプロットされる。図7を見ると分かるように、式(17)は発現頻度の極めて低い海象の有義波高を表していることが分かる。なお、波浪発現頻度表における同時確率が 10^{-5} である短期不規則海象は、概ね円状の分布になる（1つのゼロアップクロス平均波周期で2つの有義波高の短期不規則海象が生じる場合あり）。しかし、船舶設計では一般に高い方の有義波高を用いるため、有義波高の近似式を2次多項式とした。また、同時確率が 10^{-5} である短期不規則海象が円状の分布になることから、有義波高の

Hs/Tz	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	SUM
0.5	0.0	0.0	1.3	133.7	865.6	1186.0	634.2	186.3	36.9	5.6	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3050
1.5	0.0	0.0	0.0	29.3	986.0	4976.0	7738.0	5569.7	2375.7	703.5	160.7	30.5	5.1	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	22575
2.5	0.0	0.0	0.0	2.2	197.5	2158.8	6230.0	7449.5	4860.4	2066.0	644.5	160.2	33.7	6.3	1.1	0.2	0.0	0.0	23810
3.5	0.0	0.0	0.0	0.2	34.9	695.5	3226.5	5675.0	5099.1	2838.0	1114.1	337.7	84.3	18.2	3.5	0.6	0.1	0.0	19128
4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	196.1	1354.3	3288.5	3857.5	2685.5	1275.2	455.1	130.9	31.9	6.9	1.3	0.2	0.0	13289
5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	51.0	498.4	1602.9	2372.7	2008.3	1126.0	463.6	150.9	41.0	9.7	2.1	0.4	0.1	8328
6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	12.6	167.0	690.3	1257.9	1268.6	825.9	386.8	140.8	42.2	10.9	2.5	0.5	0.1	4806
7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	52.1	270.1	594.4	703.2	524.9	276.7	111.7	36.7	10.2	2.5	0.6	0.1	2586
8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	15.4	97.9	255.9	350.6	296.9	174.6	77.6	27.7	8.4	2.2	0.5	0.1	1309
9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	4.3	33.2	101.9	159.9	152.2	99.2	48.3	18.7	6.1	1.7	0.4	0.1	626
10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	10.7	37.9	67.5	71.7	51.5	27.3	11.4	4.0	1.2	0.3	0.1	285
11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	3.3	13.3	26.6	31.4	24.7	14.2	6.4	2.4	0.7	0.2	0.1	124
12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	4.4	9.9	12.8	11.0	6.8	3.3	1.3	0.4	0.1	0.0	51
13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.4	3.5	5.0	4.6	3.1	1.6	0.7	0.2	0.1	0.0	21
14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.2	1.8	1.3	0.7	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	8
15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	3
16.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1
SUM:	0	0	1	165	2091	9280	19922	24879	20870	12898	6245	2479	837	247	66	16	3	1	100000

図7 IACS REC. 34¹³⁾の波浪発現頻度表上にプロットした式(17)

単調増加及び単調減少となる範囲は限られる。そのため、式(17)の変数であるゼロアップクロス平均波周期の上限値としては、約17.0sが適当と考える。

7. 最悪短期海象の波周期

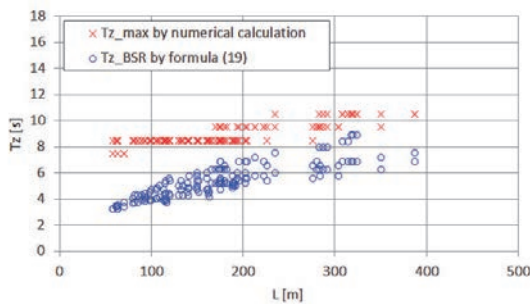
一般に、RAOが最大となる時の規則波中の平均波周期は、波周波数 $\omega_{RAOpeak}$ を用いて式(18)のように表せる。

$$T_{RAOpeak} = \frac{2\pi}{\omega_{RAOpeak}} \quad (18)$$

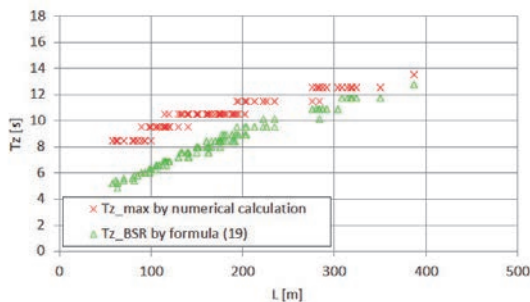
応答スペクトルが狭帯域の性質を有すると仮定すれば、波スペクトルとRAOの最大値が同じ波周波数で重なった時に短期不規則海象中の標準偏差が最大となる。これを「広義の同調^{14) 15)}」という。この仮定により、広義の同調^{14) 15)}時のゼロアップクロス平均波周期 T_{z_BSR} は式(19)で表される。

$$T_{z_BSR} = 0.71T_{RAOpeak} \quad (19)$$

式(19)の0.71は波スペクトルが最大となる波周期からPierson-Moskowitz型の波スペクトルのゼロアップクロス平均波周期に変換する変換する定数である。式(19)と数値解析から得られた最悪短期海象のゼロアップクロス平均波周期との比較を図8に示す。



(A) Heave加速度



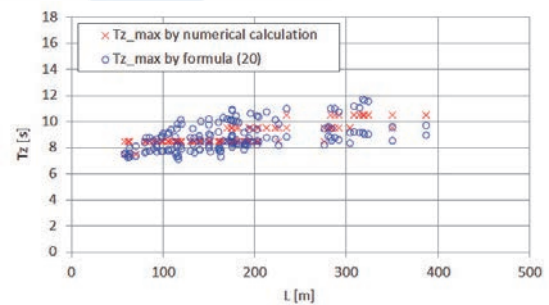
(B) Pitch角

図8 式(19)と数値解析結果の比較

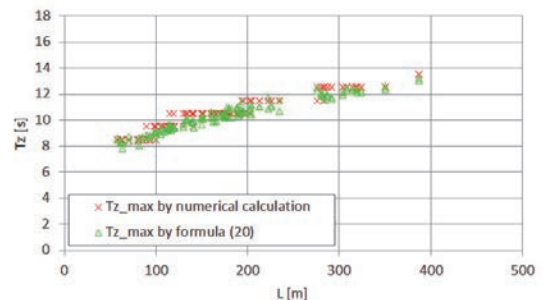
図8から T_{z_max} は T_{z_BSR} よりも長くなる傾向にあることが分かる。これは T_{z_max} では有義波高が考慮されているが、 T_{z_BSR} では考慮されていないことに起因する(T_{z_BSR} は有義波高1mあたりの標準偏差が最大となる短期不規則海象の波周期を定めているのに対し、 T_{z_max} は標準偏差が最大となる短期不規則海象の波周期であるため、有義波高が単調増加する短波長域においては、 T_{z_max} は T_{z_BSR} よりも短波長側に設定されることになる)。 T_{z_BSR} を T_{z_max} に変換するためには、図8に示すような関係から係数を決定する。水線面積 LBC_w と最悪短期海象中のゼロアップクロス平均波周期を用いて式(20)のように表すこととした。

$$\begin{aligned} \text{Heave加速度} \quad T_{z_max} &= 6.20(LBC_w)^{-0.16} T_{z_BSR} \\ \text{Pitch角} \quad T_{z_max} &= 3.67(LBC_w)^{-0.13} T_{z_BSR} \end{aligned} \quad (20)$$

式(20)と最悪短期海象のゼロアップクロス平均波周期の比較を図9に示す。変換したことにより、最悪短期海象のゼロアップクロス平均波周期を高い精度で推定できていることが分かる。



(A) Heave加速度



(B) Pitch角

図9 式(20)と数値解析結果の比較

8. 波周波数

式(18)、式(19)及び式(20)から分かるように、 T_{z_max} を得るためには、RAOが最大となる波周波数 $\omega_{RAOpeak}$ が必要となる。Heave加速度のRAOは波ス

ペクトルとRAOのそれぞれの最大値が同じ波周波数で重なる時に最大となる。波向き90degにてHeave加速度のRAOが最大となる時、質量及び付加質量の慣性項と復原力係数の浮力項の和 ($-\omega_e^2(M_{33} + A_{33}) + C_{33}$) は概ね0となる傾向にある。そこで、Heave加速度の $\omega_{RAOpeak}$ は慣性項と浮力項の和が0となる時の波周波数とし、式(21)のように示した。式(21)のHeave加速度の $\omega_{RAOpeak}$ は松井ら⁹⁾による流体力係数の簡易算式に基づいている。式(21)のHeave加速度の $\omega_{RAOpeak}$ と数値解析結果の $\omega_{RAOpeak}$ の比較を図10に示す。

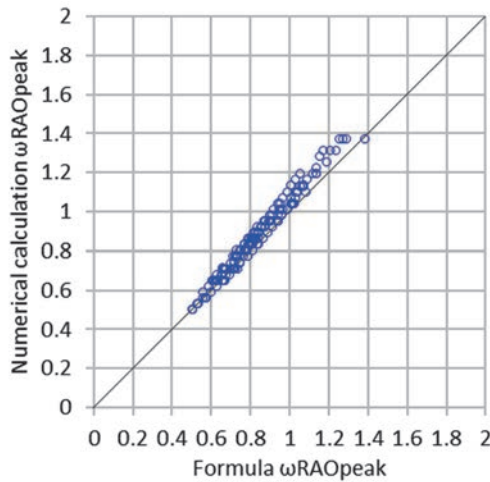


図10 式(21)と数値解析結果のHeave加速度の $\omega_{RAOpeak}$ の比較

式(21)の精度が概ね高いことが分かる。一方、波向き180degにてPitch角のRAOが最大となる時は波スペクトルとRAOのそれぞれの最大値が同じ波周波数で重なる時とはならない。同調周期付近でRAOが最大とはならないため、Heave加速度と同様の手法を取ることはできない。そこで、Pitch角の $\omega_{RAOpeak}$ は船の長さに寄らないという定性的な考察に基づき、数値解析の $\omega_{RAOpeak}$ を船の長さで無次元化すると、 $\omega_{RAOpeak}$ の無次元値は図11のように表される。

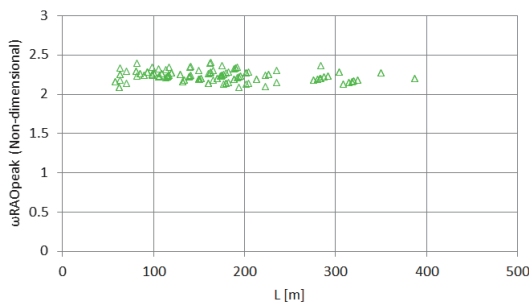


図11 無次元のPitch角の波周波数の数値解析結果

図11の結果から、Pitch角のRAOの $\omega_{RAOpeak}$ は船の長さに寄らずに概ね一定であることが分かる。このことから、 $\omega_{RAOpeak}$ の無次元値を2.23とし、 $\omega_{RAOpeak}$ の有次元値を式(21)のように定めた。式(21)のPitch角の $\omega_{RAOpeak}$ と数値解析結果の $\omega_{RAOpeak}$ の比較を図12に示す。

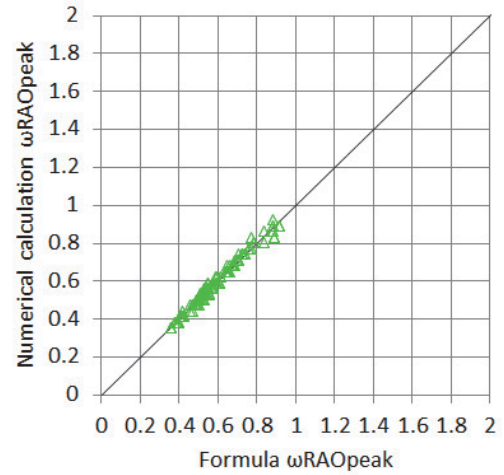


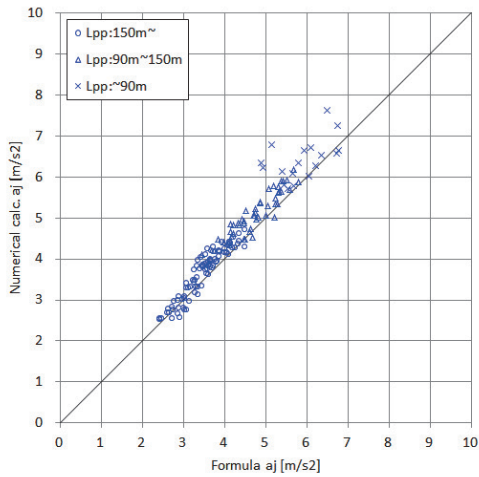
図12 式(21)と数値解析結果のPitch角の $\omega_{RAOpeak}$ の比較

図12の結果から、概ね推測通りであり、式(21)の精度が高いことが分かる。

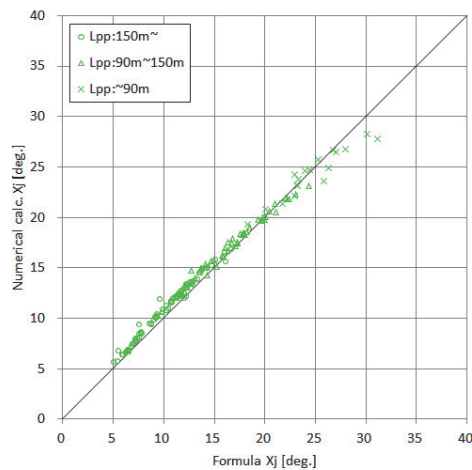
$$\begin{aligned}
 \text{Heave加速度} \quad \omega_{RAOpeak} &= \sqrt{\frac{gC_w}{dC_b + 0.108\pi B \frac{2C_w^2}{C_w + 1}}} \\
 \text{Pitch角} \quad \omega_{RAOpeak} &= 2.23 \sqrt{\frac{g}{L}}
 \end{aligned} \quad (21)$$

9. 簡易算式と計算結果の比較

Heave加速度及びPitch角を式(4)にて計算した値と数値解析における超過確率 10^{-8} レベルの長期予測値の比較を図13に示す。



(A) Heave加速度



(B) Pitch角

図13 式(4)と数値解析における超過確率 10^{-8} レベルの長期予測値の比較

図13から分かるように、式(4)の精度は高いことが分かる。

10. 結論

線形理論に基づいて、Heave加速度とPitch角の長期予測の高精度な簡易算式を開発した。開発した構成要素ごとの簡易算式を図1に示している。構成要素の定式化について簡単にまとめると次の通りである。

- 船体応答の最悪短期海象中の標準偏差がRAOの最大値と相関があると仮定し、RAOの最大値を長期予測の定式化に使用する。本稿では、長期予測の定式化の精度を確認するために数値解析で得られたRAOの値を用いており、RAO自体の定式化は行っていない。

- 船舶の縦運動を考えると水線面形状の寄与が大きいという定性的な考察から水線面積 LBC_w を用いて各応答のRAOの最大値を標準偏差に変換する係数を定式化した。(第5.1節)
- 長波頂不規則波を短波頂不規則波に変換する係数は応答ごとに一定値とした。(第5.2節)
- 最悪短期海象中の有義波高1mあたりの標準偏差は、RAOの最大値、第5.1節の係数及び第5.2節の係数を乗じて求めた。(第5章)
- RAOが最大となるHeave加速度の波周波数は、慣性項と浮力項の和が0となる等式から定式化した。Pitch角の波周波数はPitch角の $\omega_{RAOpeak}$ が船の長さ依存しないという定性的な考察に基づき、無次元の $\omega_{RAOpeak}$ から定式化した。(第8章)
- Heave加速度とPitch角のそれぞれについて、広義の同調¹⁴⁾ ¹⁵⁾時のゼロアップクロス平均波周期に水線面積 LBC_w を用いた補正をかけることで、最悪短期海象のゼロアップクロス平均波周期を定式化した。(第7章)
- 10^{-5} の発現確率の有義波高は有義波高とゼロアップクロス平均波周期の結合確率分布を用いて定式化した。(第6章)
- 超過確率 10^{-8} の最大荷重は、最悪短期海象理論⁶⁾を用いて定式化した。(第4章)

上述のように、本稿で示した簡易算式は数値解析によって得られたRAOの値に基づいている。今後は筆者らが耐航性理論に基づいて開発したRAOの簡易算式を使用し、精度検証等を行う予定である。また、横運動や船体曲げモーメントについても、本稿と同様のアプローチで簡易算式を開発する予定である。

謝辞

本研究の遂行及び論文執筆にあたり、適切なアドバイスを戴いた海上技術安全研究所の深沢塔一博士、日本海事協会の河邊寛博士、また、本研究のデータ分析等にご協力いただいた、日本郵船の赤松達哉氏、商船三井の大宮知起氏、脇田薫平氏、葛谷知史氏、今治造船の松脇淳也氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) K. Sugimoto, Y. Fukumoto, J. Matsuwaki, T. Akamatsu, S. Ashida, K. Onishi, H. Houtani, M. Oka, H. Kawabe, K. Ishibashi, Non

- Linear Effect on Wave-induced Loads for Hull Structural Design, Proceeding of 39th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2020), OMAE ASME 2020
- 2) International Association of Classification Societies, Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, 2019
- 3) ClassNK, Rules for the Survey and Construction of Steel Ships Part C, 2019
- 4) A. Shinkai, Estimating the Design Values of Vertical Bending Moment Induced on the Ship Hull in Waves, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 138, pp. 295-304, 1975 (in Japanese)
- 5) J. Fukuda, R. Nagamoto, O. Tsukamoto, A. Shinkai, Estimating the Design Values of Horizontal Wave Shearing Force Induced on the Ship Hull in Waves, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 139, pp. 166-173, 1976 (in Japanese)
- 6) H. Kawabe, M. Morikawa, K. Shibazaki, Simple Estimation Method for Long-term Distribution of Wave Induced Load based on the Severest Wave Condition Approach, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 189, pp. 193-200, 2001 (in Japanese)
- 7) T. Shigemi, T. Zhu, Studies on the Practical Estimation Method of the Design Loads for Primary Structural Members of Tankers - 1st Report, Design Sea States -, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 191, pp. 195-207, 2002 (in Japanese)
- 8) J. J. Jensen, A. E. Mansour, A. S. Olsen: Estimation of ship motions using closed-form expressions, Ocean Engineering, Vol. 31, pp. 61-85, 2004
- 9) S. Matsui, K. Shinomoto, K. Sugimoto, S. Ashida, Development of Closed Formula of Ship Response in Wave – 2nd report: Hydrodynamic Forces Related to Vertical Motion-, Conference proceedings, the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol 28, 2019 (in Japanese)
- 10) M. Oka, T. Ando, C. Ma, T. Yoshida, N. Izumi, N. Matsubara, A. Usami, Y. Kidoura, H. Kawabe, Numerical Calculation Procedure of Global Ship Motion of LNG Carrier Considering LNG Liquid Dynamic Effect in Wave Condition, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 26, pp. 103-118, 2017 (in Japanese)
- 11) A. D. Papanikolaou, T. E. Schellin, A Three Dimensional Panel Method for Motions and Loads of Ships with Forward speed, Ship technology research, Vol.39, pp. 145-156, 1992
- 12) International Association of Classification Societies, Technical Background Documents for CSR, 2018
- 13) International Association of Classification Societies, Recommendation No. 34 Standard Wave Data, 2001
- 14) H. Kawabe, S. Hibi, H. Tanaka, K. Shibazaki, H. Sasajima, Contribution of Supposed Wave Condition on Long-term Distribution of Wave Induced Load (1st Report Relation between The Maximum Wave Induced Load and Supposed Wave Condition), Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 186, pp. 319-339, 1999 (in Japanese)
- 15) H. Kawabe, Contribution of Supposed Wave Condition on The Long-term Distribution of A Wave Induced Load, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 6, pp. 135-147, 2002
- 16) S. Takezawa, K. Kobayashi, On the Motion Responses of Offshore Floating Structures in Directional Spectra Waves -The 1st-order responses-, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 165, pp. 141-152, 1989 (in Japanese)
- 17) J. Fukuda, Statistic Prediction of Ship Response, Society of Naval Architects of Japan, First Symposium on Ship Manoeuvrability, pp. 99-119, 1969 (in Japanese)
- 18) A. Shinkai, S. Wan, The Statistical Characteristics of Wave Data and Long-Term Predictions of the Ship Response, Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects, Vol. 89, pp. 223-231, 1995 (in Japanese)

温室効果ガスの削減に向けた気候変動イニシアチブについて

赤星 貞夫*

1. はじめに

地球温暖化防止のための国際的枠組みであるパリ協定では、地球温暖化を産業革命前と比べて1.5℃に抑えることによって、多くの気候変動の影響を回避できるとしている。そのためには、2030年時点で2010年比45%減、2050年前後に正味ゼロにすることが必要になるとともに、21世紀にわたって100～1000Gt-CO₂の空気中からの二酸化炭素除去（Carbon Dioxide Removal：バイオマス、CCS等により大気中のCO₂を除去し、地中や海洋等に恒久的に貯留する）が必要となる。大規模な二酸化炭素除去技術は未だ実用化されておらず、これを回避するためにはなるべく早期にCO₂の排出量を削減し、大気中のCO₂蓄積量の増加を抑制していく必要がある。

こうした状況に鑑み、先進国を中心に2050年～2060年に温室効果ガスの排出を実質ゼロにする目標を掲げる国が増えるとともに、当該目標を達成するためのマイルストーンとして、2030年の温室効果ガスの削減目標も各国政府から発表されている。日本は、2030年に2013年比で46%減という排出削減を掲げている。（表1）

表1 主要国の温室効果ガス削減目標

	2030年中期目標	長期目標
英国	少なくとも▲68%（1990年比） （2013年比▲55.2%相当）	2050年少なくとも▲100% （1990年比）
独	▲65%（1990年比）	2045年排出実質ゼロ
EU	少なくとも▲55%（1990年比） （2013年比▲44%相当）	2050年排出実質ゼロ
米国	▲50～52%（2005年比） （2013年比▲45～47%相当）	2050年排出実質ゼロ
日本	▲46%（2013年比）	2050年排出実質ゼロ
中国	2030年迄に排出量を削減に転ず （GDP当り排出量を2005年比65%超削減）	2060年CO ₂ 排出実質ゼロ

これらは何れも、簡単に達成できる目標ではない。なかでも、大規模な洋上風力開発を次々に展開、再生可能エネルギーの導入を強力に推進し、今年11月のCOP26では議長国を務める英国の目標が突出している。また、ドイツも本年5月に、これに準ずる排出量削減目標の引き上げを発表している。なお、EUの目標は京都議定書の基準年である1990年と比

較して設定され、一方、米国は排出量が多かった2005年と比較して設定され、それぞれ半減以下まで削減する目標となっている。日本の2013年比で46%減という目標も、各国の目標を2013年比で見れば、EU、米国と同等の水準となっている。やや控えめとはいえども、世界最大の温室効果ガス排出国（約28%：2017年データ¹⁾）である中国がこのような目標を発表したことのインパクトははかり知れない。

上記は国の政策レベルでの目標であるが、一方、民間ベースでも温室効果ガス削減のための先進的な取り組みを推進しようとする様々な国際的な活動（気候変動イニシアチブ）が進められている。これらの多くは環境NGOが、民間の自主的な取り組みを啓発・促進しようと始めたものであるが、こうした活動に賛同する機関投資家や銀行の増加、また、気候変動対応が資金調達や事業運営そのものに大きな影響を及ぼすとの認識が企業側においても定着してきたことから、こうした気候変動イニシアチブに積極的に対応していこうとする企業が増えている。

気候変動イニシアチブへの参画は、いわば取引先や市場との約束であり、長期にわたって削減対応、計測、報告や公表等の責任を負うことになる。現在議論されているレベルの排出量削減は、企業のコスト増につながるものであり、国レベルでの競争条件のイコールフットINGが国境炭素調整措置（気候変動対策が不十分な国からの輸入品に対し、生産過程で排出された炭素の量に応じて、自国と同等の排出負担を課す措置）とすれば、こうした気候変動イニシアチブは国際取り決めに先行する民間レベルでのそれとの見方もある。一方で、企業の気候変動問題に対する真摯な取り組み姿勢を対外的に示すという効果もある。

本稿では、存在感を増す主要な国際気候変動イニシアチブの概要について紹介するとともに、当部が昨年から実施している気候変動イニシアチブ対応のコンサルティング業務についてもご紹介する。

* 環境・再生可能エネルギー部

2. 主な国際気候変動イニシアチブについて

2.1 CDP

2.1.1 CDPの概要

CDP²⁾は、従前「カーボンディスクロージャープロジェクト」という名称で気候変動に係る対策を企業にアンケートし、その内容を投資家等へ開示するものであったが、2010年から水セキュリティ、2012年からはフォーレスト（森林）についてもアンケートするようになり、スコアが拡大したため、現在はカーボンディスクロージャープロジェクトとは呼ばず、頭文字だけの標記で「CDP」という名称になっている。英国に本部を置く国際NGOである。

CDPの仕組みは、概略以下のとおりである。投資家又はサプライチェーン上の顧客の要請に基づき、CDP事務局は企業にアンケートへの回答を要請する。回答要請を受けた企業は、公開か非公開かを選択の上、任意で回答を行う。公開の場合は回答内容がCDPのウェブサイトで公開され、非公開を選択した場合は、公開要請をした投資家、顧客との間で回答が共有される。

回答内容については、CDPのスコアリング・パートナーとなっている企業がこれを一定の採点基準に照らして採点し、その結果を8段階で公表する。なお、回答は前述のとおり任意であるものの、回答を行わなかった企業については「辞退」あるいは「無回答」と記載され「F」の評価を受ける。この評価は、十分な情報提供をしなかったことに対してであり、環境への責務に対してではない。（図1）



図1 CDPの採点・評価システム

CDPについては、2020年時点で、投資運用額106兆ドル超の515を超える投資家、購買力4兆ドルを超える150のサプライチェーンプログラムメンバーが、9,600社以上の企業から回答を得ており、こ

れら回答企業で世界の時価総額の50%以上を占めているとされる。2020年、日本の企業も気候変動に係る質問書だけでも801社が回答を行っている。ちなみに、回答にあたっては、10万円～70万円程度の手数料を支払う必要がある。

CDPは投資家や顧客向けに企業の気候変動対策の開示を求め、事業の継続性や成長性を把握する点に主眼があるが、回答内容は企業の気候変動対策に関する気づきを促し、マネジメントの改善や、企業の先導的な取り組みを促すといった、気候変動対策への誘導的な色彩が強い内容となっている。また、当然のことながら事実に基づくものであるものの、回答の巧拙は点数にも影響することから、設問の意図や複雑な評価システムを理解したうえで回答を作成することが必須となる。

2.1.2 CDP（気候変動）への主な回答項目

(1) ガバナンス

気候変動対策に係る取締役会レベルの監督機関の設置の有無、取締役会による監督の方法や、気候関連問題への最高責任者などを説明する必要がある。また、気候変動問題に対する管理へのインセンティブの有無も問われる。

(2) リスクと機会

回答の中心的部分の一つであり、気候関連のリスクと機会をどのようなプロセスで特定、評価し、これらに如何に対応しているかを説明する必要がある。特に事業に重大な財務的、戦略的な影響を及ぼす可能性がある、当該企業固有の潜在的なリスクや機会の特定について、定量的な評価結果も含めた説明が求められる。

(3) 事業戦略

事業戦略策定のために気候関連シナリオ分析の使用の有無が問われ、現時点で行っていない場合でも、今後行っていく予定がある旨記載すると、得点が得られるなど、TCFD手法の採用（Task force on Climate-related Financial Disclosures：2.3節参照）を誘導する内容となっている。

(4) 排出量の目標と実績、算定

回答企業は、以下の3つの排出Scope（カテゴリ）に分類して当該報告年に係る温室効果ガスの排出量の削減目標設定の有無、また、排出量削減のための具体的活動や数量的効果を回答する必要がある。（図2）

Scope1 排出量

自社が行った燃料の燃焼、工業プロセスでの排出、事業活動等において直接排出される温室効果ガスの量

Scope2 排出量

他社から供給された電気・熱・蒸気の使用に伴う温室効果ガスの間接排出量（温室効果ガスは、これらを生成する場所で排出される）

Scope3 排出量

その他の間接排出量、即ち、事業者の活動に関連するサプライチェーン上の他社による排出量（15類型に分類されている）

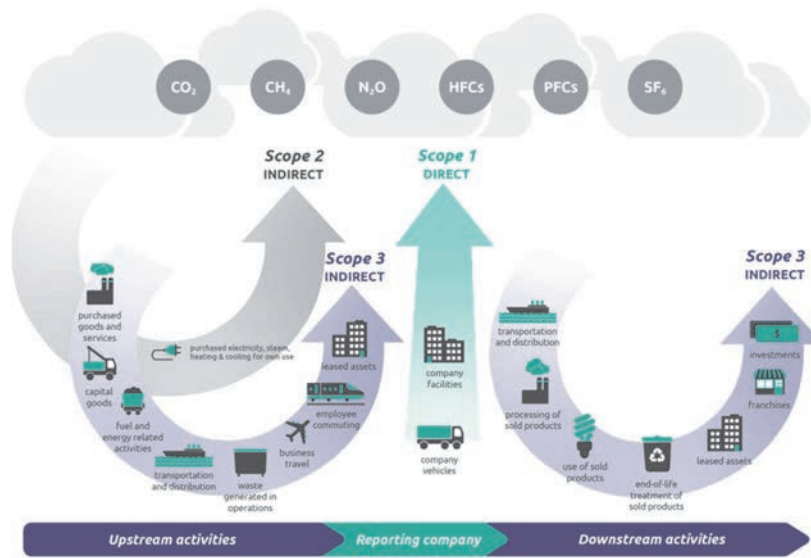


図2 排出量のScope別分類

出典：Corporate Value Chain Accounting Reporting Standard³⁾

Scope1, 2&3について補足～自動車为例に～

将来、製造・販売されるエンジン車（ガソリン車やディーゼル車）を電気自動車に順次切り替えていくという政府・自治体の方針が発表され、経済界も巻き込んだ議論となっている。これを、CO₂の排出という観点から見れば、**Scope1排出がScope2に切り換わる**ことに相当する。

ご参考までに、ガソリンエンジン車と電気自動車の走行中のCO₂排出量を試算すれば、エンジン車がガソリン1ℓで15km走ると仮定した場合、1km当たり155gのCO₂（Scope1）が放出される。一方、電気自動車が、1kmの走行に電力0.1kWhを消費すると仮定すれば、日本の電力会社の電力を充電して使用する場合、1km当たり47gのCO₂（Scope2）が排出される計算となる。走行に伴うCO₂の排出量だけでみれば、現在の火力発電を主体とする電源構成であってもCO₂は大きく減少する。しかしながら、電気自動車の場合は、バッテリーの製造工程中に、エンジン車以上にCO₂を排出（Scope3排出に相当）することから、現状の電源構成を前提とすれば、走行距離の多い車両でなければ、CO₂排出量削減効果は限定的となる可能性がある。

したがって、自動車の電化にあたっては、充電用の電力供給を確保することに加えて、**再生可能エネルギー発電等のCO₂を直接排出しない電源を**

どれだけ増やせるかが鍵となる。

なお、Scope2排出に関して、CDPでは、再エネ証書（当該電力量に対する排出量を保証）の活用は認められているものの、日本の地球温暖化対策法、省エネ法で活用が認められているオフセットクレジット（プロジェクト実施前の排出量（ベースライン）と実施後の実排出量の差分をクレジットとして価値化）は使用が認められていないことに留意する必要がある。

また、目標の設定方法には、絶対量（総量目標）で定める方法と、基準となる単位活動量当たりの量（原単位目標）で定める方法がある。

特に科学的根拠に基づく排出量の削減目標の設定（Science Based Targets：2.2節参照）を行う場合は、得点が上乘せされ、積極的な削減目標の設定が推奨される形となっている。

また、算定された排出量の記載にあたっては、ロケーション基準と呼ばれる「事業場等の所在地に適用される一般的な排出係数を用いて計算」した結果を掲載するとともに、マーケット基準と呼ばれる「再エネ・低炭素電力等の調達等の個々の契約に基づく排出係数を用いて計算」した結果の双方を記載し、各企業による温室効果ガスの削減努力を数値的に示す方法が採用されている。（図3）

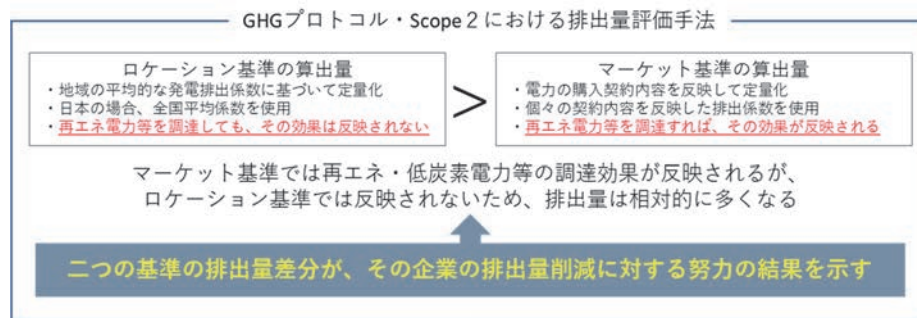


図3 ロケーション基準とマーケット基準

さらに、排出量の数値について第三者機関による検証／保証がなされているか否かによっても、CDPによる評価が異なってくる。

なお、CDPによる評価は温室効果ガスの絶対量の大小ではなく、いかに温室効果ガスの排出量を正確に把握しているか、削減に向けた努力を今行っているか、将来に向けた削減計画を立てているかという観点から評価されることに留意する必要がある。

(5) カーボンプライシング

最近、カーボンプライシングという言葉が新聞紙上でも良く出てくるが、一般には、炭素税、又は「キャップアンドトレード」と呼ばれる総排出量の

上限規制と排出権の取引制度を組み合わせる方式の何れかを意味する。後者においては、排出権に価格が設定され、売買されることからカーボンプライシングと呼ばれる。冒頭に述べた厳しい削減目標を達成していくためには、日本においても、コロナ問題が収まった後に、この様な経済的仕組みの本格的な導入に向けた議論が活発化するものと思われる。

なお、実は、日本でも、炭素税はすでに2012年に「地球温暖化対策税」として導入されているが、二酸化炭素1トン当たり289円と他国に比べて非常に低く、その効果は極めて限定的となっている。

(図4)

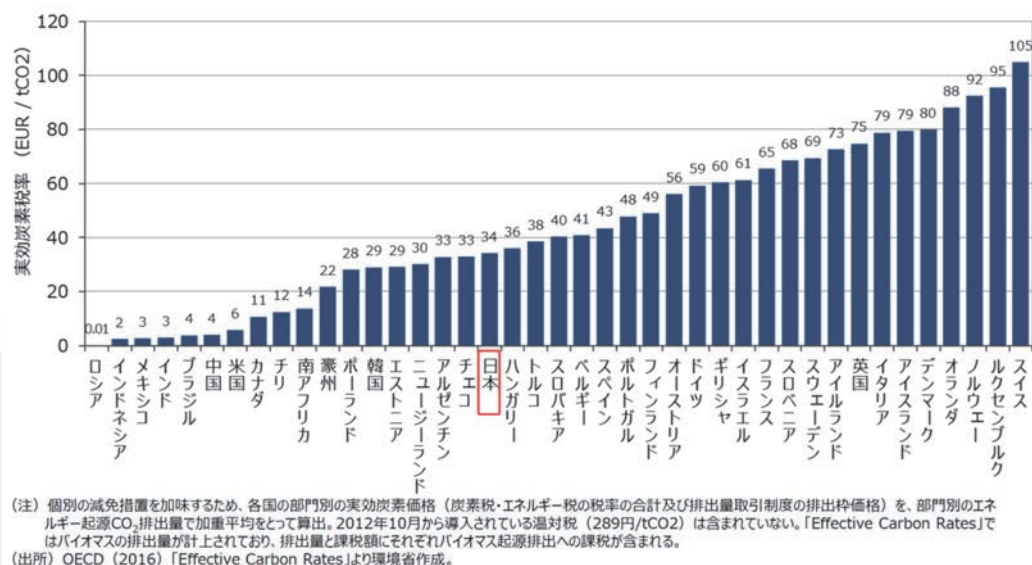


図4 実効炭素価格の国際比較（全部門、2012年4月）

～排出枠価格、炭素税、エネルギー税の合計～

出典：環境省・中央環境審議会・カーボンプライシングの活用に係る小委員会第4回資料（資料2）

一方、キャップアンドトレードについても、東京都や埼玉県においては、独自の制度が導入され、商業ビルや製造事業所におけるCO₂の排出削減に寄与している。ちなみに欧州では、2050年の排出実質ゼロを目指して、2030年頃までの厳しい中期目標が次々と発表されたことから、排出枠を手当てしておきたい企業により、ヘッジファンドによる排出権

取引が活発化、取引価格が上昇してきており、昨年は20～30ユーロ／トンだった取引相場が2021年4月時点で40ユーロ／トン（日本円で約5,000円）まで上昇している。今後も、規制の強化に伴い、取引価格は上昇すると見られ、欧州域内の企業のコスト負担は増加、これに伴い、国境炭素調整措置の議論も活発化するものと思われる。

すっかり、前置きが長くなってしまったが、CDP回答においては、こうした既存のカーボンプライシング制度が、事業にどのような影響を及ぼしているかについて記述する必要がある。さらに、インターナルカーボンプライシングという将来の炭素価格の上昇、すなわち規制強化や炭素税率のアップに備えて、社内で仮想の炭素価格を設定して投資判断に活用する等の取り組みを行っているか否かについても質問が設けられている。

インターナルカーボンプライシングの導入は、利用の仕方によっては自社の競争力の制約要因となる可能性もあるが、日本企業の場合、現時点においては、低炭素投資の推進、省エネの推進、社内行動の変革等を目的として利用するところが多い⁴⁾。

(6) エンゲージメント

日本語で言えば、「積極的な協働」と訳すのが適当かもしれない。サプライヤーや顧客との積極的な協働で取り組む気候変動対策について記載する。また、気候変動対策の政策に対して直接又は間接に影響を及ぼす活動（例：業界団体での関連の活動）についても設問がある。これらの活動の詳細について記載する必要がある。

2.1.3 日本企業等による回答状況及び評価

2.1.1節で、回答企業は8段階で評価されると説明したが、最上位の評価であるAランクを気候変動分野で取得した企業は2020年、全体の5%であり、世界で273社あった。うち、日本企業が53社あり、日本は世界的に見ても多くのAランク企業を出している国となっている。

海外に比べて、再生可能エネルギーの導入比率が低かったり、化石賞という不名誉な賞を授与されたりしている日本において、このように世界的な評価軸に照らして評価されることには当該企業の関係者のご努力は大変なものがあると拝察する。

2.2 SBT

SBT (Science Based Targets) は2015年に発足したイニシアチブで、企業が設定した温室効果ガスの削減目標が、パリ協定に対応した気候科学の知見 (IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (国連気候変動に関する政府間パネル)) と整合した削減目標であるか否かを認定する活動である。運営主体であるSBTは気候変動に関する情報開示を推進する連合体 (国連グローバルコンパクト, CDP, 世界資源研究所 (WRI), 世界自然保護基金 (WWF) によって設立された。

SBTに参加して自社の目標の検証を受ける企業は、最低5年から最大15年の期間をカバーする目標を設定しなければならない。また、15年を超える

長期目標の設定が推奨される。

SBT、即ち気候科学の知見と整合した削減目標の設定は以下による必要がある⁵⁾。

2.2.1 Scope1・Scope2排出量

Scope1, Scope2の少なくとも95%をカバーすべきである。

原則総量削減である。

ただし、事業セクターによっては、その特性を踏まえた算定手法 (SDA : Sectoral Decarbonization Approach) が認められており、特定の生産量・活動量当たりの排出量の減少を設定することが認められる。海上貨物輸送サービス産業については、総量削減方法に基づくSDA Transport Toolが削減シナリオを提供しているが、現在更なる開発作業が進行中である。

具体的な削減レベルについては、2019年10月15日以前は、気温上昇を2℃未満に維持するために必要な温室効果ガス排出量のレベルが要件とされており、2050年に49～72%削減を目安として、2025年～30年頃の目標を設定することが求められていたが、IPCCの1.5℃特別報告書の内容を踏まえて、現在は少なくとも「気温上昇が2℃を十分に下回る (Well-below 2℃) 削減経路」に適合すべきとされている。また、「気温上昇を1.5℃以下に抑える基準」に向けて努力することが推奨されている。(図5)

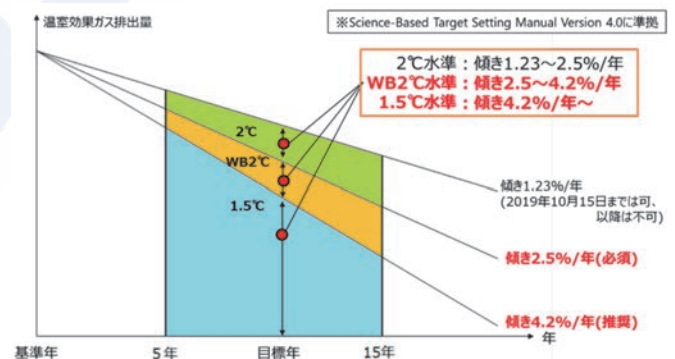


図5 SBTの削減シナリオイメージ

出典：国際的な気候変動イニシアチブへの対応に関するガイダンス、経済産業省・環境省（2019年3月策定2021年3月最終改定）

その他に、様々な製品・サービスを提供し、成長が早い企業に適した、付加価値当たりの温室効果ガス排出量 (GEVA) という方法もあり、この場合は毎年7%減という目標が必要となる。

また、Scope2に限っては、再生可能エネルギー電力の購入目標を2025年までに80%、2030年までに100%とするという代替選択肢もある。

2.2.2 Scope3排出量

Scope3排出量が、Scope1+2+3の40%以上の場合、スコープ3について目標を設定すべきである。総量削減又は原単位排出量の削減が認められる。「気温上昇を1.5℃以下に抑える基準」、「気温上昇が2℃を十分に下回る(Well-below 2℃)基準」若しくは「2℃経路」、又はSDA手法で認定された方法であれば野心的とみなされる。

さもなければ、物理的原単位目標が、対象期間で少なくとも年平均2%以上の原単位削減が野心的とみなされる。経済的原単位目標の場合は少なくとも年平均で7%減少する場合は野心的とみなされる。

また、Scope3排出量目標のバウンダリは、少なくとも、Scope3排出量全体の2/3を含めるべきである。

2.2.3 日本企業等による目標設定状況

正式にSBT設定を約束した企業は2021年5月7日時点で1,408社(うち日本企業129社)、目標がSBT整合と認定された企業は701社(うち日本企業99社)である。さらに、1.5℃対応(Business Ambition for 1.5℃)を目指す企業誓約を行った企業も538社(日本企業20社)ある⁶⁾。

2.3 気候関連財務情報開示タスクフォースTCFD

TCFD(Task force on Climate-related Financial Disclosures)は、気候変動が及ぼす以下のリスクが金融システムの安定を損なうおそれがあるとして、2015年9月に当時の金融安定理事会(FSB:各国の中央銀行総裁及び財務大臣で構成)の議長・英国中央銀行総裁Mark Carney氏が提唱したスキームである。FSBはCOP21の開催期間中に、民間主導によるTCFDを設置し、2017年6月に自主的な情報開示の在り方に関する提言(TCFD最終報告書)を公表した。

①物理的リスク:洪水、暴風雨等の気象事象によってもたらされる財物損壊等の直接的インパクト、グローバルサプライチェーンの中断や資源枯渇等の間接的インパクト

②賠償責任リスク:気候変動による損失を被った当事者が他者の賠償責任を問い、回収を図ることによって生じるリスク

③移行リスク:低炭素経済への移行に伴い、GHG排出量の大きい金融資産の再評価によりもたらされるリスク
これを踏まえて、2,000を超える機関等が上記提言の趣旨に賛同するとともに、前述のCDPにおい

ても2018年より、TCFDに対応する形で質問書の改訂を行っている。日本企業の中にもこれに賛同するところが増えている(2021年5月6日時点で388社、米国、英国を上回って第一位)⁷⁾。また、最近では、TCFDの規制化に向けた動きも顕著である。

TCFDは、GRI(Global Research Institute)がマルチステークホルダー向けにESG情報全般について主にサステナビリティ報告書として作成することを求めたり、また、IIRC(Integrated Reporting)が投資家向けに同じくESG情報全般について統合報告書として作成を求めたりしている開示フレームと異なり、気候関連情報に特化した開示フレームワークとなっている。

TCFDは、全ての企業に対し、①2℃目標等の気候シナリオを用いて、②自社の気候関連リスク・機会を評価し、③経営戦略・リスク管理へ反映、④その財務上の影響を把握し、これらを一般的な年次財務報告等に盛り込んで、開示することを求めている。(図6)

また、非金融セクターにうち、①エネルギー、②運輸、③原料・建築物、④農業・食糧・林業製品の4つのセクター向けに、補助ガイダンスを策定している。

【運輸セクター向け補助ガイダンス】

業種:空運、海運、陸運(鉄道・トラック、自動車)

開示項目:法規制強化・新技術による現行の工場・機材への財務リスク、新技術への研究開発投資、低排出基準・燃料効率化規制に対処する新技術活用への機会に対する評価と潜在的影響に係る開示

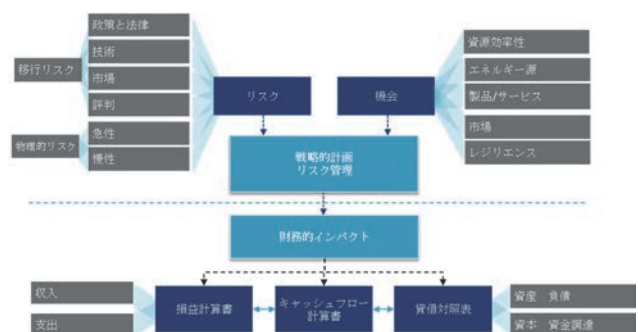


図6 気候関連リスクと機会が与える財務影響

出典:金融安定理事会による「気候関連財務情報開示タスクフォースによる最終報告書」⁸⁾に関する説明会 資料(2017年7月)

TCFDでは、気候関連リスク・機会とその財務上の影響の開示対象を例示している。TCFDの4つの開示基礎項目「ガバナンス・戦略・リスク管理・指

標と目標」のうち最上位に位置するのは「ガバナンス」であり、各基礎項目で「気候関連のリスクと機会」に関する説明が求められる。(表2)

表2 TCFDの要求項目

ガバナンス (Governance)	戦略 (Strategy)	リスク管理 (Risk Management)	指標と目標 (Metrics and Targets)
気候関連のリスクと機会に係る当該組織のガバナンスを開示する。	気候関連のリスクと機会がもたらす当該組織の事業、戦略、財務計画への現在及び潜在的な影響を開示する。	気候関連リスクについて、当該組織がどのように識別、評価、及び管理しているかについて開示する。	気候関連のリスクと機会を評価及び管理する際に用いる指標と目標について開示する。
開示される開示内容	開示される開示内容	開示される開示内容	開示される開示内容
a) 気候関連のリスクと機会についての、当該組織取締役会による監視体制を説明する。	a) 当該組織が識別した、短期・中期・長期の気候関連のリスクと機会を説明する。	a) 当該組織が気候関連リスクを識別及び評価するプロセスを説明する。	a) 当該組織が、自らの戦略とリスク管理プロセスに即して、気候関連のリスクと機会を評価するために用いる指標を開示する。
b) 気候関連のリスクと機会を評価・管理する上での経営の役割を説明する。	b) 気候関連のリスクと機会が当該組織のビジネス、戦略及び財務計画（ファイナンスプランニング）に及ぼす影響を説明する。	b) 当該組織が気候関連リスクを管理するプロセスを説明する。	b) Scope 1、Scope 2及び、当該組織に当てはまる場合はScope 3の温室効果ガス（GHG）排出量と関連リスクについて説明する。
	c) 2℃或いはそれを下回る将来の異なる気候シナリオを考慮し、当該組織の戦略のレジリエンスを説明する。	c) 当該組織が気候関連リスクを識別・評価及び管理のプロセスが、当該組織の総合的リスク管理にどのように統合されているかについて説明する。	c) 当該組織が気候関連リスクと機会を管理するために用いる目標、及び目標に対する実績を開示する。

出典：金融安定理事会による「気候関連財務情報開示タスクフォースによる最終報告書」⁸⁾に関する説明会 資料（2017年7月）

上記事項の開示にあたっては、以下に留意する必要がある。

- ①関連する情報の提示
- ②具体性をもって完結させること
- ③明確に、バランス良く、わかり易く
- ④一貫性を保つこと
- ⑤同一のセクター、産業内、ポートフォリオの中の機関の間で比較可能なこと
- ⑥信頼性をもち、検証可能かつ客観的
- ⑦タイムリーに開示すること

2.4 RE100

RE100は、企業がグローバルな事業活動で用いる電力を2050年までに全て再生可能エネルギーとすることを目指す国際イニシアチブである。国際環境NGOであるThe Climate Group（本部は英国）がCDPの協力を得て2014年から実施している。

RE100における再エネ化の対象は以下の通りである。

- ・報告企業の活動に伴う全てのスコープ2排出
- ・報告企業の自家発電に伴うスコープ1排出
- ・50%以上の資本を保有しているブランドや企業グループの範囲のすべての企業と活動
- ・50%以下の資本を保有している企業（フランチャイズや共同所有）は個別に判断

2021年4月時点で参加企業は世界で297社、日本で52社となっている。日本企業の場合、再生可能エネルギー100%を達成する目標年は早いところでは2025年、多くは2050年とする企業も多い。

対象電力は、太陽光、風力、バイオマス発電、地

熱発電、水力（大型水力を含む）となっている。（注：名称がRE100とされていることに現れているとおり、原子力は対象から外されている。）

なお、再生可能エネルギー電力の調達の中には、実際に再生可能エネルギー発電所から直接電力を調達したり、自社の社屋にPVを設置したりする、所謂リアルな再エネ電力の調達に加え、小売電気事業者が販売する再エネ電力調達メニューや、グリーン電力証書等の調達も含まれている。従って、サービス業等で電力によるCO₂排出のみの企業の場合は、比較的簡単にこれを実現することができる。

なお、RE100の特長として、再エネ電力の調達方法を以下の2種類に分類し、その後②による調達を推進しているところに、本取り組みの特長が見られる。

- ①系統に元から存在する設備やFITの規制で導入された設備からの調達ケース
 - ②需要家自らが投資を行い、再生可能エネルギー発電設備を設置して、ここから調達するケース
- 上記②の取り組みを行うことは一般には容易なことではないが、比較的事業規模の大きい企業にとって、太陽光・陸上風車といった再生可能エネルギー発電所であれば、火力発電所や大型水力発電所と比べれば、まだ設置しやすいと考えられる。

さらに、Appleのように、既に再エネ電力の調達により自社のオフィスや直営店、データセンターで使用する電力はすでに排出ゼロを達成し、排出ゼロの枠をサプライヤーまで求める企業も現れている。こうした動きはAppleのサプライチェーン上の企業にとっては、再エネ電力の調達が事業存続のための重要な課題となり、再生可能エネルギー電力の普及が遅れる日本に企業にとってはアキレス腱となるおそれもある。

ちなみに、日本においても、RE100の要求をさらに上回る、再生可能エネルギー電力調達についての自主評価基準を設ける企業もある。例えば、本年3月2日の株式会社リコーの発表によれば、同社においては、再生可能エネルギー使用率の目標引き上げに加えて、調達価格、再エネ発電施設の設置時期、発電方法、発電所と購入事業所の距離など、国内の再生可能エネルギーの質の向上にも配慮した、総合的な評価制度を導入されている⁹⁾。(表3)

表3 再エネ電力導入に係る総合評価基準

評価項目（評価の観点）	高評価	低評価
電力購入単価 （より安価な再エネ電力を優先）	安い	高い
設備の追加性 （新たな再エネ設備の開発を促進）	新規設備	既設設備
発電時のCO2発生 （環境負荷がより低いものを優先）	太陽光・風エネ・水力	バイオマス
発電所と使用場所の距離 （送電系統への負荷を抑制する）	近い	遠い
地元企業の出資比率 （地元経済への貢献度）	高い	低い

3. NKの取り組み

これまでに縷々ご説明した通り、気候変動イニシアチブへの対応には、それぞれの複雑なルールを熟知したうえで、企業の実態に基づき、その努力ぶりを文書、数値として表現する必要がある。

NKとしては、現時点で最も対応企業が多く、また様々な取り組みを内包するCDPコンサルを契機として、様々な気候変動イニシアチブへの対応に係るサポートメニューをそろえていきたいと考えている。

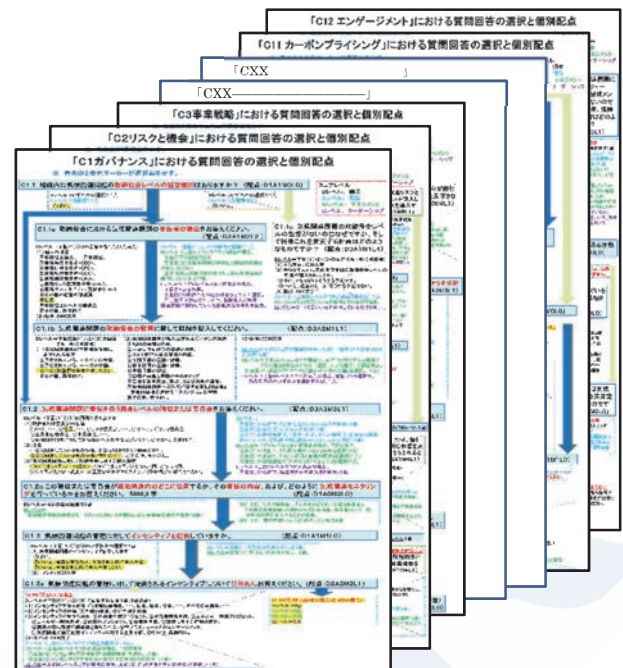


図8 NK独自作成の解説資料（例）

また、回答案が出来上がった後は、自己採点による到達レベルの把握を行い、対応方針（情報公開の方法選択等）をご相談させて頂く。

こうした当社との協働作業を通じて、各企業における気候変動対策問題への対応方針検討の一助となることを願っている。

4. おわりに

今回ご紹介した国際環境イニシアチブは何れも欧州発のものである。欧州と比べて再生可能エネルギーの普及が遅れ、再エネ電力のコストもまだまだ高い中、また、そもそもエネルギー多消費型の産業、これに関連する企業の多い日本において、一部の日本企業は、とても上手に海外ルールに適応されておられると感じている。

一方で、今後GHG規制が順次、強化されていく中で、引き続きこうした対応を続けていくためには、CO₂削減のための水素等クリーン燃料の社会実装が必要になってくる。当社としては、長距離大量輸送は勿論として、その他のフェーズ（製造・貯蔵・使用）の安全評価や、クリーンエネルギーのLCA評価等の実施可能性について、様々な団体活動や共同研究等を通じて、勉強を重ねているところである。

関係企業の皆様と、様々な場面で一緒に取り組む機会も今後増えてくると思うが、各分野の専門家の皆様との意見交換を行いつつ、常に、我々に何が出来るかを考えてまいる所存である。

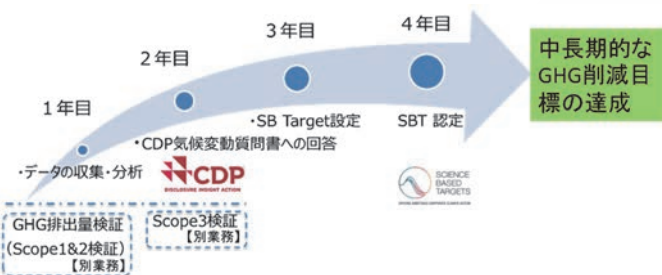


図7 取り組みステップ（イメージ）

まずは、当社が業界動向等について詳しい海運・造船業界の顧客を対象とし、顧客要望に合わせる形で、ステップバイステップのコンサルメニューを作成する。（図7）

そのうえで、NK独自作成のわかりやすい解説資料を用いて、CDP質問書の設問体系と配点システムの正しい理解を共通化したうえで、メリハリのあるドラフティングサポート業務を提供させて頂く。（図8）

参考文献

- 1) EDMC／エネルギー・経済統計要覧，2020年版
- 2) 一般社団法人CDP Worldwide-Japan WEBサイト <https://japan.cdp.net/>
- 3) Greenhouse Gas Protocol WEBサイト
<https://ghgprotocol.org/standards/scope-3-standard>
- 4) インターナルカーボンプライシングについて
(環境省・中央環境審議会・カーボンプライシングの活用に関する小委員会 第14回 資料3)
<http://www.env.go.jp/council/06earth/shiryou3.pdf>
- 5) SBT Setting Manual Ver4.1, 2020年4月
<https://sciencebasedtargets.org/resources/legacy/2017/04/SBTi-manual.pdf>
SBTi Criteria and Recommendations, 2021年4月
<https://sciencebasedtargets.org/resources/files/SBTi-criteria.pdf>
- 6) SBT WEBサイト Companies Taking Action
<https://sciencebasedtargets.org/companies-taking-action>
- 7) TCFD WEBサイト TCFD Supporters
<https://www.fsb-tcfd.org/support-tcfd/>
- 8) Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures (2017年6月)
- 9) 株式会社リコープレスリリース (2021年3月2日)
https://jp.ricoh.com/release/2021/0302_1/

Innovation Endorsementに関する取り組み

佐々木 吉通*

1. はじめに

情報技術の発達に伴い様々な分野で革新的な取り組みが始まっている。海事産業でも船舶からの種々のデータを陸上へ転送し、状態監視や最適航路の分析を行うなど様々な取り組みが既に始まっている。

このような取り組みは主に、業務効率化に向けた競争力の向上、運航コストの軽減、データを主体とした新たな価値の創出などを目的とされてきたが、近年は持続可能な開発への対応もこれら革新的な取り組みの大きな原動力になっている。

SDGs (Sustainable Development Goals) は国際連合が貧困・エネルギー・成長・雇用・気候変動・海洋資源など17の目標を掲げ、2030年の世界のあるべき未来を定義し、全世界が合意した未来像と言える。SDGsの実現に向けては、情報技術の活用を含め、従来の手順とは異なるやり方とも必要となり、このような革新的な取り組みは、今後も様々なアイデアが生まれ、より広範囲に渡り高度化していくことは想像に難くない。

一方、これまで船級協会は船級規則、国際条約等の適合可否を評価し、海上における安全確保及び環境保護に貢献してきた。この第三者機関としての豊富な経験から、革新的な取り組みを進める組織からはこれらの取り組みをさらに推進するため、認証、評価を求める声があげられていたが、これら革新的な取り組みには明確な評価基準が存在しないという課題があった。

ClassNKは、情報技術の進歩と業界構造の変化を予測し、2030年頃に船級協会に求められるであろう役割を記した「ClassNK Digital Grand Design 2030」を公開している。その中に記した船級協会の将来像の一環として、2020年7月に上述の革新的な取り組みを対象とした認証サービス「Innovation Endorsement」を新たに開始した。

本稿では、この「Innovation Endorsement」に関する取り組みを中心に紹介する。

2. ClassNK Digital Grand Design 2030

情報技術の発達と持続可能な開発への対応による革新的な取り組みでは、これまでの各プレーヤーの枠組みに捉われず、これまでには無かった異なるプレーヤー間の連携による新たな価値の創出や、新たなプレーヤーの登場などが始まっている。

これまでClassNKは船級協会として、主に造船業界、海運業界、保険業界と大きく3つの顧客を中心に海洋環境や人命の保護を達成しつつ海事産業が公平で円滑に機能することを支援してきた。しかし今後、システムインテグレーターやデジタルフォワード等の新たなプレーヤーの誕生や、既存プレーヤーの役割も変化していくことが想定されるため、変化する業界構造に合わせて船級協会自身も変化が求められている。

そこで、2030年頃の海事業界の構造変革の予測を基に、デジタル変革における新たなニーズと船級協会に求められるであろう役割と、ClassNKが海事及び周辺の分野で貢献・提供すべきことを図式的にまとめた「ClassNK Digital Grand Design 2030」を2020年2月に公表した。(図1)

「Creating Innovation for a Blue Economy」をコンセプトにし、従来の船級業務を軸に今後展開すべき役割として「高度な検査」「先進的なビジネス環境整備」「第三者認証・評価・格付」の3つを挙げている。



図1 ClassNK Digital Grand Design 2030

* デジタルトランスフォーメーションセンター

3. Innovation Endorsementの概要

各企業が情報技術の発達と持続可能な開発への対応として革新的な取り組みを進める中で、これらの普及さらには他社との差別化のため、革新技術やその取り組み、またこれらを適用した船舶に対して、第三者機関による認証のニーズが高まっている。

そこでClassNKは、「Innovation Endorsement」という新たな認証スキームを開始した。この概念図を図2に示す。

革新的な取り組みに対して積極的に認証サービスを展開しその普及及び発展を促すことは、海上における環境保全、安全性の一層の向上、さらには持続可能な開発を支えていくことにつながり、前述の「ClassNK Digital Grand Design 2030」にて示した「第三者認証・評価・格付」に基づく、新しい価値創出に向けた取り組みであると言える。



図2 Innovation Endorsement概念図

Innovation Endorsementは、革新的な取り組みを認証の対象としているため、その基本方針を以下の通り定めた。

- ・ **スピード重視**：革新的な取り組みは急速に進歩しているため、この革新と同時にスピード重視で第三者として評価技術を構築し認証を行う
 - ・ **フロントランナーと協業**：革新的な取り組みには、評価基準が確定していないことが多いため、技術的先駆者であるフロントランナーと協業し評価基準を検討、策定する
 - ・ **顧客及び社会の求める認証**：革新的な取り組みの認証対象及び範囲については、顧客要望及び社会情勢に基づいて順次拡張する
- 認証範囲として「デジタル」「環境」「安全」「労働」及び「Yours」の4+1を対象としている。特に「Yours」は顧客及び社会等の求める認証のうち、最初の4分類に収まらないものに対応していくとの意味である。

「Yours」は顧客及び社会等の求める認証のうち、最初の4分類に収まらないものに対応していくとの意味である。

Innovation Endorsementの開始当初は、デジタル技術を用いた革新的な取り組みに焦点を当てていたが、持続可能な開発に関する取り組みには先進的デジタル技術の活用を伴わない取り組みもあるため、取り組みの目的別に、「環境」「安全」「労働」を認証の範囲として追加した。

Innovation Endorsementは具体的に3つの認証サービスで構成され、Notationサービス、Products & Solutions認証、Provider認証として個々に実施している。以下にそれぞれの概要を記す。

3.1 Notationサービス

認証対象を船舶とし、デジタル化や環境への先進的な取り組み等を行っている船舶に対し、「DSS」、「a-EA」等のNotationを船級符号に付記し、船級証書に記載することで、船舶の付加価値向上のサポートを行うサービスである。

なお、ここでの先進的な取り組みについては、性能面の評価基準が確立される前のフロントランナーが提案する機能の有無に焦点をおいており、関連設備等が船舶に搭載される際には、規則等に規定される要件に基づき安全確認は実施されることに留意する必要がある。

3.1.1 Digital Smart Ship

デジタル技術を用いた革新的な取り組みを行っている船舶を認証し、「Digital Smart Ship Notation」（略号DSS）を船級符号に付記するサービスで、2020年8月末に関連したガイドライン「デジタルスマートシップガイドライン」（第1版）を公表した。

革新技術を採用した船舶の設備や機能に対してそれぞれNotationを付記する枠組みであり、このサービスにより船舶への革新技術の導入、付加価値向上をサポートすることを目的としている。

一度に複数のNotationを付記可能であり、付記のためには図面審査、登録検査、維持検査を実施し革新的取り組みの稼働、維持を確認していく。

なお、革新技術に関する取り組みには技術の進歩に伴い今後同一目的の機能であってもより高度な手法が用いられることを想定し、Notationのレベル分けも定義されている。

2021年5月現在における最新版のデジタルスマートシップガイドライン第2版では、DSS Notationで記号を付記していくための取り組みとして表1に示す10項目があげられている。

例えば、自船の運航データを分析し、その結果を

用いて次航海の燃料消費最適化を行う機能を搭載していれば、DSS (EE) のNotationが付記される。

表1 DSS Notation 項目一覧

項目	略号	概要
Energy Efficiency	EE	燃料最適化関連
Hull Monitoring	HM	船体監視関連
Sloshing	SLOSH	スロッシング検知
Machinery Monitoring	MM	機関状態監視関連
Connected Ship	CNS	船上サーバ、インフラ等
Navigation	NAV	自律航行設備等
Shore Monitoring	SM	機器の陸上監視
Onboard Local Area Network	LAN	船内ネットワーク
Refrigerated Cargo Shore Monitoring	RGSM	冷蔵設備陸上監視
Emission Shore Monitoring	ESM	排ガス陸上監視

革新的な取り組みは様々なプレーヤーが様々な手法で進めており、DSS Notationもこの動きに合わせ項目を追加してきた。今後もDSS Notationを付記する項目については、顧客ニーズや業界の情勢に基づき柔軟に拡張していく予定である。

なお、DSS Notationは2020年5月末現在で約70隻の登録実績がある。

3.1.2 Advanced Environment Awareness

ClassNKでは、船舶の環境へ取り組みをサポートするため、2009年に「環境ガイドライン」を発行し、国際条約等で定められた要件のうち本来適合すべき要件以上の対応を行っている船舶に対して、「Environmental Awareness Notation」(略号EA)を付記してきた。

さらに昨今では、企業の社会的責任(CSR)の高まりや持続可能な開発目標(SDGs)に対する取り組みから、国際条約の枠組みを超えた環境保全への取り組みが広がりつつある。

そこで、2021年5月に公開された「環境ガイドライン第4版」にて、より迅速に環境対策に関する取り組みをサポートするため、Innovation Endorsementのコンセプトを取り込み、一層の顧客視点の認証サービスを追加した。

この中で、国際条約や規則の枠組みを超えた先進的な環境保全の取り組みを行っている船舶に対して、「Advanced Environmental Awareness Notation」(略号a-EA)を付記することとしている。

環境ガイドライン第4版では、a-EAでNotationを付記可能な取り組みとして表2に示す7項目があげられている。

例えば、推進性能向上のため船底空気潤滑装置を

搭載している船舶に対しては、Advanced Environmental Awareness (AIR LUBRICATION SYSTEM) 略号：a-EA (ALS) のNotationが付記される。

表2 a-EA Notation 項目一覧

区分1	区分2	記号	項目
大気汚染防止	温室効果ガス低減	SCell-(PA)	太陽電池の採用
		FCell-(PA)	燃料電池の採用
		WINDG-(PA)	風力発電機の採用
		ORCWHR-(PA)	低沸点媒体による廃熱回収システムの採用
		EGWHR-(PA)	排ガス廃熱回収システム
その他	推進性能向上	ALS	船底空気潤滑装置
		ESA	省エネ付加物

Digital Smart Ship Notation同様、これらの環境対策への取り組みは様々な手法で進められており、引き続き顧客ニーズや業界の情勢に基づき、柔軟かつ迅速に項目を拡張していく予定である。

3.2 Products & Solutions認証

Products & Solutions認証は、優良な製品やソリューションの普及と更なる発展を促すことを目的としている。

製品の開発会社等が、先進的技術を活用した高度な製品のうち認証を求める機能について、ClassNKがこれまでの船級協会のノウハウを活用して技術的な妥当性や安全性の観点を加味した上で認証し、証明書を発行するサービスである。

なお将来的には、同様のソリューション、例えば機関の状態監視ソリューション(CBM等)などに対する認証実績が集まった段階で、認証の透明性等を高めるためにより具体的な評価基準及び評価手順を明文化、公表すべくガイドライン等を開発する予定としている。

このProducts & Solutions認証は、まさにフルカスタマイズ可能な証明サービスと言える。まず、「何」をClassNKが認証すべきかを申請者から提案頂く事から開始される。この「何」は、発行される証明書に「Product Description」として記載される。この提案される先進的機能は、現時点で評価基準がないものが多いため、これまでの船級としての経験を含めて評価基準を申請者と共に検討していく。例えば、「Remote Monitoring」という機能について認証する場合、「Remote Monitoring」に対して確認すべき項目を協議しながら決定していくプロセスとなる。

その後、それら確認すべき項目に関連した製品のマニュアル・仕様書などの図書審査と、動作確認を行ったうえで、証明書発行となる。

2021年5月末現在で、4件の証明書を発行済みであり、国内外の製品約20件の認証の引き合いを受けている。

3.3 Provider認証

Provider認証は、企業の取り組みやビジネスモデルを対象とした認証サービスである。

ESG投資やSDGsに沿った目標達成のための組織によるイノベーション活動を第三者が認証することにより、ステークホルダーが互いに信頼関係を高め合えるよう支援する「新たなかたち」の認証を目指しており、認証を最大限に活かす即戦力となるよう、次の3段階の認証を検討している。

なお、各段階のいずれの認証においても、イノベーションを生み出す組織の活動及びその成果をマネジメントシステムの観点から検証する。

- ・ クラスC：イノベーションを行おうとする組織のコンセプトについての認証。例えば、「事業活動のマトリックス」、「2階建てのイノベーション経営」、「オープン・イノベーション」等のイノベーションに関する方針、計画、組織化について検証するもの。
- ・ クラスD：C認証レベルの組織が、イノベーション実装を実行しうるかについての認証。例えば、「イノベーション・コンパス」、「ステージゲート法」、「知識創造のプロセス」等のイノベーション活動の実行に必要な手法・ツールを用いて、イノベーションが実行されていることを具体的なイノベーション対象事例を用いて検証するもの。
- ・ クラスS：D認証レベルの組織が、イノベーションを実施し、それによるアウトカムがビジネスとして実装された組織を認証。例えば、ISO56002ガイドライン等により、組織がイノベーションを持続的に実施していることを検証するもの。(図3)

4. 今後の展開

以上の通りInnovation Endorsementでは、認証対象として、Notationサービス、Products & Solutions認証、Provider認証の3つの個々の認証サービスで構成されている。

さらに、革新技術による機能の有無や手法だけで

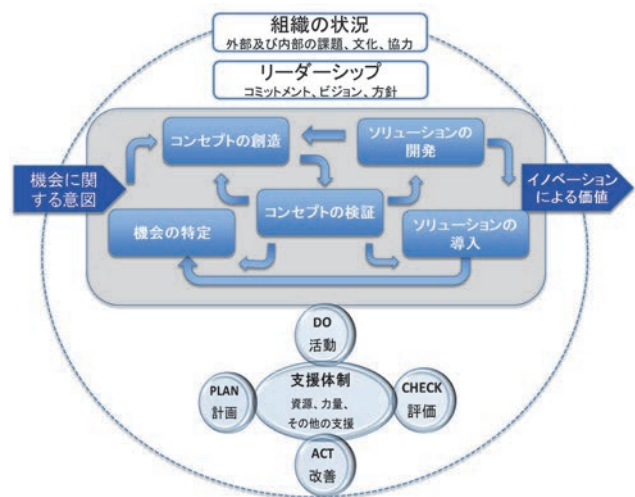


図3 イノベーション・マネジメントシステムのフレームワーク（イメージ図）

なく、顧客の取り組みそのものの認証を将来的に実施していく予定である。

例えば、省エネ技術で得られる燃費削減成果や、状態監視技術（CBM等）によるダウンタイム削減時間など、企業のESG投資に関する取り組みの成果を認証していくことなどを想定している。

この成果の認証については、様々な評価軸を基に指標化していく必要があり、各プレーヤーと実行可能性を含めて協議する必要があると考えている。

5. おわりに

ClassNKでは、「ClassNK Digital Grand Design 2030」にて「第三者認証・評価・格付」を事業柱の一つとして示した通り、革新的な技術や取り組みを認証機関としてサポートすることが、2030年頃に船級協会の求められる役割の一つと考え、その具体的なサービスとして、「Innovation Endorsement」を開始した。

このInnovation Endorsementでは、現在「デジタル」「環境」「安全」「労働」の範囲において、Notation、製品・ソリューション、プロバイダーを対象とした認証サービスを実施しており、さらに顧客要望及び社会情勢によって柔軟に拡張していく方針である。

ClassNKはInnovation Endorsementを通じて、船級協会の長期に渡って蓄積された知見を活かしつつ積極的に顧客及び業界の求める認証サービスを展開し、先進的な取り組みによって持続的な開発を狙う顧客の活動をサポートしていく。

以上

IMOの動向

— IMOでの主な審議内容・結果の紹介 —

国際部

1. はじめに

本稿においては、IMO（国際海事機関）における国際条約等の審議動向を紹介している。

前号では、2020年に開催された第75回海洋環境保護委員会（MEPC 75）及び第102回海上安全委員会（MSC 102）の審議内容を紹介した。

今号では、2021年5月5日から14日に開催された第103回海上安全委員会（MSC 103）の主な審議結果を紹介する。昨今の新型コロナウイルスの影響により、MSC 103は国際海事機関（IMO）本部ではなく、リモートで開催された。尚、関連の複数のIMO小委員会がMSC 102以降開催されなかったこと、リモート会議による時間的な制約により、いくつかの提案やコメント文書の検討を行うことができなかった。検討できなかった項目は、10月に開催されるMSC 104で審議を行う予定である。

2. MSC 103の審議結果—海上安全関連—

2.1 条約及び関連コードの主要な改正の採択

MSC 103で採択された主要な義務要件は以下の通り。

- (1) 貨物倉に対する水面探知器の設置
ばら積貨物船とタンカー以外の船舶で、複数の貨物倉を有する船舶の乾舷甲板より下方の乾貨物倉に対し、水面探知器の設置を義務付けるSOLAS条約II-1/25-1の改正。
- (2) SOLAS条約III章，LSAコード及び決議MSC.81(70)の改正
20,000GT以上の貨物船に搭載される救命艇に対して要求される静穏な水面での5ノット進水試験の要件について、自由降下進水式救命艇を適用外とするための、SOLAS条約III/33，LSAコード及び救命設備の試験に関する勧告（決議MSC.81(70)）の改正。SOLAS III章及びLSAコード改正の早期適用については下記2.2.(2)参照。
- (3) 2011 ESPコードの改正
二重船側油タンカーの初回更新検査における板厚計測要件を見直すための、2011 ESPコードの改正。

(4) FSSコード9章の改正

貨物船及び旅客船のキャビンバルコニーに対し個別識別可能な火災探知機を備える場合の故障分離要件に関するFSSコード9章の改正。

2.2 ガイドライン等の承認

MSC 103で承認されたガイドライン等のうち、主要なものは以下の通り。

- (1) 固定式CO2消火装置の保守及び点検に関するガイドライン（MSC.1/Circ.1318）の改正
高圧CO2シリンダの水圧試験手順を明確にするための、固定式CO2消火装置の保守及び点検に関するガイドライン（MSC.1/Circ.1318）の改正。
- (2) SOLAS III章及びLSAコード改正の早期適用のサーキュラー
上記2.1.(2)に関し、20,000GT以上の貨物船に搭載される救命艇に対して要求される静穏な水面での5ノット進水試験の要件について、自由降下進水式救命艇を適用外とするための、SOLAS III章及びLSAコード改正の早期適用を促すためのサーキュラー。

2.3 自動運航船に対する規則の検討

船舶の自動化に関する研究が進んでいる中で、自動運航船に適用すべき条約要件についてMSCで検討を行っている。

今回の審議では、自動運航船に関わるIMOの諸規制の論点整理（Regulatory Scoping Exercise，以下RSE）が完了したことが報告された。RSEの結果、既存の条約要件と自動運航船に必要とされる要件に潜在的なギャップがあること、及び今後の作業の優先順位について、共通の認識が得られた。審議の結果、既存の条約とは独立した自動運航船のための要件を検討する方針が合意された。

2.4 燃料油の使用における安全性強化の検討

2020年1月1日から適用が開始となる燃料油の硫黄分0.50%規制をきっかけとして、燃料油の使用における安全上の問題が検討されている。

MSC 103における審議の結果、供給された燃料油がSOLAS条約II-2/4.2.1に適合しない状況に対応するための諸々の条約要件やガイドラインについて、今後検討していくことが合意された。

ClassNK 技報

No.3 (2021 年 (I) 発行)

編集: 藤浪幸仁

発行: 一般財団法人 日本海事協会 技術研究所
〒102-0094 東京都千代田区紀尾井町 3 番 3 号

TEL: 03-5226-2737

E-mail: ri@classnk.or.jp

印刷: 大日本印刷株式会社
〒162-8001 東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 1 番 1 号
03-3266-2111

本誌に掲載された全ての記事内容は、一般財団法人 日本海事協会の許可なく転載・複写することはできません。
記事の転載をご希望の方は、上記までご連絡ください。



一般財団法人 日本海事協会
技術研究所

〒102-0094 東京都千代田区紀尾井町 3 番 3 号

Tel : 03-5226-2737

Fax : 03-5226-2736

E-mail : ri@classnk.or.jp

www.classnk.or.jp