

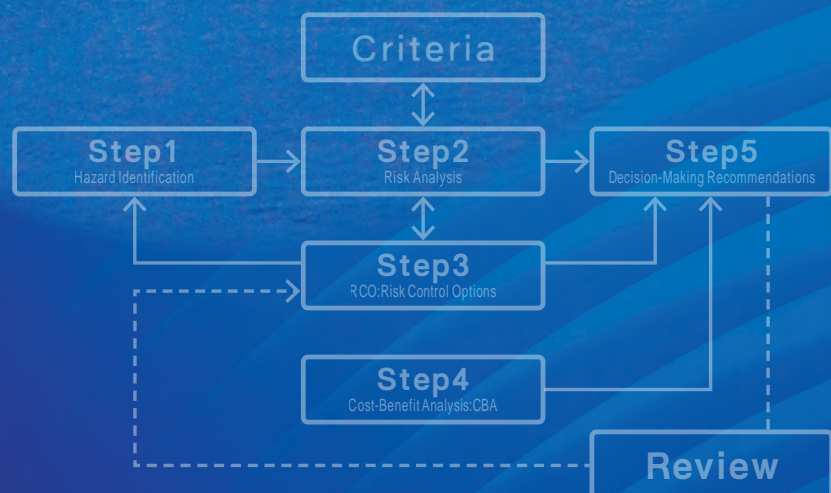
ClassNK 技報

No.6 2022年(II)

特集:リスクとの向き合い方



Risk Assessment



—目 次—

巻頭言	執行役員 技術研究所長 藤浪 幸仁.....	1
-----------	------------------------	---

特集記事 「リスクとの向き合い方」

海事分野におけるリスクアセスメントについて	運輸安全委員会委員 田村 兼吉.....	3
-----------------------------	----------------------	---

近年、海事分野ではリスクを用いた議論が一般的に用いられるようになってきた。中でも海洋開発分野では、1970年代後半からリスクアセスメントが導入され、現在はHSE活動等、安全性評価に大きく貢献している。一方、船舶分野においてもFSAやGBS等、IMOの議論の場で利用が拡大しつつある。そこで、海事分野で利用されている安全、リスクといった基本的概念と共に、リスクアセスメントの実際の手法と将来的な適用分野の拡大について解説する。

自動運航船の社会実装を支える新しい仕組みの必要性について

.....	技術研究所, デジタルトランスフォーメーションセンター.....	11
-------	----------------------------------	----

自動運航船の社会実装が現実味を帯びてきており、従来の枠を越えた、真に新しい技術/ソリューションの社会実装を支える新しい仕組みを考える時期に来ている。機能安全やシステムズエンジニアリングといった海事業界にとっては新しい考え方も定着させていく必要がある。その一つの手法として、本論文ではVulnerabilityの考え方を提案する。

リスクベース設計のための基礎と展開	技術研究所.....	17
-------------------------	------------	----

本稿では、近年注目されている構造のリスクベース設計に係る基礎理論と規則開発への展開について述べる。基礎理論としてまず構造信頼性理論を解説した後、リスクベース設計の特徴を最適設計問題の観点から説明する。次に、IMOのリスクベース構造規則開発ガイドラインであるGBS-SLA (Goal Based Standards-Safety Level Approach) interim guideline を紹介する。そして、リスクベース設計の適用方法の一例として、疲労強度クライテリアの開発方法とその技術的課題について述べる。

技術一般

板部材の局部強度算式の開発	横浜国立大学大学院工学研究院 岡田 哲男.....	27
---------------------	---------------------------	----

板部材は船体構造における基本的な構成要素であり、面外圧力に対する局部強度算式は極めて重要である。本稿では、これを理論式の裏付けがあり損傷との対応がより明確な寸法算式に見直していくために行った以下の検討内容を紹介する。まず、寸法算式の基礎として全塑性モーメントや付加的な面外荷重への面内応力の影響を定式化し、残留たわみ基準に基づく弾塑性FEMと比較した上で、2点塑性関節生成基準による寸法算式を提案した。更に、面内応力影響を縦式構造と横式構造の間で補間し、アスペクト比補正係数と組み合わせた複合影響を定式化した。

世界初ゼロエミッションバッテリー推進タンカーと今後の展望について

.....川崎重工業株式会社 平松 雄樹, 小野寺 達也..... 41

地球温暖化対策として、温室効果ガス（GHG）の排出削減は喫緊の課題である。船舶における目標達成のソリューションに、自動車での適用事例が広がっているバッテリー推進システムがある。川崎重工業は、旭タンカー株式会社が発注し、2022年3月末に竣工した世界初のゼロエミッションバッテリー推進タンカー「あさひ」向けに、内航船向け大容量バッテリー推進システムを納入した。本稿では、バッテリー推進システムの開発の背景、概要、特徴、今後の展望などについて紹介する。

「付加製造（3Dプリンティング）に関するガイドライン」の紹介

.....開発本部 機関開発部..... 49

近年、3Dプリンティングに代表される付加製造技術を用いた金属製品の開発が急速に普及し、特に自動車、航空宇宙、医療、産業機器等の分野において同技術が活用されている。造船業界においては、まだ当技術を用いた製造例は少ないが、コスト削減や生産性向上といった課題は造船業界でも同じであり、将来的には造船業界においても当技術が本格的に導入されるものと予想している。そういった背景から、本会では当技術の基本事項の紹介から、当該技術を用いて製造された金属製船用機器等の承認要件についてを整理したガイドラインを発行した。本稿では、その中身を紹介する。

実船モニタリングに向けた波浪情報の推定・活用

.....技術研究所..... 55

推進性能分野・構造分野において、実船モニタリング技術の開発が活発に行われている。実船モニタリング技術において、波浪情報の推定・利用が重要であり、波浪情報それぞれの長所と注意点を踏まえる必要がある。本稿では、まず一般に普及している観測機器や解析手法を概説し、主要な波浪情報の特徴を俯瞰的に比較する。そして各波浪情報の実船モニタリングへの活用に対する適合性について考察する。

IMOの動向

.....開発本部 国際部..... 67

本稿では、国際海事機関（IMO）における国際条約等の審議動向を紹介する。今号では、第78回海洋環境保護委員会（MEPC 78）及び第105回海上安全委員会（MSC 105）の審議概要を紹介する。

巻頭言

特集「リスクとの向き合い方」発刊によせて

執行役員 技術研究所長 藤浪 幸仁

ClassNK技報No.6の発行に際して、一言ご挨拶申し上げます。

技術広報誌「ClassNK技報」は、本会の技術活動や研究成果などの公表により、海事産業などへの技術的貢献を図ることを目的に発行しています。前号（ClassNK技報No.5）ではゼロエミッション船に焦点を当て、関連の技術動向や最新の研究開発成果等を報告いたしました。

近年、海洋開発分野のみならず船舶分野においても、代替燃料船や自動運航船を含む種々の新概念船をはじめとして、船舶の開発・設計、建造、運航の各フェーズで様々なリスクを早急且つ総合的に洗い出しを行い合理的な対応を検討することが求められています。

本技報No.6では、「リスクとの向き合い方」と題する特集を組み、海事分野におけるリスクアセスメントやリスクベース設計の考え方、自動運航船の社会実装を支える新しい仕組みの必要性についてご紹介いたします。さらに、種々の研究開発成果や本会の技術活動、IMOの動向等に係る多彩な記事・論文を掲載しています。

本会は今後も社会や業界のニーズを踏まえて、海上における人命と財産の安全確保、海洋環境の保全および社会を先導するイノベーションの創出に資する研究開発に鋭意取り組み、海事産業の更なる発展への貢献に努めてまいります。

今後とも皆様のご理解とご支援をお願い申し上げます。

海事分野におけるリスクアセスメントについて

— リスクとうまく付き合う —

田村 兼吉*

1. はじめに

「リスク」という言葉は、「リスクヘッジ」や「カントリーリスク」等、日常でも頻繁に使われる様になってきた。ただ日本では、一般的に「リスク」は「危険そのもの」と考えられているのに対し、欧米では「悪い事象が起こる可能性」として、あくまで「可能性」と考えられており、捉え方はかなり異なる。

「リスク」の語源は、イタリア語のrisicare（勇気を持って試みる）やrisico（災い）、スペイン語のrisco（切り立った険しい岩礁）など諸説あつてはつきりしないが、「リスク」概念の発展に、航海・貿易等、海事分野が大きく関わってきたことは確かだろう。例えば、17世紀の終わり頃、英国ロンドンでEdward Lloydによって経営されていたロイズ・コーヒーハウスが、船乗りや商人たちからもたらされる情報を集めて新聞を作り、それらを元にリスクを分散させるためのシンジケートを組織する等、海難保険制度の礎を作ったというのは、広く知られた話である。

本稿では、最近のリスクアセスメント、特に海事分野で利用されているリスクアセスメントに関わる概念や実際の手法を紹介すると共に、将来的な適用分野の拡大についても言及したい。

なお、Risk Assessmentを、日本では「リスク評価」と訳す場合が多いが、Risk Evaluationも「リスク評価」と訳される。evaluationは評価する行為そのものであるのに対し、assessmentは評価した結果に基づいて考察を加え、判断することまでを含める概念であり、若干の相違点がある。本稿での「リスク評価」には判断までを含めることから、混同を避けるためリスクアセスメントの表記を用いることとした。

2. 安全について

2.1 安全とは何か

「安全第一」という標語は街中でもよく見かける。これは、1901年に当時世界一の製鋼会社であった

USスチールの社長、Elbert Henry Garyが、なかなか事故が減らないことに心を痛め、当時業界一般の経営方針であった「生産第一・品質第二・安全第三」を改め、「安全第一・品質第二・生産第三」としたことに由来する。この経営方針により、大戦時の労働者不足においても、USスチールは、事故が少なく、品質も優れ、生産性も高い会社となった。「安全第一」のスローガンは全米に浸透していった。

「安全第一」を実現することは人類の課題であるが、「安全」とは何かということ、それ自体はあやふやなもので、これを明確に定義することは難しい。逆に、「安全」の反対の概念である「危険」は人身事故や疾病等、はっきりと目で見ることができ、取り扱いも実地的である。従って、「危険」側から「安全」を定義するのが妥当と考えられる。

ISO/IECガイド31によれば、安全とは「許容できないリスクがないこと」と定義されている。注記として「この規格において、受容可能なリスクおよび許容可能なリスクは同義語の場合がある。」としている。また、JIS規格²⁾では、「人への危害または損傷の危険性が、許容可能な水準に抑えられている状態」としている。つまり、「安全」は「リスク」や「危険性」を介して定義されている。同時に、安全だとしても、ある程度のリスクは残っており、安全とはこれらが受容または許容できるレベルまで低く抑えられている状態であることを意味している。絶対安全（ゼロリスク）は初めから放棄されており、これが世界の共通認識である。

2.2 安心と安全

「国民の安心・安全に貢献する」といった標語の様に、最近「安心」と「安全」がペアにして使われることが多いが、安心と安全は何が違うのだろうか。英語では、安全はsafetyであるが、安心に対応した訳語は難しい。強いて言えばpeace of mindだろうが、主観に依存するものである。豊洲市場への移転問題が紛糾したとき、小池東京都知事は「豊洲は安全だが安心ではない」と発言した。客観的には安全だと分かっている、まだ不安を感じるという、日本人的な考えを代表する言葉かもしれない。

また、風評被害という言葉は、根拠のない噂やデ

* 運輸安全委員会委員

マにより、悪い影響、特に経済的な被害が発生したときに使われるが、これも「安全だが、安心ではない」ことから発生すると考えられる。なぜ安全と言われても安心できないのだろうか。利用者側の知識の偏りや不足、無関心による知ることの放棄が原因の一つであり、自ら学ぶ姿勢が必要である。しかし、利用者が安全を実現・保証している組織や人間を信頼できて、初めて安心に結びつく。こうした組織や人間側の利用者への積極的な情報発信や相互のコミュニケーションも、安心の醸成には不可欠だ。

2.3 安全目標

絶対安全が存在しない状態では、どこまでリスクを低減したら安全と言って良いかという問題が出てくる。安全の定義には、受容できる (acceptable)、許容できる (tolerable) という言葉が出てくるが、ISO/IECガイド²⁾では許容可能なリスクは「その時代の社会の価値観に基づく所与の状況下で、受け入れられるリスク」となっている。どこまで対策をとったら安全かの明確な判断基準は無く、リスクの大きさ、利便性、コスト等との兼ね合いで決められる。以下に代表的な判断基準を列挙しておく³⁾。

・危険効用基準

製品から受ける効用、メリット、利便性とそれが有しているリスクとを比較して、受け入れるか否かを判断する考え方。

・費用便益基準

リスク削減策を実施するのに必要なコストと実施によって得られる便益や効用とを比較して、どこまでリスクを下げるべきかを判断する考え方。

・消費者期待基準

通常の消費者が合理的に期待する安全性の基準であり、常識として最低限守らなければならないリスクのレベルとする考え方。

・標準逸脱基準

規格や規制・法律がある場合に、その基準を満たしていれば良いとする考え方。

2.4 ALARP

多くの場合、実際の安全目標は、ALARP (As Low As Reasonably Practicable) の原則を用いて判断される。ALARPとは、リスクは合理的に実行可能な限りできるだけ低くしなければならないという考え方であり、危険効用基準や費用便益基準等に従って、できる限りリスクを低減していく。実際には、ある程度以上のリスクは許容不可能 (intolerable)、ある程度以下のリスクは広く許容可能 (negligible) で、その間を合理的に実行可能な範囲であるALARP領域とする。リスクがALARP領域に留まることができるのは、リスク低減に要する費用が、得

られる利益に対して極度に大きいことを示せる場合のみとされる。図1はALARP領域を示した概念図で、人参のように見えるためキャロットダイアグラムとよばれる。ALARPの原則を用いた安全目標は、原子力、化学工学、交通 (自動車、航空機、鉄道、船舶)、計算機、通信と、対象分野によって取り扱いがかなり異なる。様々な分野に適用できる安全目標は、日本学術会議においても模索中である。

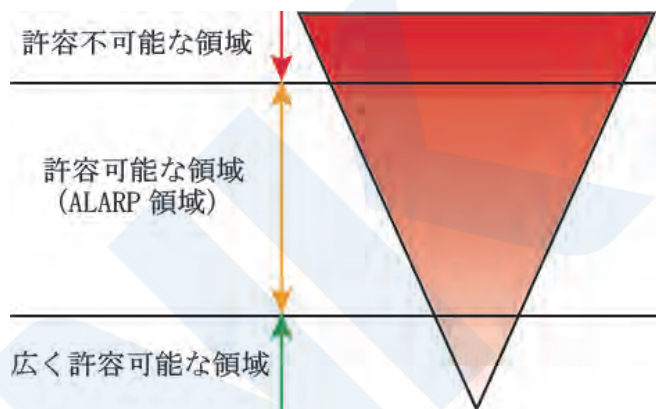


図1 ALARPの概念 (キャロットダイアグラム)

3. リスクについて

3.1 様々なリスク

リスクには様々なものがある。例えば、環境リスクは、化学物質などが環境を経由して人の健康や生物の生息に悪影響を及ぼす可能性を表す。カントリーリスクは、海外投融资や貿易を行う際、対象国の政治・経済・社会環境の変化による、個別事業相手が持つ商業リスクとは無関係に収益を損なう危険の度合いを言い、ロシアのウクライナ侵攻に起因するリスクはその典型的なものである。こうした様々なリスクのうち、概念が比較的定まっている経済でのリスクと安全工学でのリスクについて解説する。

3.2 経済でのリスク

この分野ではリスクとは一般的に「ある事象の変動に関する不確実性」、つまり、リスク＝不確実性と考える。従って、結果の重要性は含まれない。

この定義に従うと、断崖絶壁の端に人が立っている状態は、転落するか無事であるかは分からないので、不確実性、つまりリスクが高い。しかし、一旦その人が崖から足を踏み外して落ちていくとき、十中八九命がないとすれば、足を踏み外した直後にリスクは低下することになる。

3.3 安全工学でのリスク

安全工学でのリスク⁴⁾は、人間の生命や経済活動にとって望ましくない事象の不確実さの程度およびその結果の大きさ、と定義される。つまり、リスクは

発生頻度（frequency）と結果の重大性（consequence）との組み合わせとして考えることができる。この場合、リスクを減らすには発生頻度を減らすか、結果の重大性を減らすかしなければならない。

例えば、最も単純に考えると、式(1)の様に、結果の重大性と発生頻度の両者をかけ合わせた値をリスクの値として定義することができるが、実際にこの式はよく利用されている。

$$\text{リスク} = (\text{consequence}) \times (\text{frequency}) \quad (1)$$

ただ、この式を用いた場合、consequenceが高くてfrequencyが低いものと、consequenceが低くてfrequencyが高いものの2つが同じリスクの値となることがある。飛行機事故と自動車事故との比較でも分かるように、consequenceが高くてfrequencyが低いものの方が、圧倒的に注目度が高い。そういう意味で、consequenceとfrequencyをどのように組み合わせてリスクの値を決めるかには、まだまだ考慮の余地がある。

3.4 事故シナリオに関する用語⁴⁾

安全工学において、事故シナリオを取り扱う場合に用いられる用語には、以下の様なものがある。

ハザード（hazard）は、最近ハザードマップ等で聞くことも多い言葉であるが、人命等に対する脅威を表す。事故発生をもたらす事情や条件のことで、いわゆる危険事情である。例として、雪で凍結した道路、河川近くにある住宅、ノートパソコンの近くのコーヒー等があげられる。なお、リスクとハザードは同じ意味に使われることもあるが、リスクアセスメントの観点から見ると異なる用語である。ハザードが自然災害、停電、劣化などによる危険性又は有害性を表すのに対し、リスクはハザードが悪影響をもたらす可能性の度合を表す。つまりハザードがなければリスクは存在しない。

ペリル（peril）は、損失の直接的原因を表す。危険をもたらす、あらゆる原因を指し、火災、爆発、交通事故など損失を生む事故、またはその原因となる事故のことである。例として、落雷、台風、衝突、洪水等があげられる。

コンシークエンス（consequence）は、前述のように事故の深刻度を表す。人の死傷数（人）や被害額（円またはドル）を用いる場合が多い。

「ハリケーンにより石油プラットフォームが破壊して3人が死亡した」という事故シナリオの場合、ハザードはハリケーン、ペリルは石油プラットフォームの破壊、コンシークエンスは3人死亡という

ことになる。

3.5 発生頻度のイメージ

発生頻度は確率であり、[0, 1]の範囲の値をもつ無次元量である。確率を求めるには、まず、1時間当り、1年当り、1航海当りなど、参照する期間を特定する必要がある。対象が船舶の場合、年・隻当り（per ship-year）、稼働時間当り（per working-hour）など特定の参照期間を用いる場合がある。

確率であるから通常小さな値となるが、ゼロにはならない。従って、その値の意味を理解し、具体的なイメージをもって使わないと、現実離れした議論になる。年確率 10^{-2} は一生に一度、年確率 10^{-10} は宇宙が誕生してから1度だけ起こる確率である。例えば、雷に打たれる確率は年確率 10^{-6} 程度とのデータがあるが、宝くじの1等当選確率は 10^{-7} である。憂慮すべき確率ではないが、全く無視しても良いとは言えない確率だろう。

4. リスクアセスメント

4.1 リスクアセスメントとは何か

ISO規格では、リスクアセスメントとはリスク同定、リスク解析、リスク評価を網羅するプロセス全体を指す。

リスク同定（またはハザード同定）は、リスクを発見し、認識し、記述するプロセスである。

リスク解析は、リスクの特質を理解し、リスクレベルを決定するプロセスである。

リスク評価は、リスク（とその大きさ）が受容可能か（許容可能か）を決定するために、リスク解析の結果をリスク基準と比較するプロセスである。

リスクアセスメントとは、もともとリスクマネジメントプロセス内のサブプロセスである。通常は、リスクアセスメントの後で、予測されるリスクの値（予測値）と、許容されるリスクの大きさ（許容値）を比較し、予測値が許容値を上回ったときには、リスク軽減またはリスク回避の施策をとるという意思決定を行い、より安全な状態を実現するプロセスをとることになる。

4.2 リスクアセスメントの実際

4.2.1 FSAの概要⁵⁾

実際に海事分野のリスクアセスメント手法として広く利用されているFSA（Formal Safety Assessment）を例として示す。FSAは図2に示す様に、その手続きはStep 1～Step 5の5段階に分かれている。各段階での作業を解説する。

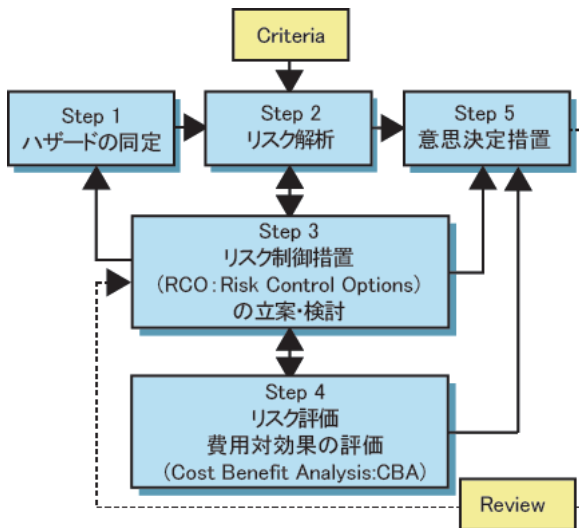


図2 FSAの手続き

4.2.2 Step 1：ハザードの同定

Step 1では、最初に事故に至る種々のハザードを同定する。同定には、HAZID会議および分析的方法を組み合わされて用いる。

HAZID会議は、異なる分野からの複数の専門家で構成され、スケジュールに沿ったミーティングを通して、被害程度と発生頻度の数値化を行う。また、分析的方法では全てのシナリオに対して、利用可能なデータを用い、リスクレベルで順位付けを行う。

Step 1では、ハザードリスト、リスクレベルで順位付けされた関連シナリオおよび事故原因とその影響の記述の3種の出力を得ることができる。

4.2.3 Step 2：リスク解析

Step 2では、Step 1で得られた事故シナリオの詳細なリスク解析を行い、事故確率、事故後の災害拡大が生じる確率とその重大性を求めることにより、対象全体のリスクを個々の事故シナリオのリスクの総和として求める。

この場合のリスクとは安全の指標であり、FSAでは式(1)の様に、事故の発生頻度と被害程度との積によってリスクを定義しており、想定する被害は、人命損失、環境影響、財産の喪失である。リスク評価指標には、個人リスクおよび社会リスク等がある。例えば、個人リスクとは個人が交通機関を利用している期間中のその個人の死傷頻度を示す指標、社会リスクとは、交通機関を利用している集団の、考慮対象期間中の死傷頻度を示す指標である。集団の社会リスクはその集団に属する個人リスクに集団の大きさをかけたものである。社会リスクの指標としてPLL (Potential Loss of Lives) があり、船舶の場合は1隻1年当りの死者数である。PLLの値が同じであっても、1回で多数の死者が出た事故ほど許容し難くなるという観点を反映するものとして、FN

(Frequency - Number of Fatality) 線図 (人命損失数とある数以上の人命損失が発生する事故の発生頻度をグラフ化したもの) を用いて分析を行う。

FSAでは、リスク許容基準としてALARP領域の上下限を定めている。個人リスクでは、ALARP領域の下限值はすべて 10^{-6} であるが、上限値は乗員では 10^{-3} 、乗客や公衆に対してはより厳しく値を1桁下げて 10^{-4} としている。なお、このリスク許容基準については暫定的なものであり、反対意見も多いため、見直しが検討されている。

4.2.4 Step 3：リスク制御措置の立案・検討

Step 3では、リスクがALARP領域にある場合に高リスクをもたらすハザードそのものや、あるいは事故シナリオの発生を抑制するための安全対策であるリスク制御措置RCO (Risk Control Options) を検討し、それらを導入した場合のリスクの減少を推定する。FSAでは個別の対策のことをリスク制御手段RCM (Risk Control Measure), RCMの集合をRCOとよぶ。RCOには事象の発生頻度を減らす予防措置と、結果の重大度を減らす緩和措置がある。

4.2.5 Step 4：リスク評価

Step 4では、Step 3で考案された種々のRCOを実現するためのコストを評価し、費用対効果の評価を行い、RCOの優先順位付けを行う。FSAにはその指標値としてGross Cost of Averting a Fatality (GCAF) と Net Cost of Averting a Fatality (NCAF) の2つがあり、式(2)で表される。

$$\begin{aligned} \text{GCAF} &= \Delta C / \Delta R \\ \text{NCAF} &= (\Delta C - \Delta B) / \Delta R \end{aligned} \quad (2)$$

ΔC : RCOの導入による追加コスト (US\$)

RCOの価格、訓練費用、逸失利益等を含む

ΔR : RCOの導入により削減されるリスク

ΔB : RCOの導入による経済的利益

GCAFは、1単位のリスクを削減する場合に必要なとされるコストを意味するのに対し、NCAFは、RCO導入により利益が得られる場合の正味のコストを意味し、利益としてRCOの導入により防止される被害の金銭的な価値が含まれる。

GCAFまたはNCAFの値が評価基準の閾値より小さければ、費用対効果の観点から有効なRCOとなり、そのRCOの導入が図られる。現在のFSAガイドラインでの評価基準の閾値は、OECD加盟国のGCAFの現状に基づいて、死亡および障害の場合300万US\$を使用しているが、この値ももっと高くすべきとの意見も多く、現在、見直しの動きがある。

4.2.6 Step 5：意思決定措置

Step 5では、Step 4の結果を判断し、導入すべきRCOを提案する。

5. 海洋開発分野におけるリスク

5.1 海洋開発の安全管理体制

船舶については、世界統一規格であるSOLAS条約（The International Convention for the Safety of Life at Sea）が存在するが、石油・ガス開発における海洋構造物については、生産国自らが安全管理の体系および規則を定めることになる。代表的な安全監督機関としては、ノルウェー石油監督局NPD（Norwegian Petroleum Directorate）、英国健康安全庁HSE（Health and Safety Executive）、米国安全・環境執行局BSEE（Bureau of Safety and Environmental Enforcement）と海洋エネルギー管理局BOEM（Bureau of Ocean Energy Management）等がよく知られている。

表1 海事分野へのリスクアセスメント導入の歴史

年	主な出来事	概要
1977	北海ノルウェーセクター、エコフィスク油田爆発事故	1週間で約15万バレルの油が流出。制御不能に近い状態で、大規模な環境破壊。
1970年代後半	Offshore IndustryへのQuantified Risk Assessment (QRA)の適用に関するプロジェクトの開始	研究レベル。原子力産業のアプローチの導入。
1980	海洋石油掘削リグ Alexander L. Kielland 号事故	疲労による1ブレース破断後の構造冗長性欠如により全損・沈没。
1981	NPD regulations	全ての新設構造物について、概念設計段階でのQRAの適用を義務付け。Accidental damage Limit State (ALS)あるいは同義のProgressive Collapse Limit State (PLS)の照査。
1984	NPD regulations	ALSの定量的評価基準の導入。
1988	北海UKセクター、Piper Alphaの爆発炎上事故	当直引き継ぎ時の連絡不備。圧力安定弁の保守等に対する作業許可。責任、権限といった組織の問題。
1990	英国安全衛生庁のSafety Case	Prescriptive regulationからGoal-setting regulationへ。特定の施設/システムを対象とする。
1997	Guidelines on the Application of Fomal Safety Assessment (FSA) to the IMO rule making process	IMOにおける船舶のRule Makingのための安全性評価手順。一般化された船舶を対象とする。

リスクアセスメントの海事分野への導入の歴史を表1に示す。海洋開発分野では原子力分野とほとんど同時期の1970年代後半から導入され、後述のSafety Case対応のFPSO Ruleが英国、オーストラリアなどでは既にデファクトスタンダードになっている。船舶分野では1990年代後半になってIMO（国際海事機関）での規準策定手続きにFSAが採用され、近年になってFSAを用いた基準提案も増加しつつある。

5.2 海洋構造物でなぜリスクの概念が必要か

なぜ、リスクアセスメントの海洋開発分野への導入が全産業の中でも早かったのだろうか。第一の理由は、海底油田・ガス田の開発段階において巨大な資金が必要なことにある。試掘によって海底油田を発見する確率は、物理探査等の技術革新で昔より格段に上昇したが、それでも20%弱、その内、商業的採算がとれる100万bbl以上の海底油田を発見できるのは、100本の試掘のうち2本程度と言われている。このため、海底油田の開発費用は掘削地域や掘削の規模によって差があるものの、最低でも総投資額は数千万\$（数十億円）程度必要とされており、投資家を募るにはリスク評価が必須となってくる。

第二の理由は、稼働状態になってもハリケーンの襲来等、設置されている自然環境が過酷であり、しばしばリグが破壊されることにある。海底からの石油や天然ガスの生産にとって人命や設備の損害の見積もりは必須である。

第三の理由は、海底油田・ガス田の開発ではこれまでも人的ミスから多くの大事故が発生しており、事故発生時の人命、自然環境への被害が甚大であったことにある。このため、リスク評価に基づく合理的な安全管理の重要性が広く認識され、原子力分野で研究されていたQRA（Quantified Risk Assessment）を海洋構造物へと適用するプロジェクトは、1970年代と比較的早くから開始された。とりわけPiper Alphaの事故が大きな影響を与えている。事故の概要とその後の原因追及について紹介する。

5.3 Piper Alphaの事故

1988年7月6日、北海油田の英国の固定式石油・ガス生産プラットフォームPiper Alphaにおいて大量のガスリークが発生して引火、爆発崩壊した。乗員229人中167人が死亡し、救助隊員2名も死亡した。

事故の原因究明のためLoad Cullen委員長の下、事故調査委員会が組織され、1990年に事故に関するレポート（Cullen Report⁶⁾が公表された。

レポートは2部構成で、第1部では事故の根本原因の追究・解明の結果として、①運用が悪い、②権限と責任が不明確、③設計変更が悪い、④緊急事態訓練を軽視していた、という4つの偶然が一度に重なり大事故に繋がったとした。第2部では今後の対策として106の勧告を行っているが、そのポイントは、①オペレータによる自律的安全管理体制の要求、②客観的安全性評価、の2点である。

Piper Alphaの事故は、「合理的で実行可能な安全投資は積極的に行うことが正しい経営方針である」ということを世界に示した。Cullen Reportは、そ

の後のHSE (Health, Safety and Environment) 活動の在り方とロジックに決定的な影響を与えた。

5.4 スイスチーズモデル

スイスチーズモデルとは、イギリスの心理学者 James Reasonが提唱したヒューマンエラーから事故・トラブルに至るモデルのことである。事故が想定される事象に対しては、いくつかの「防護壁 (エラーを防ぐ要素)」を設け、通常、この防護壁を何枚も重ねて立てることによって事故を防止する。しかし、図3に示すように、これらの防護壁にはそれぞれ脆弱な部分や連鎖的なエラーといった「穴」があいており、この穴が不幸にして一直線上に重なって次々通過してしまうと、事故に至る。この様に防護壁に穴があいていることをスライスしたスイスチーズの姿にたとえて提唱された。Piper Alphaの事故は4つの偶然が一度に重なるということから、典型的なスイスチーズモデルと考えられている。

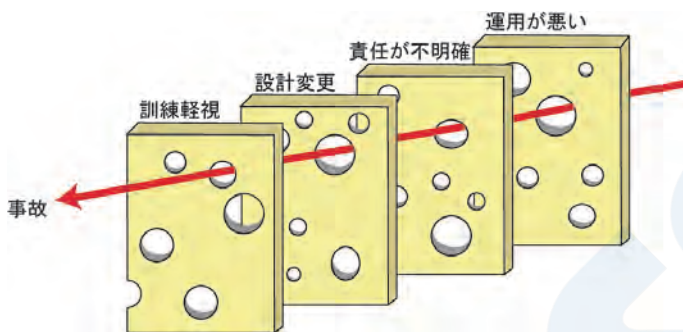


図3 スイスチーズモデルの概念

6. 労働安全とリスク

6.1 英国における労働安全法⁷⁾

産業革命の発祥の地である英国では、1802年、世界で最も早く労働者保護のための法律である工場法が整備された。しかし、時代の変化により産業技術の進歩に規制がついて行くのが困難になってきたため、Lord Robensが座長を務める委員会が安全衛生問題 (主として行政面) について討議を重ね、1972年にRobens Report⁸⁾が発表された。Robens Reportは19章からなる膨大なものであるが、その主張のいくつかを紹介する。

①法律や監督による安全衛生向上への疑問を提示した。安全衛生向上のための法律がたくさんあり過ぎ、本来の目的達成にとって逆効果とさえ言える。社会の進歩につれて次々に新しい法律をつくり、時代遅れとなった法律を改訂していかなければならない。
②労働安全衛生行政が細分化 (当時の英国では関係する機関が5省庁、7監督機関に分かれていた) され過ぎている。責任が明確で無く、迅速な施策がと

れなくなっている。

③これらの問題意識により、法律・監督中心から自主対応への移行および行政機関の統一を提言した。

Robens Reportに基づき、英国では1974年に新しい労働安全衛生法 Health and Safety at Work, etc. Act (1974 HSW法) が制定され、英国健康安全庁 HSEが設立された。安全衛生庁はその後数十年をかけて労働安全衛生に関する法律の近代化を推し進めた。

6.2 Safety Case法の基本的考え方

1990年のCullen Reportの106の勧告を受け、英国安全衛生庁は石油ガス生産を行うオペレータに対し、Safety Caseとよばれる文書の作成、提出を義務付けた。これが元となってSafety Case法が制定され、その実践がHSE活動へと繋がった。HSE活動では、産業技術の複雑化から、法令だけでなすべき事項を全て網羅することは不可能であり、各々の企業における重要課題を自ら発見・解決できる自律思考型経営を要求されている。

6.3 Safety Case法

Safety Case法は、英国領海・大陸棚で操業する海洋構造物での重大事故・災害のリスクを低減させることを狙いとするOffshore Installations Regulationsで、「客観的な安全性評価」と「自律的な安全管理体制」を要求している。英国安全衛生庁が書類審査を行い、3年毎の更新が必要である。

Safety Case法は、従来 of 規則遵守型の法律ではなく、自ら安全目標を定めそれが満たされることを証明する目標設定型の法律である。費用対効果を考慮して実現可能なレベルで可能な限りリスクを低減させるというALARPの概念を土台としている。

Safety Caseとは、テスト結果や検証結果をエビデンスとして、各企業がシステムの安全性を自ら議論し、それをシステム認証者や利用者などに保証する、あるいは確信させるためのドキュメントと言える。

実際のSafety Caseの記述は大きく3段階からなる。

- ① FD (Facility Description) システムの記述
- ② FSA (Formal Safety Assessment) 本体
- ③ SMS (Safety Management System)

また、Safety Caseは設計・操業・廃棄のLife Cycleを通して必要であり、それぞれの段階のSafety Caseが必要となる。

6.4 拡大するHSE活動

オイルメジャーによる自主的な組織 OCIMF (The Oil Companies International Marine Forum) は、Safety Case法を全面的かつ協力的に受け入れ、その後世界中で海洋構造物を対象にHSE活動を実

践し、その考えを普及していった。

Safety Case法の成立を踏まえて旧E&P Forum（現OGP International Association of Oil and Gas Producers：国際石油及びガス生産者協会）は世界初のオフショアHSEマネジメントシステムのガイドラインであるGuideline for the development and application of Health, Safety and Environment Systemを発表した。このガイドラインの骨子は次の通りである。リスクアセスメントを基にしたPDCAサイクルを回す。合理的かつ実行可能なリスク低減策は全て採用する。英国安全衛生庁の取り組みを側面から支援するように、オフショア分野でのHSE活動の確立・実践・普及に協力する。また、オイルメジャーは海洋構造物だけでなく、LNGタンカーや石油タンカーといった関係する商船の運航・建造に対してもHSE活動の実践を求めている。

こうしたオイルメジャーによる全面的な後押しを受けて、Safety Case法とその実践としてのHSE活動は単なる英国内のローカルな制度から、デファクトスタンダードとして世界中で実践される活動へと大きく飛躍したのである。

7. 船舶分野におけるリスク

7.1 FSA (Formal Safety Assessment)

船舶については、1912年のタイタニック号沈没事故を契機に世界統一規格であるSOLAS条約が締結され、その後30回以上にわたる改正を経て、現在に至っている。従って、国際航路を航行する船舶の安全管理の基本的枠組みは、IMOで議論され、船級協会規則や各種標準に反映される。

しかし、IMOでの規則改正の議論は重大事故が発生したことを受けて行われることが多く、事故直後の状況から不必要に過剰なものとなりがちである。また、自国を有利にしようという多分に政治的な提案も横行したことから、より合理的なルール制定方法としてリスク評価の考え方に基づいたFSA (Formal Safety Assessment) が導入されている。

FSAは、1993年のIMO/MSC62（第62回海上安全委員会）において英国が提案したもので、その後の議論および試験的な適用の積み重ねに基づき、暫定ガイドラインが修正され、2001年のMSC74において最終的なFSAガイドラインが承認された。FSAは構造化され、客観性とトレーサビリティを有する、包括的で合理的な安全性評価手法である。IMOにおける規則制定をより合理的なものとするために、特殊な提案や施行を少なくし、極端に政治的な議論を抑えることを目的としている。IMOで

は、全ての提案にFSAの適用を義務づけているわけではないが、最近は多くの安全基準の改正がFSAを適用して提案され審議されている。FSAは手順や検証の複雑さに難があるものの、FSAを用いた提案は年々増加している。

7.2 GBS (Goal-Based Standards)

1997年のナホトカ号の事故では、重油約6,200トンが日本海に流出し、沿岸域に大きな被害をもたらした。これ以後も、老朽化したタンカーの重大事故が相次ぎ、1999年のエリカ号事故ではフランス沖に重油約10,000トン以上が流出、2002年のプレステイジ号事故ではスペイン沖に積荷油約77,000トンが流出した。

これらの事故は、直接的にはシングルハルトンカーのフェーズアウト促進（2010年まで）、シングルハルトンカーによる重質油の輸送禁止、特別敏感海域（PSSA）の設定等の施策に繋がったが、間接的には、被害国である欧州委員会（EU諸国）の主張が強くなり、これまでの規則を策定してきたIMOや老朽船を承認した船級協会とその団体であるIACS（International Association of Classification Society）への信頼性が揺らぐこととなった。IMO/IACSは信頼と主体性を回復するために、事故後の対応から事前リスク回避に力点を移した。IMOは規則の目的・安全レベル・機能要件を明示するため目標指向型基準GBS（Goal-Based Standards）体系を導入し、IACSは合理的で透明性のある船舶構造の統一規則としてCSR（Common Structural Rules）の導入を図ることとなった。

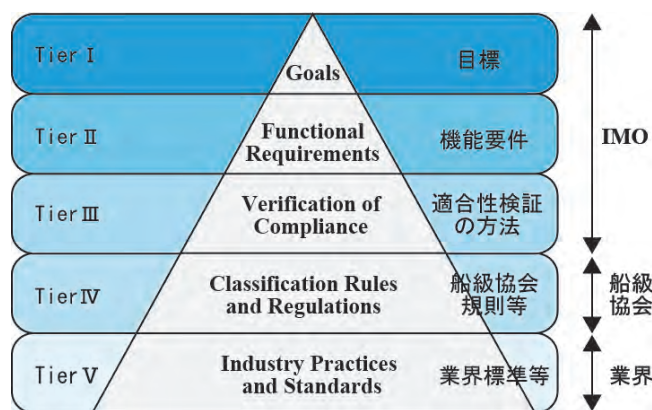


図4 GBSの構成

この内、GBSは図4に示す様なTier I～Tier Vのピラミッド型をしており、許容できるリスクレベルを目標として先に定めて、ピラミッドの下に向かって順番に、それに対する機能要件から規則等を定めていくという点で、FSAとは異なる安全評価体型となっている。

8. 海事分野でのリスクアセスメントの展開

8.1 環境FSA

安全に比べると、環境は加害者も被害額も明確でないため、リスクアセスメントは導入しにくいと考えられてきた。しかし、安全に関するFSAが成果を上げてきたことで、海洋環境保全に関する新基準導入に際してもFSAの考え方を活用し、EREC (Environmental Risk Evaluation Criteria) をFSAガイドラインに盛り込むことが検討された。EUの共同研究プロジェクトSAFEDORは、油流出を対象として、CATS (Cost of Averting a Tonne of Oil Spilt), つまり、「1トンの油流出を防ぐために実施するRCOとして拠出する金額」という項目を導入し、式(3)の様な評価基準を提案した。

$$\Delta C/\Delta R = \text{CATS} < \text{CATS}_{\text{thr}} \quad (3)$$

ΔC : RCOに導入による追加コスト (US\$)

ΔR : RCOによる油濁リスク減少効果

CATS_{thr} : 任意のRCOの費用対効果を判定するための閾値

当初、SAFEDORでは閾値 CATS_{thr} として6万米ドル/トンの一定値を提案した。それに対して、日本等が国際油濁補償基金 (IOPCF) の1970~2005年までの油濁事故データに基づき、油濁量 (W) と油濁損害金 (C) に関する回帰分析を実施し、 C/W は一定値ではなく、Wの関数であり、Wが大きくなると C/W が小さくなることを示し、回帰分析に基づく関数型 CATS_{thr} を提案して、IMOで採用された。海洋環境保全にFSAを導入しようとする動きは、今のところ油流出のみに留まっているが、影響が大きいだけに今後の動きが注目される。

8.2 RBM (Risk Based Maintenance)

RBMは、設備の老朽化や異常、故障のリスクを評価して、評価結果に基づいてメンテナンス・検査計画を作成する考え方である。「故障が起こったときの影響の大きさ」と「故障の起こりやすさ」から算出した「リスク」を評価し、メンテナンスの合理的判断とする手法であり、近年、米国でメンテナンス対象施設が増加して対処不可能になってきたことから、インフラ整備等に導入されている。メジャー系石油プラントでも利用が開始されており、API (米国石油協会) やASME (米国機械学会) が普及を推進している。我が国でも洋上石油備蓄基地のメンテナンス等にこの考え方を利用するのは有意義であると考えられるが、まだ導入は予定されていない。

9. おわりに

本稿では、リスクを明確にし、安全を実現するための手段として、リスクアセスメントを取り上げてきた。しかし、安全を脅かす一番の要因はヒューマンファクターである。人間にはエラーを起こす特性が備わっているということである。ヒューマンファクター事故を防ぐ方法としては、フルプルーフやフェールセーフ、未然防止や深層防護が研究されているが、その1つの解が安全文化の醸成と考えられる。安全文化とは、組織のトップから現場の一人一人まで安全最優先の意識をもち、組織として安全確保に向けて取り組んでいる状態であるが、これもまた数値化が難しい。リスクアセスメントをヒューマンファクター事故の防止に活用することが、未来への大きい課題である。

参考文献

- 1) 2014年版ISO/IECガイド51
- 2) JIS Z 8115 ディペンダビリティ (信頼性) 用語
- 3) 向殿政男, 安全の理念, 学術の動向 (2009)
- 4) 日本リスク研究学会編, リスク学辞典, 丸善出版 (2019)
- 5) Consolidated text of the Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process (MSC/Circ. 1023-MEPC/Circ.392), MSC 83/INF.2 (2007).
- 6) Lord Cullen, The Public Inquiry into the Piper Alpha Disaster (1990).
- 7) ClassNK, HSEマネジメントシステム導入のためのガイドライン (2015).
- 8) Lord Robens, Safety and Health at Work (1972).

自動運航船の社会実装を支える新しい仕組みの必要性について

— Vulnerabilityデータベースの構築とリスク評価への活用法検討 —

山田 智章*, 梶田 憲之**

1. はじめに

自動運航船の開発が世界的に進んでいる。例えば、日本財団事業の無人運航船プロジェクト「MEGURI2040」¹⁾では、5つのコンソーシアムによって、観光船/内航コンテナ船/大型フェリーによる実際の商業航路での実証実験が実施された。船員のシャドーイングによるBerth to Berthの自動運航も実施され、商業活動を行っている他船や漁船を自動で避航することにも成功した。

技術開発と同時に国際的な規則開発の動きも活発化しており、国際海事機関（IMO）の第105回海上安全委員会（MSC 105）では、2024年内に自動運航船に関する非強制の目標指向型のガイドラインを作成した上で、新規強制要件（MASS Code）を2028年1月1日から発効することを目標とした作業計画が合意されている。

自動運航船において、既存船の支援ツール以上の使い方（省人化、無人化）をする場合には、自動操船システムに対する安全性評価を適切に行うことが重要であり、そのための手法としてリスク評価が注目されている。実際に、IMOの暫定ガイドライン²⁾やいくつかの旗国から発行されているガイドライン等³⁻⁵⁾でもリスク評価の実施が明記されている。さらに、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おり⁶⁻⁹⁾、その全てにおいてリスク評価が重要視されている。

自動運航船のリスク評価を行う際、実績のない新技術のリスクをどのようにして網羅的に抽出し、どのようにして正確に見積もるかが大きなポイントとなる。実証実験等を通じて経験と知見を蓄積していくしかないが、「使ってみて初めてわかる」といった部分はどうしても残る。自動運航船の社会実装を考えるにあたり、ある程度の不完全性を許容した上で、運用の在り方を考えることが求められる。徹底した事前検証を行うことは大前提としつつ、実装後においても、自動運航船の安全性に関連する知見をアップデートし、安全評価を改善していくといったプロセスの構築が必要である。

船級協会のような規則開発・安全評価側にも、ロバストな規則を作ることを原則としつつ¹⁰⁾、実績のない新技術に対しては、作成した規則や基準には不完全性＝脆弱性（以下、Vulnerability¹¹⁾）が残っている、という視点を持ち、ライフサイクルにおいて、柔軟に見直しを図っていくといった姿勢が重要である。そのためには、「使ってみて初めてわかった情報（特に不具合事例）」を、規則開発・安全評価側にタイムリーに報告してもらうための仕組みが必要となる。また、それらの情報を公的機関がデータベース化し、技術開発者側のみならず、規則開発・安全評価側へ適切に開示し、いわゆるPDCAサイクルを構築することで、より自動運航船の安全性を向上させることが期待できる。

2. 脆弱性（Vulnerability）の考え方

2.1 脆弱性（Vulnerability）とは

Vulnerabilityという言葉は、日常生活でも、例えば、パソコン等の情報セキュリティ関連で耳にすることも多い。総務省の「国民のための情報セキュリティサイト」¹²⁾に情報セキュリティにおける脆弱性についてわかりやすい説明が記載されているが、「脆弱性は完全に対策を施すことが困難であり、次々と新たな脆弱性が発見されているのが現状」「一度脆弱性を塞いでも、また新たな脆弱性が発見される可能性があるため、常にOSやソフトウェアの更新情報を収集して、できる限り迅速にアップデートを行わなければならない」といった記述は、本稿で着目したいVulnerabilityの特徴である。

Vulnerabilityは、多くのセキュリティ関連文書を発行しているNIST（National Institute of Standards and Technology：米国国立標準技術研究所）でも採用されている考え方であり、例えば、Frame work for Critical Infrastructure Cybersecurity Version 1.1（2018年04月）¹³⁾においては、リスクを判断する際にVulnerabilityを考慮するように記載がなされるとともに、Vulnerability情報の開示サイクルについても言及がなされている。また、SP-800シリーズ¹⁴⁾

* 技術研究所

** デジタルトランスフォーメーションセンター

では、Vulnerability情報の再利用についても要求がなされており、Vulnerabilityの情報は、国有Vulnerabilityデータベース（NVD）を含む、公共および民間の様々なソースから入手できるようになっている点は大変興味深い。すなわち、NISTでは情報セキュリティは脆弱であるが故に、必ず脆弱な部分が破られることを前提としており、破られた場合の対応までがセキュリティの範囲となっている。

2.2 安全と脆弱性 (Vulnerability)

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。安全には、本質安全と機能安全があるが、システムが複雑化してくるに伴い、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機能安全の考え方が、様々な業界で取り入れられている。自動運航船においても、機能安全の考え方にに基づき、安全機能を駆使して安全を確保することになる¹⁵⁾。

この安全機能にVulnerabilityが残っていると大きなリスクとなるため、この安全機能のVulnerabilityに関する情報を迅速かつ的確に収集する必要がある。

3. 他業界での適用事例

3.1 自動運転車に関する米国カリフォルニア州の事例

米国では州政府が州内の道路行政を管轄しており、自動運転の公道試験についても、州政府の当局が許可を担当している。カリフォルニア州では、自動運転の導入推進の一環として、2018年4月2日に自動運転車のテストに関する規則（Article 3.7-Testing of Autonomous Vehicle）を改正（最新版は2022年4月13日発効¹⁶⁾）。以下が自動運転車の開発者に対して義務付けられている¹⁷⁾。

- ① 自動運転車の開発者が、車両が制御可能な、現実に近い環境の中でテストしたと証明する。
- ② 州・地方自治体の車両運行関連規則に則って、道路上の状況を検知し、対応できることを証明する。
- ③ 自動運転車のテストは、実施する地域の自治体にその計画を通知した上で、テスト状況は双方向通信リンクで監視する。
- ④ 事故発生時や自動運転モード解除が必要になったケースは州に報告する。

本稿では上記④に着目したい。公道試験の段階から、衝突事故発生時には10日以内の報告義務が課されており（§ 227.48参照¹⁶⁾）、事故を起こしていない場合においても、自動運転モードを解除しな

ければならなかったケースを年次報告書としてまとめ、カリフォルニア州に提出しなければならないことになっている（§ 227.50参照¹⁶⁾）。加えて、特定された安全に不当なリスクを及ぼしかねない欠陥についても、報告義務が課されている（3.8. Deployment of Autonomous Vehicle § 228.12参照¹⁸⁾）。このように、データを集める仕組みを試験実施の認可を与える段階から取り入れている点は大いに参考とすべきところである。

カリフォルニア州では、自動運転デリバリーの試験運用¹⁹⁾やロボタクシーの商業化²⁰⁾が始まっており、自動運転車の分野で先進的な取り組みを前進させている。この取り組みを支えているのは前述した規則であり、規則開発・安全評価側へ提出しにくいように思いがちな不具合データを規則開発・安全評価側とタイムリーに共有することの重要性を示していることと捉えることができるのかもしれない。

3.2 民間航空業界の事例

第二次大戦後に急速な発展を遂げた民間航空機業界は「事故」を糧としてルールを改正し、安全を向上してきたあまり幸福ではない歴史を持つ。

民間航空業界は海事産業と同様に国連の下部組織であるICAO（International Civil Aviation Organization）が国際基準を制定し、加盟各国はこのルールに準拠した国内法を整備する義務を負う仕組みを導入している。（ただし、船級協会のような第三者組織は存在しない。）

このルールは1944年に採択された国際民間航空条約（通称シカゴ条約）の附属書（以下、ANNEX）として制定され、航空機の設計・製造・運航等に係る分野が1つの条約ANNEXとして網羅されているのが大きな特徴と言える。現在ANNEXは19種類整備されている。

ANNEX 13²¹⁾は“Aircraft Accident and Incident Investigation”（航空機事故及びインシデント調査）が定義されており、そのCHAPTER 3. GENERAL OBJECTIVE OF THE INVESTIGATIONには、“3.1 The sole objective of the investigation of accident or incident shall be the prevention of accidents and incidents. It is not the purpose of this activity to apportion blame or liability”と書かれている。

これは、航空機において事故やインシデントは不可避の事象であり、制定した規制が完全ではないことを認識し、実際に発生した事故やインシデントを教訓として次に同じ原因の事故やインシデントを発生させない、という思想を表したものであると言える。事実、米国では航空事故調査のために正確な事

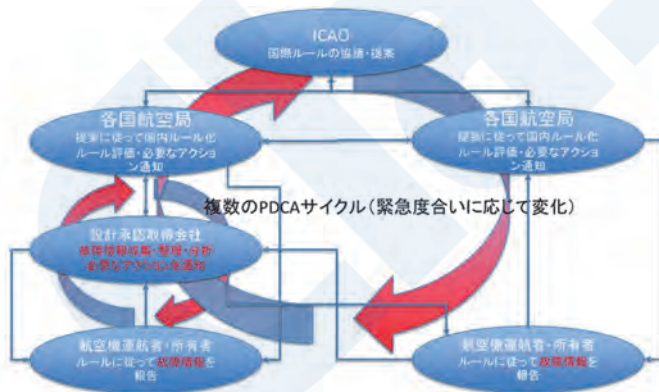
情報聴取を行えるようにするために、故意・悪質な過失でない限り刑事罰には問わない法律が制定されている。

この精神を元に民間航空機業界では業界の各ステークホルダー（各国の政府当局を含む）に対し、事故やインシデントに留まらず、様々な不具合報告・公開・分析／解析・対策立案の制度が導入されており、日々、航空安全の改善業務が行われる仕組みが整えられている。当然、情報の収集・報告のみならず、分析／解析／対策立案の役割分担（RAA：Responsibility, Authority, Accountability）も明確に規定されている。分析された結果に基づき様々な対策が講じられる。例えば、規制の変更、ハードウェアの改修、点検検査の追加等が代表的なものである。原因が運航している他の航空機に内在していることが判明した場合、強制的に対策を講じる制度が整えられていることも大きな特徴である。

この安全活動の重要な部分は、

- (1) 事故・インシデントは必ず発生し、対策を講じることで安全性の向上につながる。
- (2) 対策を講じるためには事故・インシデントを代表として様々な不具合情報を収集・公開することの2点に集約でき、本論文のテーマであるVulnerabilityが安全性向上に非常に有効であることを示す例であろう。

図1に民間航空機業界のVulnerabilityをベースとしたPDCAサイクルの概要を示すので参考にできれば幸いである。



ICAO: International Civil Aviation Organization

図1 民間航空機業界のVulnerabilityをベースとしたPDCAサイクルの概要

4. 自動運航船への応用

4.1 脆弱性（Vulnerability）データベースの構築

前述した通り、ある程度の不完全性を受け入れた上で、運用の在り方を考える。新しい技術と向き合っていくためには必要な考え方であり、それを社会に受容してもらえるための仕組みを整えなければならない。Vulnerabilityに関する事例を収集し、データベース化し、それを安全性評価の精度向上に役立てる、といった仕組みは、他業界では既に取り入れられている手法であり、自動運航船においても有効な手法であると考えられる。

自動運航船関連技術を対象としたVulnerabilityデータベースの構築にあたり、その分類・収集方法等の整理を行う必要があるが、Vulnerabilityは技術成熟度が上がってくれば、減少していくといった性質を持っている。そこで、Technology StatusとApplication Area²²⁾の2軸でVulnerabilityのレベル分けを行い、そのレベルに応じた報告頻度を設定する、といったことを提案したい。表1や表2はあくまでも一例であるが、社会実装時の技術成熟度に応じたレベル分けと報告頻度を設定しつつ、技術成熟度の向上に応じて定期的に見直しを行っていくといったことも考えていく必要があるだろう。

表1 脆弱性（Vulnerability）のレベル分けの例

		Technology Status		
		Proven	Limited field history	New or unproven
Application Area		SOLAS mandatory	On-shore ISO/IEC	Others
Known	On-market products	1	2	3
Unknown	On-market products	2	3	4
New	Development / Update	3	4	5

表2 脆弱性（Vulnerability）の報告頻度の例

	Level of Vulnerability				
	1	2	3	4	5
A	Immediately				
B	Semi-annually	Quarterly			Monthly
C	Annually	Semi-annually	Quarterly	Monthly	

- A. Defects that caused an accident
- B. Defects that caused disengagement of autonomous mode
- C. Other defects found during operation

4.2 リスク評価での活用

自動運航船の実証事業においてもリスク評価が実施されており、既存技術との差分を検証しながら新技術そのものが有しているリスクやそれを船舶へ搭載したときのリスクについて分析を行い、自動運航船としての安全性の評価を行っている。しかしながら、未経験の技術に対し、机上検証の段階において全てのハザードを抽出するとともに、それらに起因するリスクを正確に見積もることは非常に難しい。そのため、実証実験において設定されている安全マージンの大きさと合わせて評価しているのが現状である。

一方で、真に社会実装を目指すためには、この安全マージンを最適化する必要がある。この点において、Vulnerabilityの考え方の取り入れは1つの選択肢になると考えている。例えば、Vulnerabilityデータベースを活用することで、常に最新の情報に基づいたリスク評価が可能となる。これにより、リスクのすり抜けを防ぐとともに、過度な安全対策の防止（安全マージンの合理化）につながる。

4.3 PDCAサイクルの構築と徹底

開発フェーズにおいては、実証実験の段階から、故障例やヒヤリハットといった情報や経験を規則開発・安全評価側と共有することで、技術認証時のすり抜けを防止する。運用フェーズにおいては、実績の少ない新技術は、使ってみて初めてわかることがあることを鑑み、ユーザーである船員からのフィードバックを、技術開発、規則開発、安全評価のそれぞれに適切に行きわたらせることで、技術、規則、評価それぞれの改善が行われることになる。Vulnerabilityデータベースを構築し、PDCAサイクルを適切に回していくことで、自動運航船の安全性が向上していくことにつながる。

Vulnerabilityデータベースを充実させる。技術開発、規則開発、安全評価のそれぞれの立場からVulnerabilityをベースとしたPDCAサイクルを構築する。そして、このPDCAサイクルを効果的に回し続ける。ハードウェアの故障やソフトウェアの不具合、オペレーション&マネジメントの問題等が複雑に絡み合ってくる自動運航船においては、こういった仕組みが必要と考える。

5. さいごに

自動運航船の社会実装が現実味を帯びてきており、従来の枠を越えた、真に新しい技術/ソリューションの社会実装を支える新しい仕組み（＝完全無欠ではない規制や制度を補完する仕組み）を考える時期に来ている。機能安全やシステムズエンジニアリン

グといった海事業界にとっては新しい考え方も定着させていく必要がある。その一つの手法として、本論文ではVulnerabilityの考え方を提案した。

新しい考え方を定着させるためには、業界内で進め方と役割分担を整理しなければならない。誰が旗を振るのか、報告義務を課す場合はどのような仕組みとするのか、Vulnerabilityデータベースをどこに構築するか等、業界内でしっかりと議論を行う場が必要である。この点において、中立的な立場である船級として担うべき役割は大きいと自認している。業界での議論が活性化するよう、働きかけていきたい。

謝辞

本稿の執筆にあたり、国立大学法人東京海洋大学清水悦郎教授並びに梅田綾子氏より大変有益な助言を頂きました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本財団：無人運航船プロジェクト「MEGURI2040」
<https://www.nippon-foundation.or.jp/what/projects/meguri2040>
- 2) IMO MSC.1/Circ.1604 INTERIM GUIDELINES FOR MASS TRIALS, 2019.
- 3) 国土交通省海事局：自動運航船の安全ガイドライン, 2022.
- 4) VT MIS : EU OPERATIONAL GUIDELINES FOR SAFE, SECURE AND SUSTAINABLE TRIALS OF MARITIME AUTONOMOUS SURFACE SHIPS (MASS), 2020.
- 5) Norwegian Maritime Authority : Guidance in connection with the construction or installation of automated functionality aimed at performing unmanned or partially unmanned operations (No. RSV 12-2020), 2020.3) ClassNK, "DIRECTORY"
- 6) 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.
- 7) DNVGL : Autonomous and remotely operated ships, DNVGL-CG-0264, 2018.
- 8) Bureau Veritas : Guidelines for Autonomous Shipping, Guidance Note NI 641 DT R01 E, 2019.
- 9) ABS : ABS advisory on autonomous functionality, 2020.

- 10) IMO Resolution A.1103(29) : PRINCIPLES TO BE CONSIDERED WHEN DRAFTING IMO INSTRUMENTS
- 11) ISO 31073:2022, Risk management - Vocabulary
- 12) 総務省：国民のための情報セキュリティサイト
https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/security/basic/risk/11.html
- 13) National Institute of Standards and Technology : Frame work for Critical Infrastructure Cybersecurity Version 1.1 (2018年04月)
<https://www.ipa.go.jp/files/000071204.pdf>
- 14) National Institute of Standards and Technology : Computer Security Resource Centre
<https://csrc.nist.gov/publications/sp>
- 15) 山田智章：自動運航船関連技術に対する安全性評価について，ClassNK技報No.3, pp.55-63, 2021.
- 16) California Department of Motor Vehicles (DMV) : Article 3.7. Testing of Autonomous Vehicles
<https://www.dmv.ca.gov/portal/file/adopted-regulatory-text-pdf/>
- 17) 総務省：海外ニュース（2018年5月1日号）
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/02tsushin02_04000042.html
- 18) California Department of Motor Vehicles (DMV) : Article 3.8. Deployment of Autonomous Vehicles
<https://www.dmv.ca.gov/portal/file/adopted-regulatory-text-pdf/>
- 19) JETRO：ビジネス短信「米ウーバーイーツ，ロサンゼルス近郊で自動運転デリバリーを試験的に開始」（2022年5月24日）
<https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/05/578ce578db316856.html>
- 20) JETRO：ビジネス短信「米クルーズ，カリフォルニア州内で初の無人による自動運転配車サービスを開始，商業展開へ」（2022年6月7日）
<https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/06/5999353360945f70.html>
- 21) International Civil Aviation Organization: Annex 13 to the Convention on International Civil Aviation, “Aircraft Accident and Incident Investigation”
- 22) IMO MSC.1/Circ.1455 “GUIDELINES FOR THE APPROVAL OF ALTERNATIVES AND EQUIVALENTS AS PROVIDED FOR IN VARIOUS IMO INSTRUMENTS”, Annex, page 9, Table 1: Categorization of new technology

リスクベース設計のための基礎と展開

伊藤 誠*

1. はじめに

船舶や航空機といった機械システムの設計において、安全性は最優先で考慮されるべきものである。一方で、経済性を無視した設計は現実的ではなく、安全性を確保した上で如何に競争力の高いモノづくりを行うのが重要である。そのためには、新しい技術や様式を取り入れることが可能な、設計自由度の高い規則を確立することが求められる。特に新コンセプト船の設計では、重要と考えられる。

設計自由度の高い設計に対する安全性を担保するには、リスクベース設計の考え方が有効である。これは、信頼性設計を土台とし、リスクを指標として機能の許容値（構造設計であれば破損確率の上限値など）を設定するものである。リスクを指標とすることで、評価基準が普遍的かつ透明性が高くなる。また、新コンセプト船で起こりうる未知の事象への対策が可能となることが期待される。

本稿では、リスクベース設計の基礎として、構造信頼性理論を解説し、次に最適設計問題を題材としてリスクベース設計の特徴を説明する。その後、リスクベース設計の展開として、構造規則への適用を考え、IMOのリスクベース構造規則開発ガイドラインであるGBS-SLA (Goal Based Standards-Safety Level Approach) interim guideline²⁾を紹介した後、疲労強度クライテリアに適用する方法と構造規則開発における技術的課題について考察する。

2. 構造信頼性理論

2.1 概説

JIS規格³⁾によれば、信頼性とは「アイテムが、与えられた条件の下で、与えられた期間、故障せずに、要求どおりに遂行できる能力」と定義されている。信頼性工学では、信頼性を定量的に把握することでシステムの設計や保全に役立てることを目指している。具体的には、信頼度 (reliability) と呼ばれる「アイテムが故障しない確率」を用いて評価する。

構造信頼性とは、構造が持つ強度的機能に対する

信頼性のことである。構造の場合、強度的機能の故障は破損と考えられるため、構造信頼性は「構造が破損しない性質」と言い換えられる。一般的に、構造信頼性理論では、構造が破損する確率（破損確率：probability of failure）が用いられる。定義より、破損確率 P_f と信頼度 R の関係は、

$$P_f = 1 - R \quad (1)$$

で与えられる。ある破損モードに対する被害度 (severity) が C_D で与えられたとすると、定量的なリスクは以下の式で与えられる。

$$(\text{Risk}) = C_D \times P_f \quad (2)$$

次節以降で、荷重・強度モデルと限界状態関数で表現された場合のそれぞれに対する、破損確率の計算方法を構造信頼性に関する文献⁴⁾⁷⁾を基に説明する。

2.2 荷重・強度モデルによる破損確率の評価

構造信頼性理論では、荷重 x_s と強度 x_r はそれぞれ不確定性 (uncertainty) を有すると考える。そこで、それぞれを独立な確率変数であるとする。すると、破損確率は以下のように表現できる。

$$P_f = P[x_r \leq x_s] \quad (3)$$

次に、破損確率の計算方法を考える。荷重がある実現値 s をとる場合を考える。破損条件は、強度 x_r がこれを下回るときである。よって、破損確率は次式のようになる。

$$P_f = \int_0^s f_R(x_r) dx_r = F_R(s) \quad (4)$$

ただし、強度の確率密度関数と累積分布関数をそれぞれ $f_R(\cdot)$ 、 $F_R(\cdot)$ としている。荷重の実現値が s となる確率は、荷重の確率密度関数を $f_s(\cdot)$ とすれば、 $f_s(s)ds$ と表されるので、すべての荷重の実現値で積分することで破損確率が以下のように得られる。

* 技術研究所

$$P_f = \int_0^{\infty} F_R(x_s) f_S(x_s) dx_s \quad (5)$$

次に、典型的な例として荷重・強度が以下に示す正規分布に従う場合を考える。

$$x_s \sim N(\mu_s, \sigma_s^2) \quad (6A)$$

$$x_r \sim N(\mu_r, \sigma_r^2) \quad (6B)$$

荷重と強度の差である安全余裕 (safety margin) x_m は、正規分布の差もまた正規分布に従うことから、次のように与えられる。

$$x_m \sim N(\mu_m, \sigma_m^2) \quad (7A)$$

$$\mu_m = \mu_r - \mu_s \quad (7B)$$

$$\sigma_m^2 = \sigma_r^2 + \sigma_s^2 \quad (7C)$$

破損条件は、安全余裕が負となることであるから、破損確率は式(7)より次のように計算できる。

$$\begin{aligned} P_f &= P[x_m \leq 0] = P\left[\frac{x_m - \mu_m}{\sigma_m} \leq -\frac{\mu_m}{\sigma_m}\right] \\ &= \Phi\left(-\frac{\mu_m}{\sigma_m}\right) = \Phi(-\beta) \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規累積分布関数、 β は信頼性指標 (reliability index) と呼ばれる破損確率に対応する指標である。式(7)と式(8)を用いれば、以下のように破損確率を計算できる。また、参考として、信頼性指標の値と破損確率の関係を表1に示す。

$$P_f = \Phi\left(-\frac{\mu_r - \mu_s}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}}\right) \quad (9)$$

表1 信頼性指標と破損確率の関係

Reliability index	Probability of failure
1.0	0.159
2.0	2.27×10^{-2}
3.0	1.35×10^{-3}
4.0	3.17×10^{-5}

2.3 限界状態関数による破損確率の計算

一般的な構造物に対する破損確率を計算する際は、寸法、材料物性、使用環境といった複数のパラメータによって破損条件が表現されることが多い。このような場合、限界状態関数 (limit state function) を用いて破損条件を表現するとよい。具体的には、不確定性を有するパラメータ (確率変数) のベクトル

ルを $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_{n_r})^T$ 、確定的なパラメータのベクトル

トルを $\mathbf{z} = (z_1, \dots, z_{n_d})^T$ として以下のように表す。

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \begin{cases} > 0 & \text{safe} \\ = 0 & \text{limit state} \\ < 0 & \text{failure} \end{cases} \quad (10)$$

このとき、破損確率は \mathbf{x} の結合確率密度関数 $f_{\mathbf{x}}(\cdot)$ を用いて次のように計算できる。

$$P_f = \int_{g(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \leq 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (11)$$

一般的に式(11)を解析的に解くことは困難であるため、様々な近似解法が研究されてきている。本稿では、数値シミュレーションであるモンテカルロ法 (Monte Carlo method: MC) と限界状態関数の近似によって評価する一次信頼性法 (First Order Reliability Method: FORM) と二次信頼性法 (Second Order Reliability Method: SORM) について説明する。なお、以下の議論において確定的なパラメータ \mathbf{z} の表記は省略する。

2.3.1 モンテカルロ法

モンテカルロ法では、確率変数が従う分布から乱数を発生させることによって、疑似的に確率現象を再現し、破損確率を近似的に計算する。一般的に構造信頼性で対象とする破損確率は非常に小さい値であるため、精度良く求めるためには非常に多くの乱数が必要である。

はじめに、限界状態関数の値に対応した指標関数 (index function) を次のように定義する。

$$I(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & g(\mathbf{x}) \leq 0 \\ 0, & g(\mathbf{x}) > 0 \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 $I(\mathbf{x})$ の期待値を定義から計算すると、

$$\begin{aligned} E[I(\mathbf{x})] &= \int I(\mathbf{x}) f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \\ &= \int_{g(\mathbf{x}) > 0} 0 \cdot f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} + \int_{g(\mathbf{x}) \leq 0} 1 \cdot f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \\ &= \int_{g(\mathbf{x}) \leq 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = P_f \end{aligned} \quad (13)$$

となり、破損確率と等しくなることがわかる。 $I(\mathbf{x})$ の期待値は、発生させた乱数のうち破損条件を満たすものの割合に等しい。よって、乱数全体 N 個のうち破損条件を満たしたものが N_f 個であったとすれば、破損確率の近似値 \hat{P}_f は次のように計算できる。

$$\hat{P}_f = \frac{N_f}{N} \quad (14)$$

ここで、破損確率の近似精度は N を大きくするほど向上することは明らかである。そのため、どの程度大きくすればよいかは近似精度の閾値によって決められる。一つの考え方として、破損確率の変動係数を用いる方法が知られている⁷⁾。

2.3.2 一次信頼性法 (FORM)

一次信頼性法とは、限界状態関数（一般的には非線形関数）をテイラー展開によって線形近似し、確率変数の期待値の線形性を利用して破損確率を計算する方法である。テイラー展開する点の位置によって関数形が変化するため、どの点周りで展開するのかが重要となるが、一次信頼性法では限界状態上の点でテイラー展開をすることで、信頼性指標の不変性を担保している。

以降の説明では、簡単のために確率変数 \mathbf{x} が全て独立な正規分布に従うとする。なお、この仮定が成り立たない場合には、確率変数 \mathbf{x} をRosenblatt変換すると独立な正規分布に近似することができ⁴⁾、同様の議論となる。

いま、確率変数 \mathbf{x} の平均と標準偏差を用いて標準正規化した確率変数を $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_{n_r})^T$ とすると、

$$u_i = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (i = 1, \dots, n_r) \quad (15)$$

である。また、これによって線形写像された限界状態関数を $G(\cdot)$ とする。

ここで、限界状態 (limit state) 面上でかつ原点からの距離が最短となるような点 \mathbf{u}^* を考える。この点をMost Probable Point (MPP) と呼ぶ。MPPを求めるためには、以下の最適化問題を解く必要がある。

$$\text{Min.: } \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{u} \quad (16A)$$

$$\text{s.t.: } G(\mathbf{u}) = 0 \quad (16B)$$

式(16)の最適化問題に対して、ラグランジュ未定乗数法⁸⁾を用いる。ラグランジュ乗数を λ とすれば、

MPPの必要条件が以下のように導ける。

$$\begin{aligned} \nabla(\mathbf{u}^T \cdot \mathbf{u}) + \lambda \nabla G(\mathbf{u}) &= 0 \\ \therefore \mathbf{u} &= -\frac{\lambda}{2} \nabla G(\mathbf{u}) \end{aligned} \quad (17)$$

これは、MPPの位置ベクトルと勾配方向ベクトルが正反対の向きであることを示している (図1)。

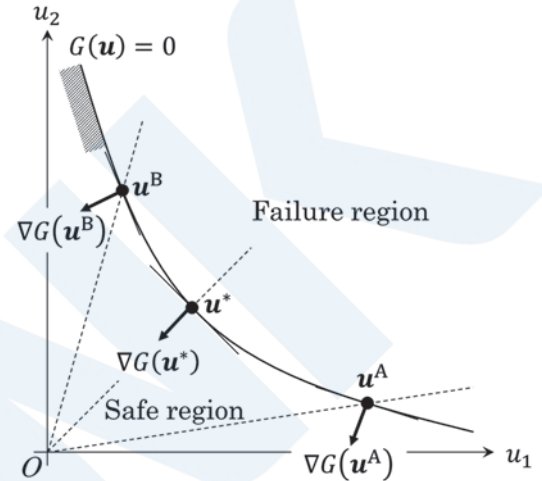


図1 位置ベクトルと勾配方向ベクトルの関係

次に、限界状態関数をMPP周りでテイラー展開して線形近似する。

$$G(\mathbf{u}) \approx G_l(\mathbf{u}) = \nabla^T G(\mathbf{u}) \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{u}^*) \quad (18)$$

線形近似された限界状態関数 $G_l(\mathbf{u})$ は、独立した確率変数の線形和であることから、期待値と分散が次のように求められる。

$$E[G_l(\mathbf{u})] = -\nabla^T G(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{u}^* \quad (19A)$$

$$\text{Var}[G_l(\mathbf{u})] = |\nabla G(\mathbf{u})|^2 \quad (19B)$$

式(8)を参考に破損確率を求めると、

$$\begin{aligned} P_f &\approx P[G_l(\mathbf{u}) \leq 0] = \Phi \left(-\frac{E[G_l(\mathbf{u})]}{\sqrt{\text{Var}[G_l(\mathbf{u})]}} \right) \\ &= \Phi \left(\frac{\nabla^T G(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{u}^*}{|\nabla G(\mathbf{u})|} \right) = \Phi(-\beta) \\ \therefore \beta &= -\frac{\nabla^T G(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{u}^*}{|\nabla G(\mathbf{u})|} \end{aligned} \quad (20)$$

ここで、式(17)で示したように、MPPの位置ベクトルと勾配方向ベクトルが正反対であることを利用すると、

$$\beta = -\frac{\nabla^T G(\mathbf{u})}{|\nabla G(\mathbf{u})|} \cdot \mathbf{u}^* = \left(-\frac{\nabla^T G(\mathbf{u})}{|\nabla G(\mathbf{u})|} \cdot \frac{\mathbf{u}^*}{|\mathbf{u}^*|} \right) \cdot |\mathbf{u}^*| = |\mathbf{u}^*| \quad (21)$$

となり、信頼性指標が原点からMPPまでの距離に等しいことが示される。つまり、一次信頼性法では、MPPを式(16)から導出し、原点からMPPまでの距離を信頼性指標とすれば破損確率が計算できる。なお、式(16)の最適化問題はラクビッツ・フィースラー法等の繰り返し計算が必要となる⁹⁾。

最後に、一次信頼性法の概略を図2に示す。この図のように、限界状態関数の勾配方向に軸を持つ一次元標準正規確率密度関数を用いて、一次信頼性法では破損確率を評価しているとみなせる。また、図に示す通り、限界状態関数の非線形性によって破損領域が変化するため、近似誤差が生じる。しかし、距離が遠いほど指数関数的に破損確率への影響が低下することを踏まえれば、近似誤差は無視できる程度と考えることができる。一方、計算精度の要求が高い場合（破損確率の近似誤差をより小さくする場合）には、次節で紹介する二次信頼性法のような限界状態関数の曲率を考慮した手法で計算することが望ましい。

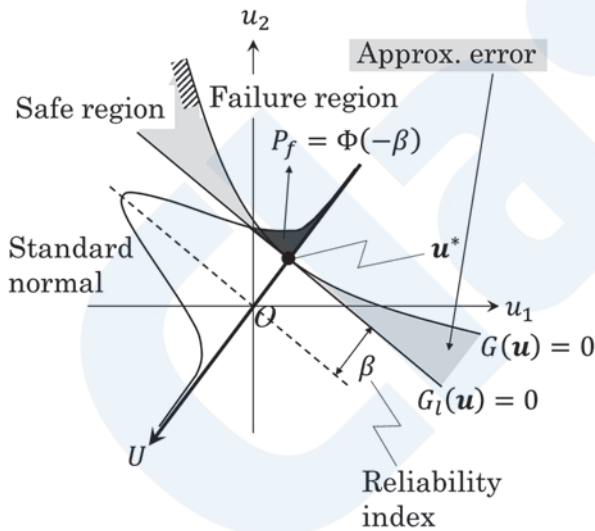


図2 一次信頼性法

2.3.3 二次信頼性法 (SORM)

二次信頼性法では、限界状態関数をテイラー展開によって二次近似する。これまでの研究でいくつかの方法が提案されているが、本稿では拙著⁹⁾の考え方を簡単に紹介する。

確率変数 \mathbf{x} が全て独立な正規分布に従うとの仮定の下、限界状態関数をMPP上でテイラー展開した

二次関数を考える。

$$g(\mathbf{x}) \approx g_s(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{b}^T \mathbf{x} + c \quad (22)$$

式(22)に対して標準正規化によって写像された限界状態関数を以下のように得たとする。

$$G_s(\mathbf{u}) = \mathbf{u}^T \mathbf{A}' \mathbf{u} + \mathbf{b}'^T \mathbf{u} + c' \quad (23)$$

このとき、 \mathbf{A}' の固有値の符号が同符号か異符号かで場合分けし、破損確率を計算する。詳細は煩雑であるため省略するが、一次信頼性法と比較して破損確率の近似精度が高いことが示されている。

2.4 不確定性の分類

破損確率の評価に注目すると、荷重や強度等の不確定性が、それぞれ妥当な統計モデルで表現されていることが構造信頼性理論の前提となる。しかし、一概に不確定性といっても様々な種類が存在する。構造信頼性の分野では、一般的に以下の分類が考えられている¹⁰⁾。

- ✓ Aleatory uncertainty (偶然的な不確定性)：物理現象など本質的なばらつきのこと。知見や情報が収集されたとしても低減不可能なもの。例えば、波高や材料定数のばらつきが挙げられる。
- ✓ Epistemic uncertainty (認識論的な不確定性)：情報が不足することによって生じるばらつきのこと。技術の向上などで低減が可能なもの。例えば、規則算式に含まれるモデル化の不確定性が挙げられる。

ある性能が本質的に持つ不確定性がaleatory uncertaintyであるのに対し、その情報がどの程度確信を持てるのかがepistemic uncertaintyである。前者を把握することで、対象とする現象の統計的な理解を促すことができる。一方、後者を把握することで、統計モデルの妥当性や低減すべき不確定性の要因 (source) が理解できる。構造信頼性理論では、これらの不確定性を定量化することではじめて工学的な取り扱いが可能となる。基礎的な不確定性の定量化手法 (Uncertainty Quantification) については、文献¹¹⁾等に数学的な整理がされている。

3. 最適設計問題から考える信頼性設計とリスクベース設計の違い

3.1 信頼性に基づく最適設計

信頼性設計と最適設計問題に適用する場合を考える。これは、信頼性に基づく最適設計 (Reliability-based Design Optimization: RBDO) と呼ばれ、破

損確率の制約を満たす設計の中で所望の性能を最小化（または最大化）するような設計解を探索する。設計変数を $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_n)^T$ ，確率変数を $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{n_r})^T$ とすると，次のように定式化される。

$$\text{Min.: } f(\mathbf{d}) \quad (24A)$$

$$\text{s.t.: } P[g_j(\mathbf{d}, \mathbf{x}) \leq 0] \leq \Phi(-\beta_j^{\text{Tar}}) \quad (24B)$$

$$(j = 1, \dots, m)$$

ただし， $f(\cdot)$ は目的関数（重量など最小化したい性能）， m は限界状態関数の数， β_j^{Tar} は j 番目の限界状態関数に対する目標の信頼性指標である。目標の信頼性指標は各破損モードに対する破損確率の上限値（目標信頼性）を与えるもので，一般的には設計者が設定する。

3.2 リスクベース最適設計

リスクベース設計を最適設計問題に適用する場合を考える。これは，リスクベース最適設計（Risk-based design optimization）と呼ばれ，リスクを目的関数や制約関数にとることで，リスクを考慮した最適解が得られる。本稿では，式(2)で示した定量的なリスクを損傷にかかるコストの期待値と読み替え，損傷以外の要因によって生じるコスト C_0 （初期コストと呼ぶ）との総和を最小化する最適設計問題を考える。つまり，以下のような定式化となる。

$$\text{Min.: } f(\mathbf{d}) = C_0(\mathbf{d}) + \sum_{j=1}^m C_{Dj}(\mathbf{d}, \mathbf{x}) \cdot P_{fj} \quad (25A)$$

$$\text{where: } P_{fj} = P[g_j(\mathbf{d}, \mathbf{x}) \leq 0] \quad j = 1, \dots, m \quad (25B)$$

いま，被害度 C_D が設計変数に依存しないと仮定する。また，簡単のため破損モードは1つであるとす。このとき，式(25A)で示した最適設計問題の目的関数は以下のように書き換えられる。

$$f'(\mathbf{d}) = \alpha \cdot C_0(\mathbf{d}) + (1 - \alpha) \cdot P_f \quad (26A)$$

$$\text{where: } \alpha = \frac{1}{C_D + 1} \quad (26B)$$

式(26A)は，重み係数 α を用いた初期コストと破損確率の線形加重和となっている。これは，初期コストと破損確率を同時に最小化する多目的最適設計問題を解いていることと同義である。つまり，式(25)は以下のように書き換えられる。

$$\text{Min.: } C_0(\mathbf{d}) \quad (27A)$$

$$\text{Min.: } P_f(\mathbf{d}, \mathbf{x}) \quad (27B)$$

式(27)の多目的最適設計問題の最適解は，Pareto解と呼ばれる，優劣が付けられない解の集合（Pareto front）として与えられる。図3に目的関数空間におけるPareto解の様子（概略図）を示す。この図より，重み係数 α の値に応じてPareto解が選択されることがわかる。式(26B)より，重み係数は被害度によって決定されることから，被害度によってPareto解が選ばれると考えられる。

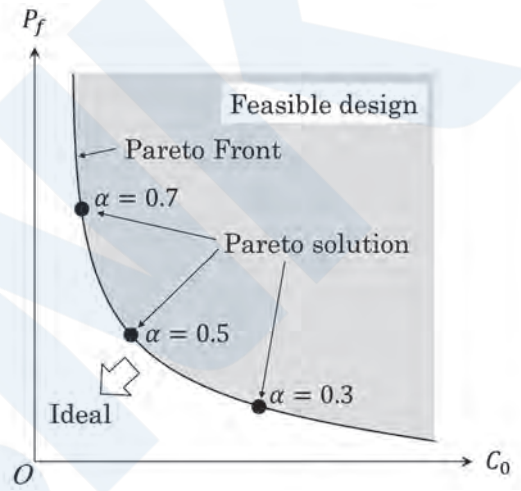


図3 リスクベース最適設計のPareto解

最後に，リスクベース設計におけるPareto解の解釈を考える。例として， $\alpha = 0.7$ におけるPareto解の破損確率を上限とした場合の実行可能領域（解が存在する部分）を図4に示す。図に示す通り，実行可能領域内で初期コスト C_0 が最小となる解は $\alpha = 0.7$ におけるPareto解となる。つまり，Pareto解は，破損確率の制約を満足する実行可能な設計群から C_0 が最小となる解を探索した結果と解釈できる。これは，前節で説明した信頼性に基づく最適設計と本質的には同義である。両者の異なる点は，信頼性に基づく最適設計では目標信頼性を設計者が決めていたのに対して，リスクベース最適設計では被害度によって目標信頼性が決められる点である。つまり，被害度という客観的かつ合理的な値で閾値を決める点がリスクベース最適設計の特徴といえる。

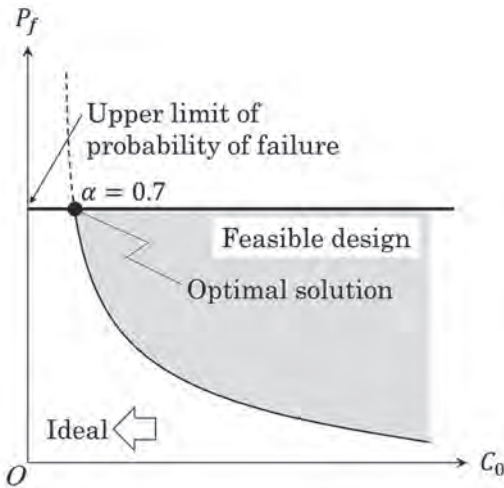


図4 Pareto解の解釈

4. リスクベース設計の展開

4.1 GBS-SLA interim guideline

従来、国際航海に従事する船舶の構造規則は実質的に船級等に委ねられていた。しかし、1980年代以降、ばら積み貨物船や油タンカーの事故が多発したことを受け、IMOが船体構造規則の策定に関与するべきとの機運が高まった。これを受け、2003年のIMO MSC77 (Maritime Safety Committee) にお

いてトップダウン型の規則体系であるGBSの制定が合意された。これに基づき、IMOで順次作業が進められるとともに、IACSでもこの動きに対応してCSR (Common Structural Rule) の開発が進められていった。GBS適合構造規則であるCSRは、一般的に極めて規範的かつ自由度が低い規則であるとされる。そのため、新コンセプト船に代表される新しい設計に対しては自由度の高い異なるアプローチが求められる。そこで、安全性を定量的に設定するSLAに基づいたGBS-SLAの策定の必要性が強調されるようになり、安全性を測る尺度としてリスクを用いることが合意された。また、GBSの審議以前に発行されたFSA (Formal Safety Assessment) guideline³⁾との親和性が注目され、結果としてGBS-SLAにおいてもFSAのアプローチが数多く参照されている。これらGBS-SLAに関連する動向を表2に示す。

GBS-SLAは、次の5つの階層 (Tier) から成る。

- I. Goals : 目標
- II. Functional requirements : 機能要件
- III. Verification of conformity : 適合検証
- IV. Rules and regulations for ships : 船級規則等
- V. Industry practices and standards : 業界標準等

表2 GBS-SLAに関する動向

Year	IMO	IACS
~1999	比較的大型のばら積み貨物船の全損事故が発生	
1999	フランスのブルターニュ沖でエリカ号 (油タンカー) が折損事故	
2001	MSC74およびMSPC47 (2002) においてIMO Rule-Making ProcessにおけるFSAガイドラインが承認される	
2002	スペインのガリシア沖でプレステージ号 (油タンカー) が折損事故	
2003	MSC77にてGBSを制定することが合意される	第47回理事会においてCSRの開発が合意される
2004	MSC78でGBSに関する本格的な審議が開始される	
2005	MSC80においてSLAによるGBS構築が提唱される	第52回理事会においてCSRが採択される
2006	CSRの適用開始	
2010	MSC87においてIMO GBSが採択される	
2012	MSC90においてSLAに基づくinterim guidelineのワークプランが裏書され、そこで考慮されるべき要素の草案が作業グループで同意される	
2017	MSC98およびMPEC72 (2018) においてFSA Guidelinesの改正が承認される	
2018	<ul style="list-style-type: none"> ・ MSC99においてFSAガイドラインの対応するステップを適用することが議論される ・ Interim guidelineの草案が承認され、関連するMSC circularを準備することが合意される 	
2019	MSC100において、interim guidelineが承認される	

この5つの階層のうち、IMOの条約に含まれるものは、Tier IとTier IIであり、詳細な規則であるTier IVについては関連するIMOコードや船級規則などに含まれるとされる。以下、本稿ではTier IとTier IIについて説明する。

Goalsとは、達成すべき目標のことを指し、安全要求レベル (required safety level) を記述することが規定されている。安全要求レベルとは、リスクにさらされる程度 (measure of exposure to risk) の最大値であり、社会的に受容可能な程度とすべきとされる。ガイドラインによると、安全要求レベルは定量的またはプロセスを通じて暗黙的に指定がされる。また、GoalsはIMOの海上安全委員会(MSC)によって規定されるものとされている。

Functional requirementsは、Goalsを達成するために満足すべきクライテリアであり、IMOの各委員会において規定される。また、次に挙げる項目を遵守することとされる。

- ✓ Goalsを達成するために必要な全ての分野をカバーすること
- ✓ 関連する全てのハザードに対処すること
- ✓ Tier IVの規則群を検証するための基準を設けること
- ✓ 更なる技術開発を進めるために、特定の技術に依存しないこと
- ✓ どの機能が達成されるべきかを明確にすること

GBS-SLAでは、ハザードの特定やリスクの定量化等の手続きが必要であるが、これらはFSAに規定されたものを踏襲することになっている。

4.2 疲労強度クライテリアの事例

リスクベース設計の概念は、リスクを基準に目標信頼性を決めるという考え方にある。本節では、これを踏まえた構造規則開発の一例として、船体構造の疲労亀裂損傷を対象としたクライテリアの設定方法を紹介する。

船体構造は大規模な溶接構造物であるため、多数の溶接継手部が存在する。そのため、疲労強度上の評価個所が船体構造中に複数存在し、それぞれに対して設計S-N線図を利用した疲労強度照査が行われている。一般的に、疲労強度照査は累積疲労被害度Dを基に行われ、本会の鋼船規則C編全面改正での新構造規則では以下の式で評価される。

$$\eta \cdot D \leq 1 \quad (28)$$

ここで、 η は対象個所によって変化する修正係数であり、区画の機能性に関連するかどうかで決まる。

例として、式(28)を基にリスクベース設計の考え

方を用いた疲労強度クライテリアを考えてみよう。累積疲労被害度が設計変数 d と確率変数 x を用いて表現されるとき、ある部材に対する目標信頼性指標を β^{Tar} とすると、信頼性を用いた制約式は以下のようになる。

$$P[g(\mathbf{d}, \mathbf{x}) \leq 0] \leq \Phi(-\beta^{\text{Tar}}) \quad (29A)$$

$$\text{where: } g(\mathbf{d}, \mathbf{x}) = 1 - D(\mathbf{d}, \mathbf{x}) \quad (29B)$$

すでに説明した通り、式(29A)の左辺に当たる信頼性解析は解析的に解くことが難しい。また、対象個所ごとに信頼性解析を行うことは設計の実務上、手間のかかることである。そのため、構造規則や規格においては、設計者の使いやすさを考慮した部分安全係数 (Partial Safety Factor: PSF) を用いることが多い。例えば、非常に簡単な例として、確率変数の平均値ベクトル $\boldsymbol{\mu}$ と疲労被害度に対する部分安全係数 η_{PSF} を用いて、式(29A)と等価な制約が次のように得られるとする。

$$g_{\text{PSF}}(\mathbf{d}, \boldsymbol{\mu}) = 1 - \eta_{\text{PSF}} \cdot D(\mathbf{d}, \boldsymbol{\mu}) \geq 0 \quad (30)$$

ここで、部分安全係数 η_{PSF} は目標信頼性指標 β^{Tar} に対応して計算されるものであり、構造規則や規格においては、部分安全係数表と呼ばれる表の形で整理される。部分安全係数を導出するには、3章で述べたMPPを用いた方法などがある。

さて、次に問題となるのが、いかにして目標信頼性指標を決定するかである。信頼性設計であれば、設計者がそれぞれの経験等を基に決定すればよい。しかし、構造規則などの合理的かつ透明性が求められるものであれば、リスクベース設計の考え方を採用して決められることが望ましい。疲労亀裂損傷であれば、船体構造全体への直接的な影響は少ないものの、区画の機能を喪失する恐れがあるため、区画の機能維持の観点からリスクを考慮する必要がある。つまり、図5に示すように、部材ごとにリスク評価を行い、リスクレベルに対応する目標信頼性を決めておくことが必要となる。この考え方を採用すると、詳細な評価が不要となる部材を特定することなども可能となる。

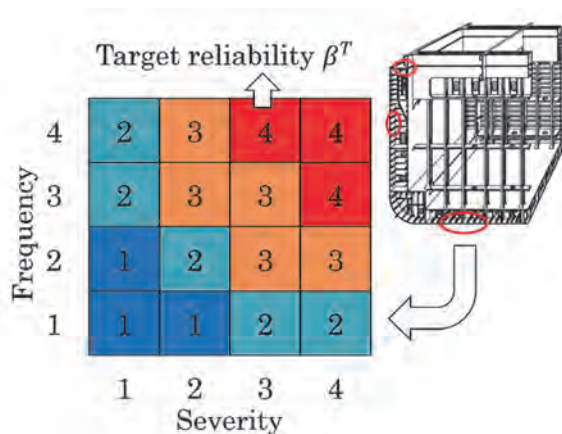


図5 部材ごとのリスク評価と目標信頼性の設定

リスクベース設計の考え方では、データベースの整備が最も重要な作業といえる。例えば、区画の水密性に注目した際、水密性を喪失するような疲労亀裂損傷がどの程度過去に発生したのかを整理し、関連するデータ（亀裂寸法など）と共に記録しておくことで一般化が可能となる。これをもとに、どの部材が水密性を喪失しやすいのか、被害度はどの程度なのかについて把握することができる。また、必要ならば、被害度の推定式も検討すべきであろう。

以上の作業を通じて、部分安全係数表の形で整理すれば、リスクベース設計の考え方をを用いた疲労強度クライテリアが示される。しかし、本稿で説明した作業を具体的に進めるには、技術的な課題は山積していると考えられる。それらについて、次節で説明するとともに、本会の取り組みも簡潔に紹介する。

4.3 技術的課題と本会の取り組み

4.3.1 リスク情報の収集

先に述べた通り、質の高いデータベースの作成はリスクベース設計の考え方を利用する上で重要である。データベースに注目すると、どのような項目で事故データを分類・記録するのが課題の一つと考えられる。これらの項目は、後に構築される被害度推定式に必要な入力変数や前提条件を決定するため、入念な計画と専門家による知見が必要となる。また、なるべく幅広いデータを集め、適宜内容のアップデートをすることが、データベースの質を担保する上で重要である。そのためには、社会全体でデータを共有する、報告しあう環境を整備することが求められるであろう。

これに対して本会は、船級検査で得られた情報をデータベース化し、様々なサービスに展開することを検討している。その一環として、リスク情報に特化したデータを抽出・整理し、リスク評価やクライテリアの設定に役立てるべく活動を行っている。また、広く情報を求める枠組みであるvulnerability

報告に関しての検討を進めており、海事クラスター全体でリスク情報を収集・活用する仕組みについて本技報で山田と梶田が報告している。

4.3.2 不確定性の定量化

構造信頼性理論をベースとする以上、不確定性の定量化は重要である。特に、船体構造の設計においては、航路や気象条件によって荷重の不確定性が大きく変化することを念頭に置かなければならない。また、データを活用することにより、epistemic uncertaintyを低減し、より現実に近い精度の高い解析が期待できる。

これに対して本会では、精度の高い解析・評価技術の確立に向けた研究として下記のテーマ等に取り組んでいる。

- ✓ AISデータを用いて実遭遇海象を精度良く把握し、操船影響を定量評価する研究
- ✓ 潮流によって生じる波高データの誤差を低減するため研究
- ✓ 物理的背景に基づいた弾性座屈後の崩壊強度を高精度に推定する算式に関する研究

これらを基にリスクベース構造規則の開発へと展開するべく、日々活動を進めている。

5. おわりに

本稿では、リスクベース設計を理解するための基礎となる構造信頼性理論について説明し、信頼性設計との違いについて最適設計問題を用いた解説を行った。そして、リスクベース設計の展開として構造規則の開発法GBS-SLAについて触れた後、リスクベース設計の考え方をを用いたクライテリア開発事例と技術的課題について説明した。本稿がリスクベース設計に取り組む上での一助となれば幸いである。

謝辞

横浜国立大学 酒井信介教授には、本稿の作成に当たり適切な助言を頂きました。また、IMOガイドラインの記述において、本会 石代宗之技師（元技術研究所、現坂出支部）が行った調査結果を参考にさせていただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 酒井信介, 小林英男: リスクベース設計, 日本機械学会誌, Vol. 106, No. 1020 (2003), pp. 853-856
- 2) IMO: MSC. 1/Circ. 1596 (2019), Interim

guidelines for development and application of
IMO Goal-Based Standards Safety Level
Approach

- 3) 日本工業規格：ディペンダビリティ（総合信頼性）用語，JISZ8115:2019
- 4) P. Thoft-Christensen and M. J. Baker: Structural Reliability Theory and Its Applications, Springer, 1982
- 5) S. K. Choi, R. V. Grandhi and R. A. Canfield: Reliability-based Structural Design, Springer, 2007
- 6) 市川昌弘：構造信頼性工学—強度設計と寿命予測のための信頼性手法—（第2版），海文堂，1996
- 7) 室津義定，邵暁文，米沢政昭：システム信頼性工学，共立出版，1996
- 8) （例えば，）今野浩，山下浩：非線形計画法，日科技連，1978
- 9) 権陽弥，田中博基，伊藤誠，小木曾望：信頼性に基づく最適設計のための改良型応答曲面単一ループ法の提案と評価，日本機械学会論文集，Vol. 85, No. 874 (2019), DOI: 10.1299/transjsme.19-00027
- 10) A. Der Kiureghian and O. Ditlevsen: Aleatory or epistemic? Does it matter?, Structural Safety, Vol. 31, No. 2 (2009), pp. 105-112.
- 11) C. Soize: Uncertainty Quantification, Springer, 2017
- 12) IMO: MSC-MEPC. 2/Circ. 12/Rev. 2 (2018), Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule Making Process

板部材の局部強度算式の開発

岡田 哲男*

1. はじめに

板部材は防撓パネルから構成される船体構造における最も重要な構成要素の一つである。板部材は水圧や貨物などからの面外圧力により曲げを受けるとともに、防撓材、主要支持部材や船体桁を構成する部材として面内応力も作用し、その大きさは特に船体桁の曲げ・せん断に対して顕著である。板部材の設計にあたっては面外圧力に対する曲げや面内荷重に対する座屈・降伏など様々な損傷モードの評価が必要となるが、特に面外圧力による曲げに対する局部強度算式は基本設計の最初の段階で初期板厚を決めるためにも極めて重要である¹⁾。

板部材の面外荷重に対する強度については、塑性設計や剛塑性機構解析などに基づく確立された理論がある^{2) 3)}。それらの理論に基づき、船級協会規則では簡便な板厚寸法算式が規定されている。一般財団法人日本海事協会の旧規則では、帯板の3点塑性関節生成に対して経験的に与えられた安全率をベースとして⁴⁾、面内応力が同時に作用するときの全塑性モーメントの低下を横式構造の場合ミーゼスの降伏条件、縦式構造の場合トレスカの降伏条件を用いて考慮している⁵⁾。CSRも同様に3点塑性関節生成をベースとし、面内応力も同時に作用させた弾塑性FEMにより設定した許容曲げ応力係数を用いた修正を行っている⁶⁾。これらの寸法算式は長年の適用実績により十分な安全性が確認されているが、より複雑な構造挙動や荷重の組合せに対して、理論式の裏付けがあり損傷との対応がより明確な寸法算式に見直していくことが課題であった。本稿ではその見直しのために実施した以下の事項について概要を紹介する^{7) 8) 9)}。

- 寸法算式の基礎となるベースの理論として、曲げと面内応力の重畳による全塑性モーメントの低下を横式構造、縦式構造を一貫してミーゼスの降伏条件で表し、さらに面内応力に伴って発生する付加的な面外荷重（板曲げの曲率に比例する項）も考慮した2点・3点塑性関節生成荷重を求めて検討のベースとした。
- 弾塑性FEMによりある特定の残留たわみを生

じる面外圧力に対する面内応力影響を精査、理論式による結果と比較し、横式・縦式構造の板部材に対する合理的な面内応力影響係数を提案した。

- 従来の船級協会規則ではアスペクト比（長辺と短辺の長さの比）の影響は面内応力影響とは独立に考慮されている。ところが横式構造と縦式構造で面内応力影響係数を区別している場合、アスペクト比が1より大きい小さいかで不連続が生じ、実際の現象を反映できていない。そこで、アスペクト比が小さいときに面内応力係数を縦式と横式の間で補間する算式を提案した。

2. 面内応力の影響を考慮した板曲げ強度の理論算式

2.1 全塑性モーメントへの面内応力影響

2.1.1 横式構造

第2章、第3章では板のアスペクト比が非常に大きい場合を考え、板の曲げを帯板の曲げとして扱う。まず横式構造として図1のように板の長辺に垂直な方向の面内応力を受ける場合を考え、防撓材間をスパンとするハッチングで示した帯板の部分の曲げ挙動を検討対象とする。

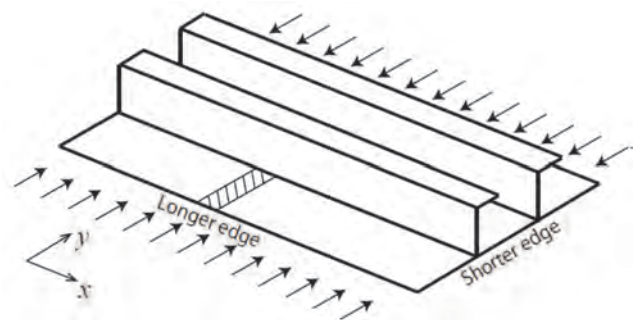


図1 板曲げのモデル（横式構造）

この場合、曲げ応力と面内応力が同じ方向に作用することから、全塑性モーメント M_p は面内応力が無い場合と比べて式(1)に従って低下する。旧NK規則はこの式に基づいて面内応力影響を考慮している⁵⁾。

* 横浜国立大学大学院工学研究院

$$M_P = \frac{\alpha \sigma_Y t^2}{4} \left\{ 1 - \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_Y} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

t : 板厚

σ_y : y 方向に作用している面内応力

σ_Y : 材料の規格降伏応力

α : y 方向垂直応力に直交する方向が拘束されていることから、ミーゼス降伏条件で材料が降伏するとき規格降伏応力を超える y 方向垂直応力が発生することを表す係数で、式(2)による。

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 - \nu_p + \nu_p^2}} = \frac{2\sqrt{3}}{3} = 1.15 \quad (2)$$

ν_p : 塑性状態におけるポアソン比で $\nu_p = 0.5$

式(1)より、面内応力の作用による全塑性モーメントへの影響は、面内応力が作用していないときの全塑性モーメント M_{P0} との比として、下式のように得られる。

$$\frac{M_P}{M_{P0}} = 1 - \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (3)$$

要求板厚 t はこれの平方根に反比例するので、軸力が作用していないときの要求板厚 t_0 との比として、以下となる。

$$\frac{t}{t_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_Y} \right)^2}} \quad (4)$$

これをCSRの要求と併せて図2に示す。細破線のCSRは、式(4)よりもかなり大きい係数としていることがわかる。

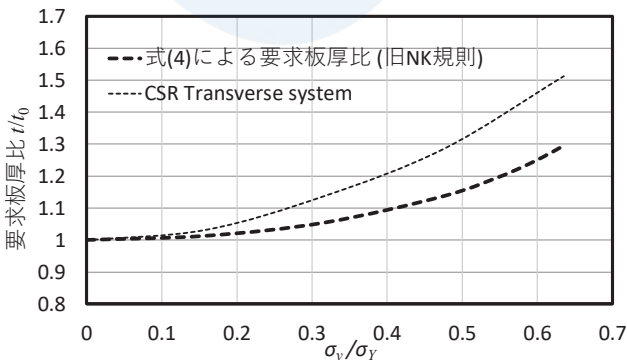


図2 面内応力による要求板厚比 (横式構造)

2.1.2 縦式構造

縦式構造では図1において防撓材に平行な方向に面内応力が作用し、曲げ応力と面内応力が直交する。旧NK規則ではトレスカの降伏基準により影響係数を定式化しているが、ここでは横式と合わせ、ミーゼス降伏基準を用いて影響係数を新たに導出する。

σ_{yu} を板上面の曲げ応力、 σ_{yl} を板下面の曲げ応力、 σ_x を x 方向に作用している面内応力とすると、板上面、下面に対するミーゼス降伏基準はそれぞれ下式となる。

$$\sigma_{yu}^2 - \sigma_{yu}(\sigma_x + \nu_p \sigma_{yu}) + (\sigma_x + \nu_p \sigma_{yu})^2 = \sigma_Y^2 \quad (5)$$

$$\sigma_{yl}^2 - \sigma_{yl}(\sigma_x + \nu_p \sigma_{yl}) + (\sigma_x + \nu_p \sigma_{yl})^2 = \sigma_Y^2 \quad (6)$$

次に、塑性関節形成時の σ_{yu} の範囲を板厚に対して η とすると、 y 方向の軸力がゼロとなる条件は、

$$\sigma_{yu} \cdot \eta t + \sigma_{yl} \cdot (1 - \eta)t = 0 \quad (7)$$

$$\therefore \sigma_{yu} = -\frac{1 - \eta}{\eta} \sigma_{yl} \quad (8)$$

式(8)を式(5)に代入し、 $\nu_p = 0.5$ を用いて整理すると、

$$\frac{3}{4} \left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right)^2 \sigma_{yl}^2 + \sigma_x^2 = \sigma_Y^2 \quad (9)$$

一方、式(6)を変形すると、

$$\frac{3}{4} \sigma_{yl}^2 + \sigma_x^2 = \sigma_Y^2 \quad (10)$$

式(9)と式(10)が同時に満足するため、 $\eta = 1/2$ となり、式(8)より $\sigma_{yu} = -\sigma_{yl}$ となることがわかる。この意味を図3のミーゼス降伏曲線上で考える。軸応力 $\sigma_x (> 0)$ のみが作用している状態 (点A) から徐々に曲げを掛けていくと、下面が先に降伏する (点B) が、全断面降伏に至るまでに塑性化によってポアソン比が0.5に変化し、結局 σ_x の値に関わらず $\sigma_{yu} = -\sigma_{yl}$ となることがわかる。ただし、これは σ_x が保持される場合であって、実際には後述するように全断面降伏まで曲げを掛けていくとこの位置から σ_x が抜け、一点鎖線は左方に移動して σ_{yu}, σ_{yl} の絶対値は $\alpha \sigma_Y$ まで成長し得る。

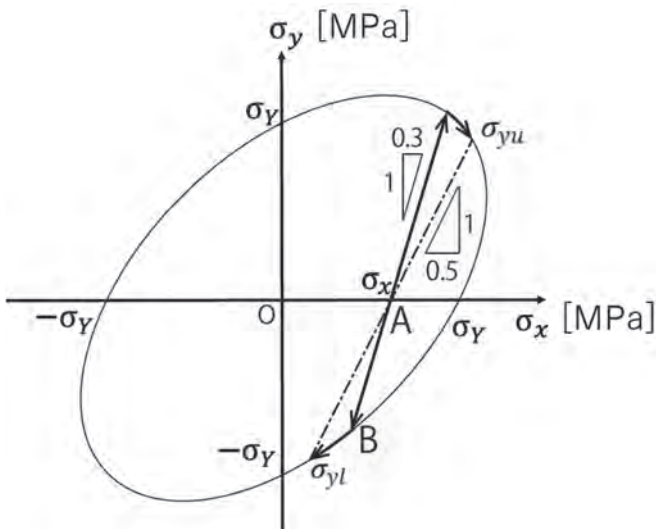


図3 縦式構造の板曲げに対するミーゼス降伏曲線

式(9), (10)を σ_{yl} について解くと,

$$\sigma_{yl} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sqrt{\sigma_Y^2 - \sigma_x^2} = \alpha \sqrt{\sigma_Y^2 - \sigma_x^2} \quad (11)$$

となるので, 全塑性モーメント M_P は,

$$M_P = \sigma_{yl} \cdot \frac{t}{2} \cdot \frac{t}{2} = \frac{\alpha \sigma_Y t^2}{4} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_Y}\right)^2} = M_{P0} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_Y}\right)^2}$$

$$\therefore \frac{M_P}{M_{P0}} = \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_Y}\right)^2} \quad (12)$$

要求板厚 t は式(12)の平方根に反比例し, 軸力が作用していないときの要求板厚 t_0 との比として, 以下となる。

$$\frac{t}{t_0} = \frac{1}{\left\{1 - \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_Y}\right)^2\right\}^{1/4}} \quad (13)$$

式(13)による要求板厚比(赤実線)を, 旧NK規則(黒太破線), CSR(黒細破線)と比較して図4に示す。トレスカ降伏基準に基づくNK算式の面内応力影響は, 面内応力が $0.5\sigma_Y$ に至るまで無い一方, $0.5\sigma_Y$ を超えると急激に立ち上がる。CSRの面内応力影響は, 面内応力が $0.2\sigma_Y$ までは無く, その後は定式化は異なるものの式(13)に近い値となっている。

ミーゼス降伏基準により求めた全塑性モーメントへの面内応力影響およびそれに基づく要求板厚比の式を表1にまとめておく。

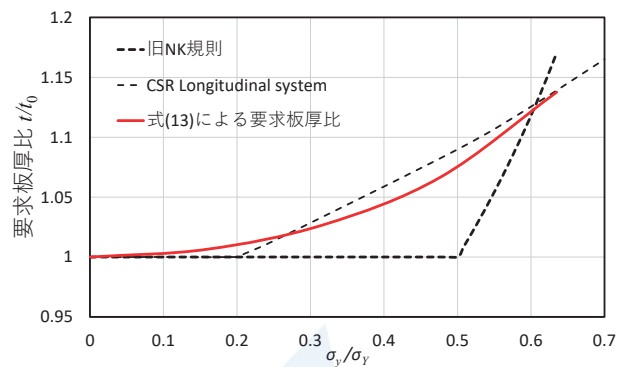


図4 面内応力による要求板厚比(縦式構造)

表1 全塑性モーメントへの面内応力影響

	強度変化率	板厚変化率(強度変化率の逆数の平方根)
横式構造 (板長辺に垂直に面内応力が作用)	$\frac{M_P}{M_{P0}} = 1 - \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_Y}\right)^2$	$\frac{t}{t_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_Y}\right)^2}}$
縦式構造 (板短辺に垂直に面内応力が作用)	$\frac{M_P}{M_{P0}} = \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_Y}\right)^2}$	$\frac{t}{t_0} = \frac{1}{\left\{1 - \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_Y}\right)^2\right\}^{1/4}}$

2.2 面内応力に伴う付加面外荷重の影響

2.2.1 付加面外荷重を加味した定式化

横式構造の場合は面内応力に伴って付加的に発生する面外荷重の影響が顕著となる。この影響を定式化するため, 図5に示す引張軸力 N と一様分布荷重 w が作用する両端固定はりを考える。このとき, たわみ v に関する方程式は, 軸力に伴う付加面外荷重項 $N d^2v/dx^2$ を考慮し, ヤング係数を E , 断面二次モーメントを I として下式となる。

$$EI \frac{d^4v}{dx^4} = w + N \frac{d^2v}{dx^2} \quad (14)$$

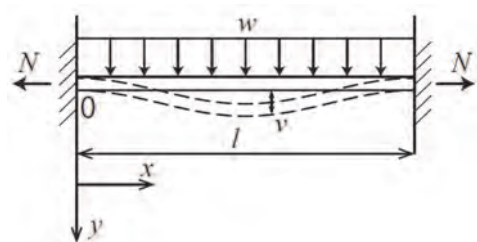


図5 引張軸力を受ける板の曲げ

この方程式を適切な境界条件のもと解くと, 2点塑性関節生成に必要な荷重 w_{2H-t} およびそのときのたわみ v_{2H-t} , 3点塑性関節生成に必要な荷重 w_{C-t} およびそのときのたわみ v_{C-t} が以下の通り求まる。

$$w_{2H-t} = \frac{2NM_p(e^{\beta l} - 1)}{EI(\beta l + \beta l e^{\beta l} - 2e^{\beta l} + 2)} \quad (15)$$

$$v_{2H-t} = \frac{w_{2H-t}l(1 - e^{\frac{\beta l}{2}})}{2\beta N(1 + e^{\frac{\beta l}{2}})} + \frac{w_{2H-t}l^2}{8N} \quad (16)$$

$$w_{C-t} = \frac{NM_p}{EI} \left(\frac{1 + e^{\frac{\beta l}{2}}}{1 - e^{\frac{\beta l}{2}}} \right)^2 \quad (17)$$

$$v_{C-t} = -\frac{M_p}{EI} + \frac{w_{C-t}}{N} \left(e^{\frac{\beta l}{2}} - 1 \right)^2 + \frac{w_{C-t}l^2}{8N} \quad (18)$$

ここに、 $\beta = \sqrt{\frac{N}{EI}}$

圧縮軸力が作用するときは、圧縮を正にとって式(14)の $N d^2v/dx^2$ の項の符号を反転した方程式を解き、2点塑性関節生成荷重 w_{2H-c} およびそのときのたわみ v_{2H-c} 、3点塑性関節生成荷重 w_{C-c} およびそのときのたわみ v_{C-c} は以下ようになる。

$$w_{2H-c} = \frac{2NM_p(-1 + \cos\beta l)}{EI(\beta l \cdot \sin\beta l - 2 + 2\cos\beta l)} \quad (19)$$

$$v_{2H-c} = \frac{w_{2H-c}l \cdot \sin\frac{\beta l}{2}}{2\beta N(1 + \cos\frac{\beta l}{2})} - \frac{w_{2H-c}l^2}{8N} \quad (20)$$

$$w_{C-c} = \frac{NM_p}{EI} \frac{1 + \cos\frac{\beta l}{2}}{1 - \cos\frac{\beta l}{2}} \quad (21)$$

$$v_{C-c} = \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{w_{C-c}}{N} - \frac{M_p}{EI} \right) \frac{1 - \cos\frac{\beta l}{2}}{\cos\frac{\beta l}{2}} - \frac{w_{C-c}l^2}{8N} \quad (22)$$

なお、両端単純支持はりとしてみたときのオイラー座屈荷重は $N_E = \pi^2 EI/l^2$ 、対応する β は $\beta = \pi/l$ であり、式(22)よりこのときたわみは発散することがわかる。

2.2.2 板曲げ強度に対する面内応力影響のパラメトリックスタディ

式(15), (17), (19), (21)を用い、面内応力が作用しているとき強度と面内応力が作用していないときの強度の比（2点・3点塑性関節生成荷重の比）を求めた。引張面内応力のときの結果を図6, 7、圧縮面内応力のときの結果を図8, 9に示す。計算にあたり、 $l = 800 \text{ mm}$, $E = 206,000 \text{ MPa}$, $\sigma_Y = 315 \text{ MPa}$ とした。黒破線は面内応力に伴う付加面外荷重の影響を考慮しないとき、すなわち式(3)による強度低下を示す。

図6, 7より、引張面内応力作用時には付加面外荷

重の影響により強度が上昇すること、その効果は板厚が薄いほど顕著であることがわかる。また、その効果は2点塑性関節生成より3点塑性関節生成で大きい。3点塑性関節荷重に関しては、板厚25~30mmのとき $0.5\sigma_Y$ 程度まで、板厚15mmのとき $0.8\sigma_Y$ 程度まで、ほとんど強度低下は見られない。

図8, 9より、圧縮面内応力作用時には付加面外荷重の影響により強度が低下すること、その効果は板厚が薄いほど顕著であることがわかる。2点塑性関節生成荷重は板厚20mm程度、3点塑性関節生成荷重は板厚25mm程度のとき、面内応力に対して強度がほぼ線形に低下する（赤実線）。板厚がそれ以下のとき強度がさらに下回るが、これらの板厚は実質的には座屈基準で別途増厚されるので、赤線が実質的な強度低下下限と考えられる。そこで、赤線の線形強度低下式、(強度比) = $1 - \sigma_y/\sigma_Y$ をベースとする要求板厚算式(23)が、圧縮面内応力が作用する横式構造における面内応力影響係数のひとつの目安となる。

$$\frac{t}{t_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\sigma_y}{\sigma_Y}}} \quad (23)$$

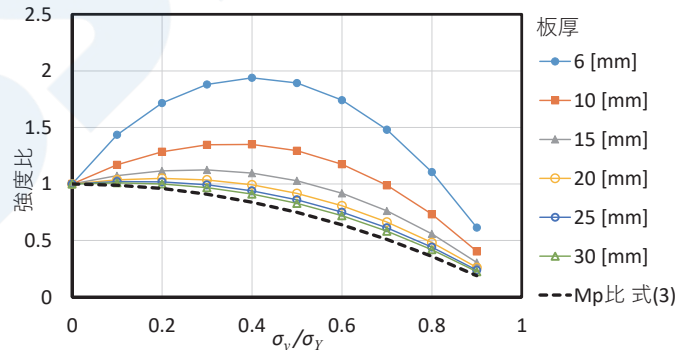


図6 2点塑性関節生成荷重比（引張面内応力）

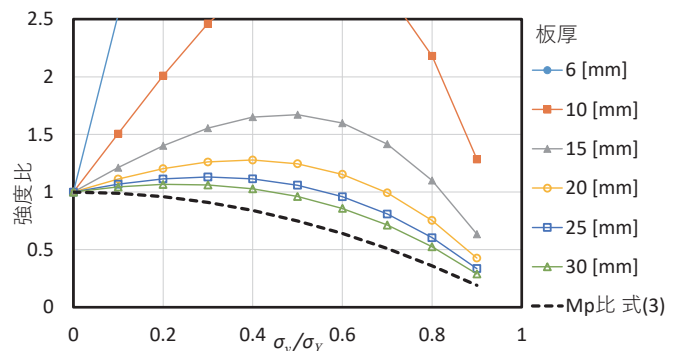


図7 3点塑性関節生成荷重比（引張面内応力）

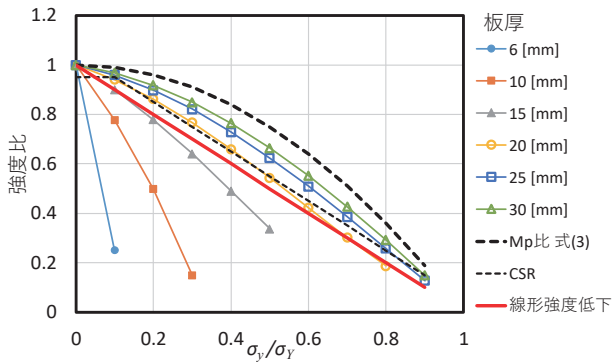


図8 2点塑性関節生成荷重比 (圧縮面内応力)

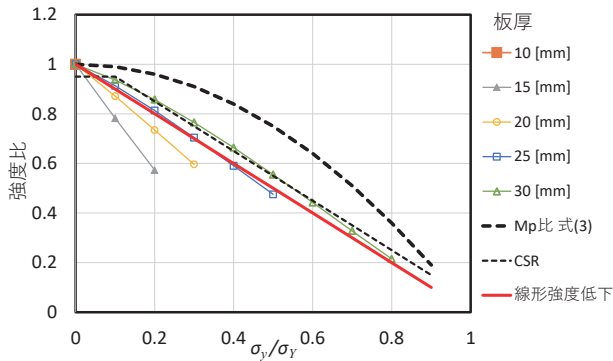


図9 3点塑性関節生成荷重比 (圧縮面内応力)

2.3 弾塑性FEMによる理論式の検証

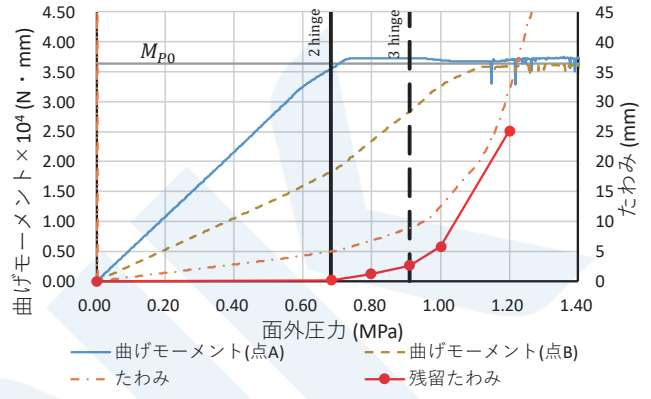
本節では、前節までで導出した理論式を弾塑性FEMにより検証する。図10にFEMモデルを示す。前節までの定式化に準じてアスペクト比影響を排除するため、800mm×8000mmの十分に細長いパネルとし、2ロングスペース×2トランススペースをモデル化した。長辺中央 (点A) で応力・曲げモーメントを検出するためメッシュを要素辺長2.5mmとなるように細分割した。また、パネル中央 (点B) で変位を検出する。解析はLS-DYNAの陰解法により、板厚方向積分点数6のBelytschko-Tsayシェル要素を用いた。ヤング係数206,000 MPa、ポアソン比0.3、接線係数0、降伏応力315MPaとした。無限に連続する防撓板をモデル化するため、境界条件は周期境界条件とした。荷重はまず種々の面内荷重を掛けた後に、所定の面外圧力まで荷重増分により負荷し、その後面外圧力、面内荷重ともに除荷した。その過程での点A、Bの応力、曲げモーメント、たわみや除荷後の残留たわみを観察した。



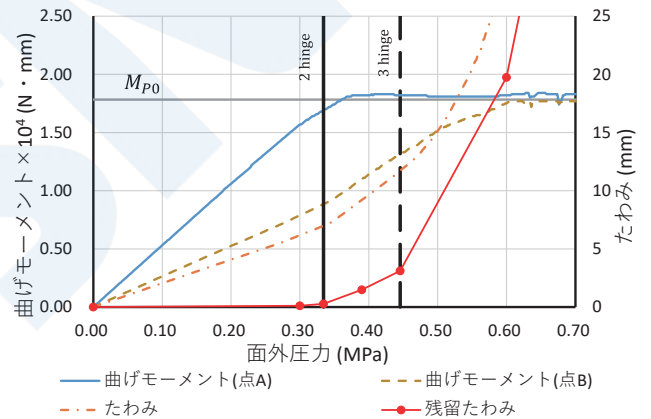
図10 解析モデル

2.3.1 面内応力無しの場合

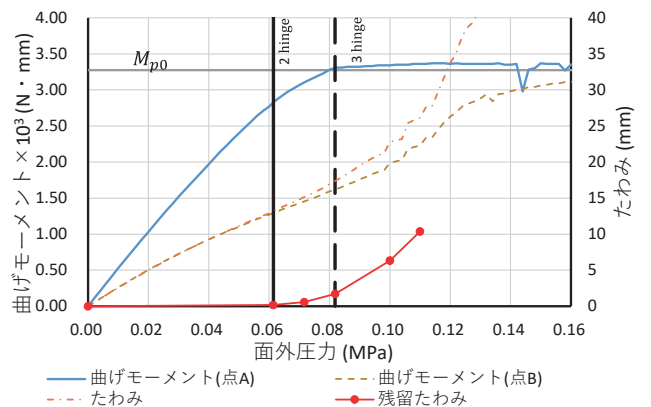
図11にそれぞれ板厚20mm, 14mm, 6mmについて、面外圧力増分に対する点A、Bの曲げモーメント、たわみと残留たわみの推移を示す。図中、2点塑性関節生成荷重を縦実線、3点塑性関節生成荷重を縦破線で示した。



(1) 板厚20mm



(2) 板厚14mm



(3) 板厚6mm

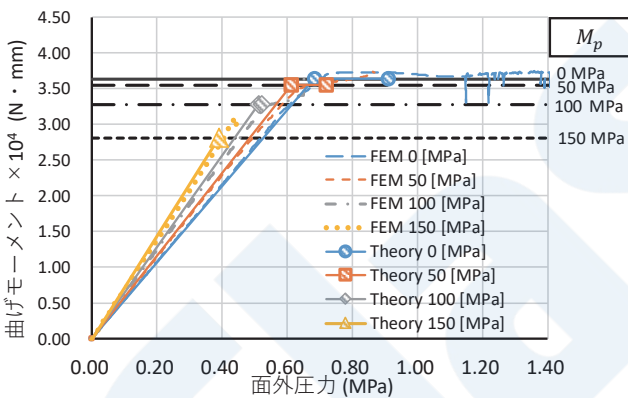
図11 面外圧力による曲げモーメントとたわみ推移

長辺中央 (点A) の曲げモーメントは、全塑性モーメント M_{p0} において頭打ちになっており、その

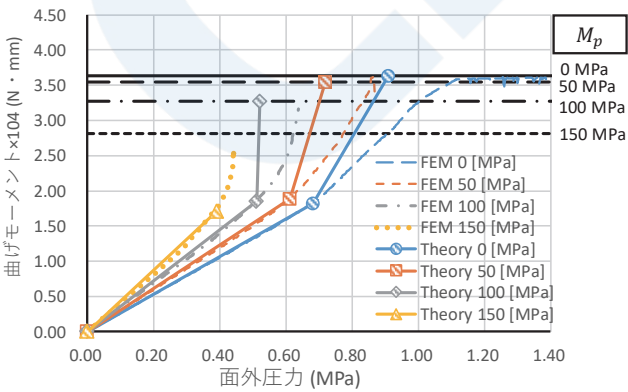
ときの面外圧力は板厚6mmのケースを除いておよそ計算上の2点塑性関節生成荷重と一致している。一方、パネル中央（点B）の曲げモーメントも M_{p0} において頭打ちになっているものの、 M_{p0} に達するには3点塑性関節生成荷重よりもかなり大きい荷重を要している。この傾向は特に板厚が薄いとき顕著で、さらに板厚6mmのときは2点塑性関節生成も若干遅れていることが観察される。これらは膜応力で面外荷重を保持した結果であり、2点塑性関節生成まではこの影響は小さいが、3点塑性関節生成においては無視できない影響を及ぼすことがわかる。残留たわみを観察すると、いずれの板厚においても2点塑性関節生成荷重より大きい負荷を掛けると、残留たわみが大きく成長し始めることがわかる。以上のことから後述する残留たわみクライテリアによる強度基準の策定においては2点塑性関節生成を基準にすることが妥当と思われる。

2.3.2 横式構造に面内応力が作用する場合

図12に圧縮面内応力が作用した場合、図13に引張面内応力が作用した場合の、それぞれ長辺中央（点A）およびパネル中央（点B）における曲げモーメントを示す。板厚は20mmである。

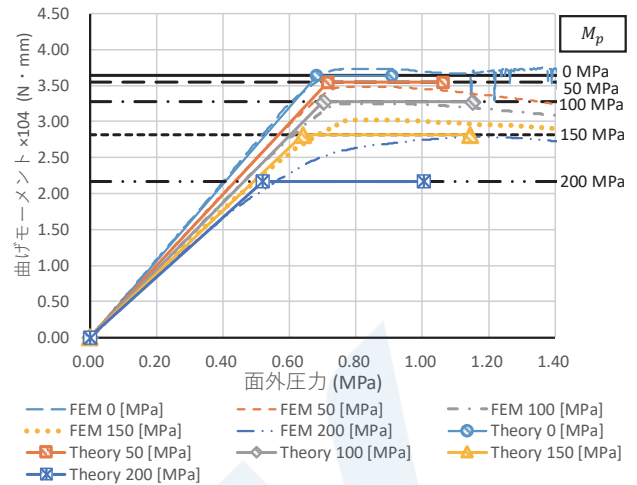


(1) 長辺中央（点A）

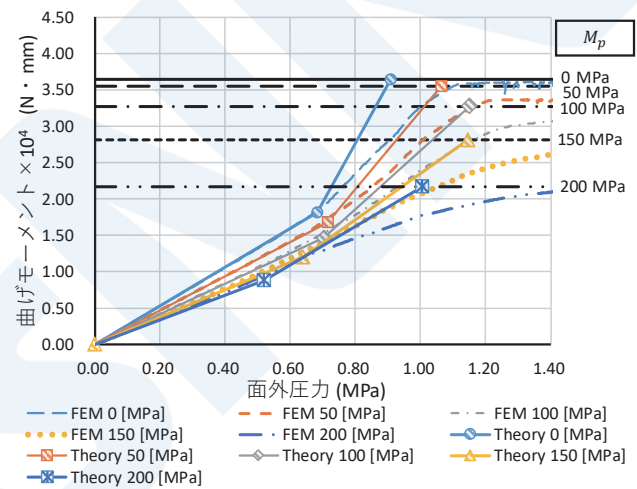


(2) パネル中央（点B）

図12 横式構造に圧縮面内応力が作用するときの曲げモーメント推移



(1) 長辺中央（点A）



(2) パネル中央（点B）

図13 横式構造に引張面内応力が作用するときの曲げモーメント推移

図中、FEM結果を破線・一点鎖線等で示し、前節で導いた理論計算結果を実線で示している。図中の数本の黒横線は、式(3)で得られるそれぞれの面内応力に対応した全塑性モーメントである。理論計算結果に付されているマーカーは、それぞれ式(15), (17), (19), (21)による2点塑性関節および3点塑性関節生成の位置である。FEMと理論式を比べると、2点塑性関節生成まではよく一致しているが、点Bの曲げモーメントに見られるようにその後は膜応力の影響により乖離している。圧縮面内応力が作用するとき、面内応力の増大に伴って付加面外荷重の影響によりグラフの傾斜が大きくなっている。これにより、面内応力に伴う全塑性モーメント M_p の低下と相まって、2・3点塑性関節生成荷重が大きく低下している。逆に引張面内応力が作用するとき、面内応力の増大に伴ってグラフの傾斜が小さくなっていく。この場合、傾斜が小さくなることによる強度上昇と M_p の低下による強度低下の兼ね合いで、

面内応力の増加に伴い一旦強度が上昇した後、低下に転じることがグラフからも観察される。

2.3.3 縦式構造に面内応力が作用する場合

次に、縦式構造に圧縮面内応力が作用するときの長辺中央（点A）における曲げモーメントの推移を図14に示す。数本の黒横線は、縦式構造に対応する式(12)で得られるそれぞれの面内応力に対応した全塑性モーメントである。横式構造に比べて全塑性モーメントに対する面内応力の影響は小さいので、式(3)に基づく図12、13と比べると面内応力による全塑性モーメントの減少量は小さい。縦式構造に対しては面内応力による付加面外荷重ははたらかないので、面内応力の大きさにかかわらず各線の傾きは一致している。図は省略するが、パネル中央（点B）においても、また引張面内応力が作用する場合においても面内応力の作用による差異がほとんど生じないことが観察された。

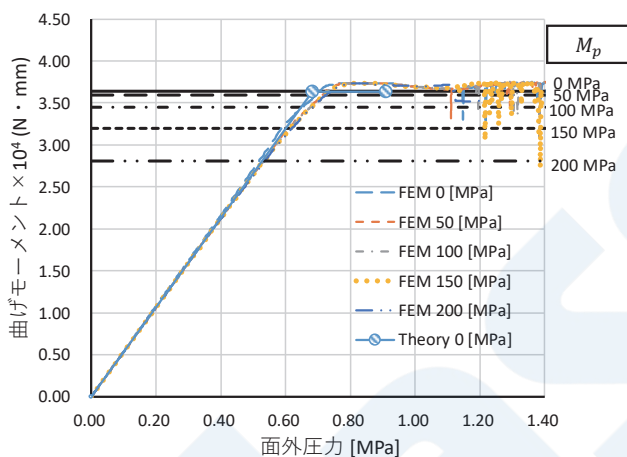


図14 縦式構造に圧縮面内応力が作用するときの長辺中央（点A）における曲げモーメント推移

図14の線が、各面内応力に対応する全塑性モーメントの横線に達したときに点Aに塑性関節が形成されると想定される。ところが、面内応力が作用している場合でも、FEMの曲げモーメントは対応する理論上の全塑性モーメントを突き抜けていることが観察される。これは実質的にこの断面では面内応力が作用しない場合の全塑性モーメントを支えることができ、縦式構造では強度への面内応力影響が非常に小さくなる可能性を示唆している。この理由を考察するため、引張面内応力200MPaが作用しているパネルに徐々に面外圧力を掛けたときの点Aの上面および下面の応力履歴を図15に示す。水色が x 方向応力、オレンジ色が y 方向応力、黒がミーゼス応力で、実線と破線がそれぞれ上面と下面の値を示す。

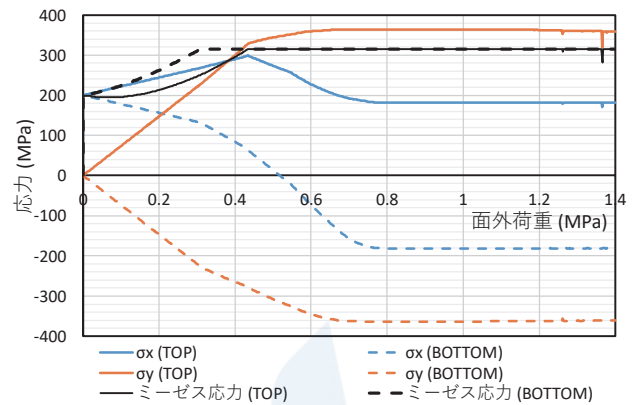


図15 点Aの表面応力状態の推移
(縦式・引張応力200MPa)

面外圧力を掛け始めると、 y 方向曲げ応力が上面・下面で逆向きに発生し、それにポアソン比0.3を掛けた分だけ x 方向応力が初期値200MPaから変化している。面外圧力0.31MPaで下面の降伏に伴い下面応力の傾きが変わり、次に面外圧力0.43MPaで上面が降伏し上面応力の傾きも変化している。さらに面外圧力を掛けていくと、面内応力が抜けて x 方向応力が $\nu_p (= 0.5) \cdot \sigma_y$ に落ち着いて行く一方、 σ_y は降伏後も増大を続け、面外圧力がおよそ0.78MPaのとき $\alpha (= 1.15) \cdot \sigma_y$ に達する。この現象を図16のミーゼス降伏曲線上に示す。つまり、下面降伏（●点）、上面降伏（■点）後さらに面外圧力を掛けていくと、図3のように x 方向面内応力を保持しながらポアソン比が0.5に変化するのではなく、 x 方向面内応力が抜けていく方向に動いていることがわかる。

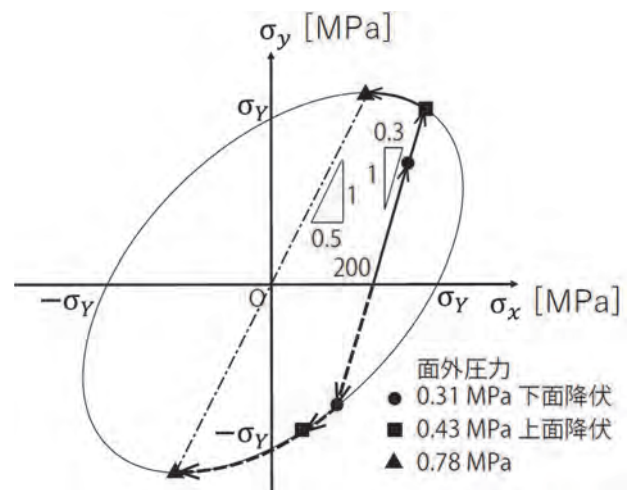


図16 縦式構造の板曲げに対するミーゼス降伏曲線
(FEM結果の応力推移)

このことは、非常に大きな面外荷重を掛けた場合には板曲げ強度に対する面内応力の影響は消失することを意味する。しかしながら、2点塑性関節生成時点（計算上0.527MPa）ではまだ x 方向面内応力

が抜けきっていないこと、2点塑性関節生成で残留たわみの増大が始まることから、板の強度基準を2点塑性関節生成に置くときには面内応力による全塑性モーメントの減少を考慮するのが妥当と考えられる。

3. 弾塑性FEMによる残留たわみ基準のシリーズ解析

Hughesら^{10) 11)}も指摘しているように、主として面外圧力を受ける板部材は膜応力の影響などによって非常に大きい最終強度を有しているの、設計基準としてはむしろ残留たわみのような保守性に基づく指標が有用である。そこで本章では、残留たわみを基準とする弾塑性FEMのシリーズ計算を実施し、板曲げ強度への面内応力影響を整理し、2章で導出した計算式と比較検討する。FEMモデルは2章で用いたものと同じものを用い、面内応力レベルごとに所定の残留たわみが残る面外圧力をFEMの繰り返し計算により求めた。2章で示したように、板厚によらず2点塑性関節生成に相当する荷重を超えると残留たわみが大きくなり始めることから、強度クライテリアとして2点塑性関節生成を基準とすることが妥当と考えられる。そこで、14mmの板に面内応力無しで2点塑性関節生成荷重を与えたときの残留たわみ0.26mmを、共通のクライテリアとして採用した。

3.1 横式構造の解析結果

図17に横式構造に面内圧縮応力が作用している場合の、残留たわみが0.26mmとなる板厚と面外圧力の関係を示す。面内応力が增大すると、同じ板厚に対して面外圧力が著しく低下し、同じ面外圧力に対して板厚が著しく増加することがわかる。横軸に面内応力を取り、面内応力が作用していない場合との強度比をプロットしたものを図18に示す。FEM結果は、図8に示した2点塑性関節生成荷重に関する強度比の理論値のグラフと一致した傾向を示していることがわかる。線形強度低下式（赤実線）はFEM結果を安全側にカバーしている。なお、参考までに残留たわみを4mmに設定して同様の計算をすると、面内応力の影響がより顕著になり、図9に示した3点塑性関節生成荷重に関する強度比の理論値のグラフにより近づく結果となった。図19に圧縮面内応力と要求板厚比の関係を示す。FEM結果の要求板厚比は旧NKの式(4)より大きく、CSR要求値の上下にばらついている。面外圧力が小さいとき（板厚が小さいとき）要求板厚比はCSR要求値より大きくなっているが、線形強度低下式（式(23)；赤

実線）がFEM結果を安全側にカバーしている。

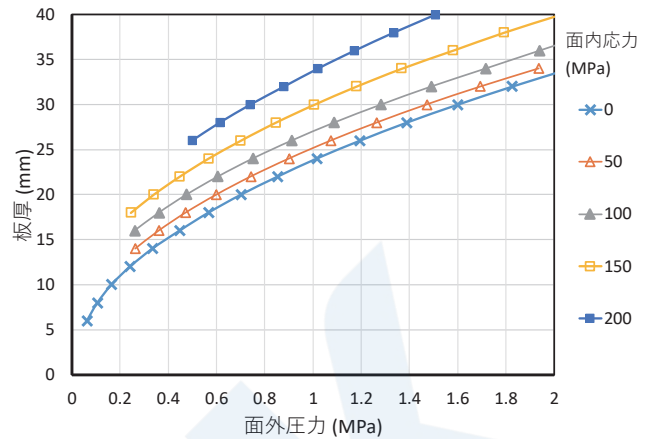


図17 板厚と面外圧力の関係（横式・圧縮面内応力）

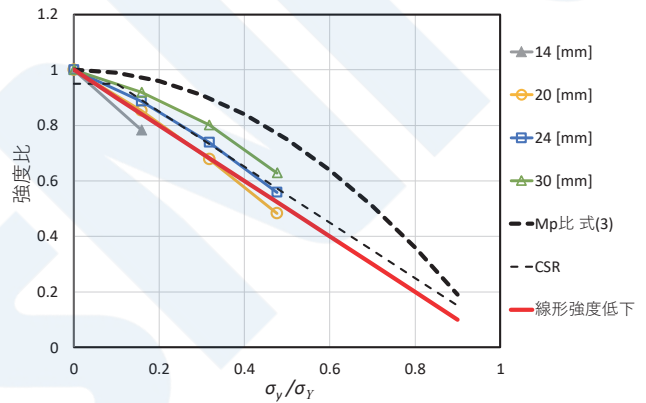


図18 圧縮面内応力と強度比の関係（横式）

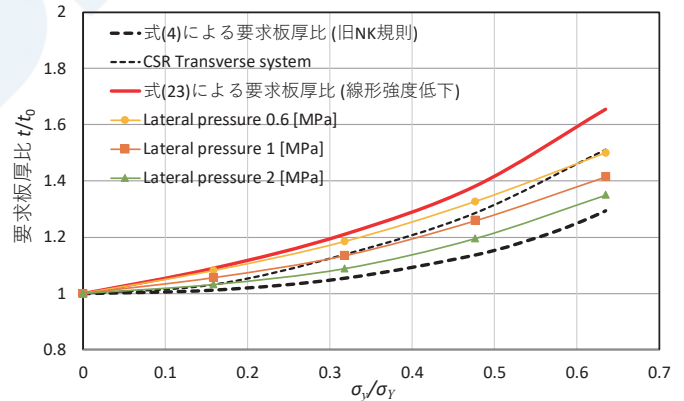


図19 圧縮面内応力と要求板厚比の関係（横式）

次に面内応力が引張である場合の同様の図を図20, 21, 22に示す。図20では面内応力の違いによる各線のばらつきが図17と比べて小さく、強度への引張面内応力の影響は小さいことがわかる。特に面外圧力が小さいとき、すなわち板厚が小さいときは、引張面内応力の作用により強度が上昇している範囲があることが観察される。面内応力が作用していない場合との強度比を示す図21は、図6に示した引張面内応力作用下の2点塑性関節生成荷重に関する強度比

の理論値のグラフと一致した傾向を示していることがわかる。この場合、旧NK規則で採用されているミーゼス降伏条件に基づく全塑性モーメント比（式(3)・黒太破線）がFEM結果を安全側にカバーしている。なお、参考までに残留たわみを4mmに設定して同様の計算をすると面内応力の影響がより顕著になり、図7に示した3点塑性関節生成荷重に関する強度比の理論値のグラフに近づく結果となった。図22の引張面内応力と要求板厚比の関係では、FEM結果の要求板厚比は、最も要求板厚比の小さい旧NK規則（式(4)・黒太破線）よりさらに下にあり、これがFEM結果を安全側にカバーしている。面外圧力が小さいとき（板厚が小さいとき）、引張面内応力により強度が上昇し、要求板厚比が1.0を下回っている。残留たわみ基準を4mmとした計算ではこの傾向はより顕著となり、ほぼすべてのケースで強度低下は観察されなくなる。しかしながら、残留たわみが成長し始める2点塑性関節生成に相当する0.26mm基準では図22のように明確な面内応力影響が観察されることから、この影響を無視することは危険側となる。

横式構造への圧縮と引張の面内応力の影響についてまとめると、圧縮面内応力の場合は線形強度低下による式(23)が、引張面内応力の場合はミーゼス降伏条件に基づく式(4)がFEM結果の要求板厚比を安全側にカバーしている。この場合、圧縮では板厚が厚いとき、引張では板厚が薄いときに安全余裕が大きくなる。

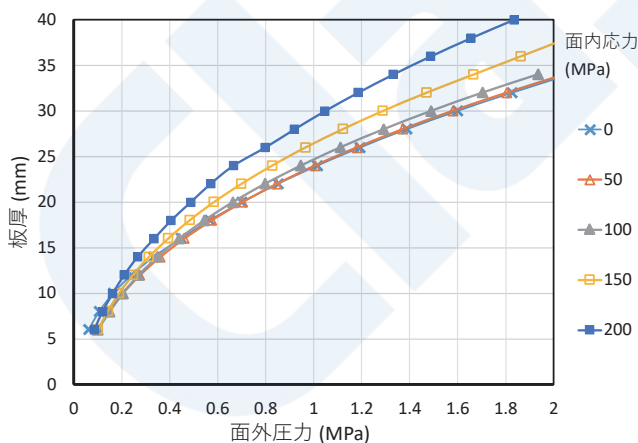


図20 板厚と面外圧力の関係（横式・引張面内応力）

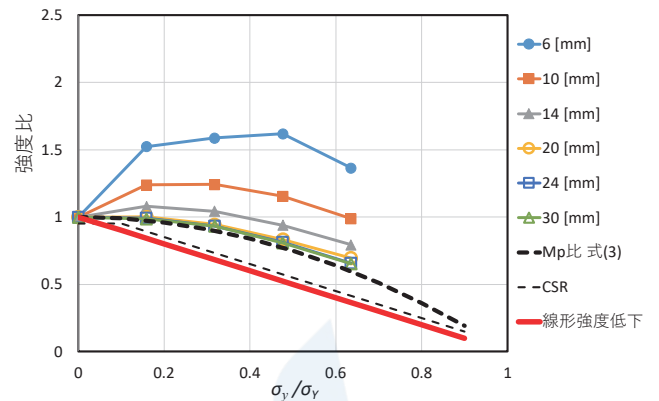


図21 引張面内応力と強度比の関係（横式）

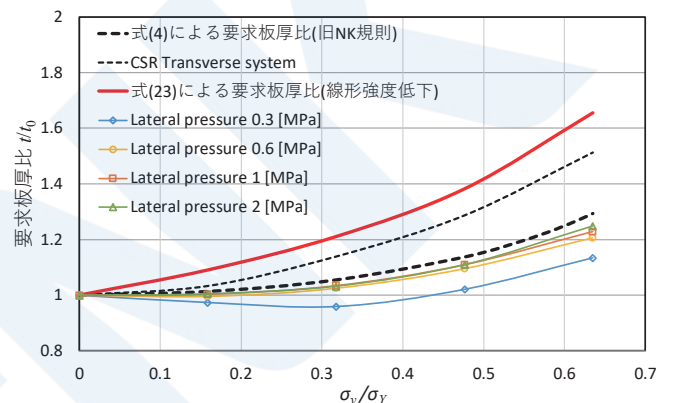


図22 引張面内応力と要求板厚比の関係（横式）

3.2 縦式構造の解析結果

縦式構造に圧縮面内応力が作用している場合の同様の図を図23, 24, 25に示す。図23に見られるように、面内応力影響はかなり小さいが、面外圧力のレベルにかかわらず同じように生じている。図24の強度比に示すように、旧NK規則は $0.5\sigma_Y$ まで、CSRは $0.2\sigma_Y$ まで面内応力影響を無視しているが、FEM結果は面内応力が小さい段階からわずかな減少傾向を示しミーゼス降伏基準に基づく式(12)（赤実線）が安全側にその傾向をよく表している。要求板厚比で整理した図25においても、ミーゼス降伏基準に基づく式(13)（赤実線）がFEM結果を安全側にカバーしている。

なお、引張面内応力の場合は圧縮の場合とほぼ同じ結果であった。また4mm残留たわみ基準でまとめると、面内応力影響がほぼ無視できるレベルまで小さくなった。これは2.3.3項で説明した、塑性関節生成箇所から面内応力が抜ける現象によるものと考えられる。

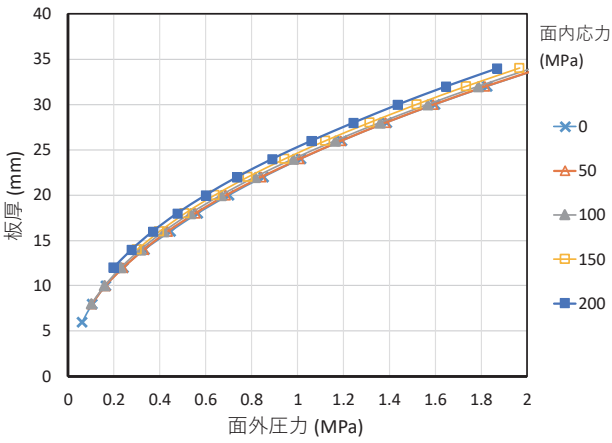


図23 板厚と面外圧力の関係（縦式・圧縮面内応力）

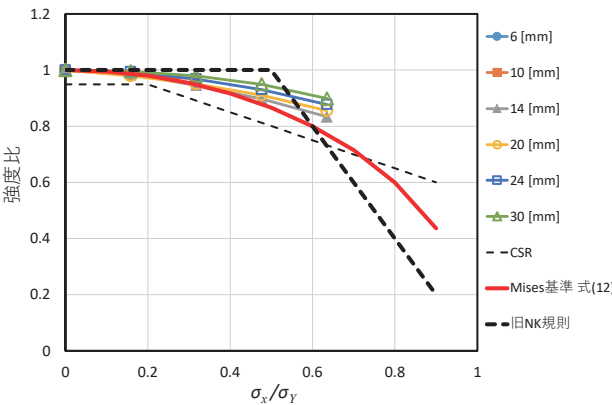


図24 圧縮面内応力と強度比の関係（縦式）

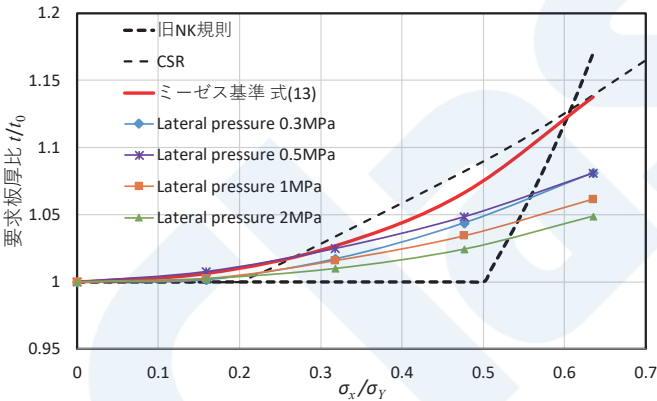


図25 圧縮面内応力と要求板厚比の関係（縦式）

3.3 面内応力係数のまとめ

以上の結果からFEM結果を安全側にカバーできる強度比と寸法算式（要求板厚比）のまとめを表2に示す。縦式構造の場合は面内応力と曲げ応力が直交する場合のミーゼス降伏基準（式(13)），横式構造引張の場合は面内応力と曲げ応力が同じ方向の場合のミーゼス降伏基準（式(4)），横式構造圧縮の場合は線形強度低下基準（式(23)）となる。

4. 面内応力とアスペクト比の複合影響

前章まででは板部材のアスペクト比が十分に大きい場合について検討し，縦式構造と横式構造で面内応力影響が大きく異なることを示した。アスペクト比が小さい場合にも同じ面内応力影響係数を適用すると，アスペクト比が1.0より大きいか小さいかで要求板厚が不連続となるという不合理が生じる。実際にはこのような場合，縦式構造と横式構造の中間的な面内応力影響を受けるものと考えられる。

一方，板部材のアスペクト比が小さいときの強度上昇を考慮するため，CSRなどでは寸法算式にアスペクト比補正係数を導入しているが，面内応力影響とは独立に扱われている。そこで本章では，面内応力影響係数を縦式構造と横式構造の間で合理的に補間する方法，およびアスペクト比補正係数と組み合わせた複合影響係数を検討する。

4.1 複合影響係数の導出

面内応力が作用する場合，縦式か横式か，また面内応力が圧縮か引張かによって表2の C_a の比で強度が低下する。これらの C_a の式はすべて，式(24)の形に一般化して表現することができる。そこで，式(24)中の α および β を縦式構造と横式構造の間で適切に補間することで，アスペクト比が小さい場合の面内応力影響を合理的に表すことを考える。

表2 面内応力影響係数（強度比）と要求板厚比

		適用基準	面内応力影響係数 C_a (強度比)	要求板厚比 t/t_0
縦式構造		面内応力と曲げ応力が直交する場合のミーゼス降伏基準	$\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_y}\right)^2}$ (12)	$1/\left(1 - \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_y}\right)^2\right)^{1/4}$ (13)
横式構造	引張	面内応力と曲げ応力が同じ方向の場合のミーゼス降伏基準	$1 - \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_y}\right)^2$ (3)	$1/\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_y}\right)^2}$ (4)
	圧縮	線形強度低下基準	$1 - \frac{ \sigma_y }{\sigma_y}$	$1/\sqrt{1 - \frac{ \sigma_y }{\sigma_y}}$ (23)

$$C_a = \left\{ 1 - \left(\frac{|\sigma_{BM}|}{\sigma_Y} \right)^{\alpha\beta} \right\} \quad (24)$$

ここに、 σ_{BM} は船体縦曲げ応力であり、本章では面内応力として船体縦曲げ応力のみを考えることとする。このようにおくと、アスペクト比が大きい場合、縦式構造では $\alpha = 2, \beta = 1/2$ 、横式構造では面内応力が引張のとき $\alpha = 2, \beta = 1$ 、面内応力が圧縮のとき $\alpha = 1, \beta = 1$ である。

次にアスペクト比補正係数に関して、前章での面内応力影響係数は2点塑性関節生成を基準としている。そこで、ここではアスペクト比補正係数を、板の弾性曲げ理論をベースに検討する。四周固定の有限アスペクト比の矩形板が等分布荷重を受ける場合の長辺中央と短辺中央における曲げモーメントの級数解¹²⁾を用い、短辺の長さが同一でアスペクト比 ∞ のときの要求板厚 t_{∞} との要求板厚比の近似式を、式(25)、(26)のように求めた。

$$C_{Aspect-L} = \min \left(1.07 - 0.28 \left(\frac{\min(l, s)}{\max(l, s)} \right)^2, 1 \right) \quad (25)$$

$$C_{Aspect-S} = \min \left(0.84 - 0.05 \left(\frac{\min(l, s)}{\max(l, s)} \right)^4, 0.828 \right) \quad (26)$$

ここに、 l は船体長手方向の辺長、 s は船体幅方向の辺長、 $C_{Aspect-L}, C_{Aspect-S}$ はそれぞれ長辺中央および短辺中央におけるアスペクト比影響による要求板厚比である。面内応力が作用していない場合は常に $C_{Aspect-L}$ の方が $C_{Aspect-S}$ よりも大きいので、 $C_{Aspect-L}$ をアスペクト比補正係数のベースとして採用する。

次に、これに対する面内応力影響を考える。縦式構造の場合、長辺中央よりも短辺中央に対する面内応力影響の方が大きくなるので、面内応力が大きい場合には短辺中央が先に塑性関節化することになる。縦式構造でアスペクト比が小さい場合について、面内応力に伴う付加面外荷重影響は小さいと考えて長辺中央について式(12)、短辺中央について式(3)で表される強度低下を考える。図26に、縦式構造でアスペクト比が0.5~1.0の範囲において、面内荷重ゼロ、アスペクト比 ∞ のときの要求板厚 t_{∞} との要求板厚比を示す。長辺中央の曲げに基づく要求板厚比を黒線、短辺中央の曲げに基づく要求板厚比を赤線で示した。また、破線は面内応力がゼロのとき(式(25)、(26))、実線は面内応力 $\sigma_{BM} = 0.5\sigma_Y$ が作用しているときの要求板厚比である。

アスペクト比が1.0に近づくにつれ、 t_{∞} に対する要求板厚比は式(25)にしたがって黒破線のように減少していき、アスペクト比1.0において長辺中央と短辺中央が同時に塑性関節化することになる。一方、面内応力が作用すると、短辺中央への影響の方が大きい結果、このケースではおよそ $s/l > 0.83$ のとき、短辺中央が先に塑性関節化することがわかる。以上のことから、式(24)の α, β について、アスペクト比が1.0のときに $\alpha = 2, \beta = 1$ となるように設定してみる。すると、アスペクト比1.0から縦式構造に変化していくときは、図26の二つの実線の包絡線を安全側に取った補間、横式構造に変化していくときは、面内応力が圧縮の時、アスペクト比1.0では考慮しない付加面外荷重影響が、 s/l が大きくなるにつれ現れる補間となる。

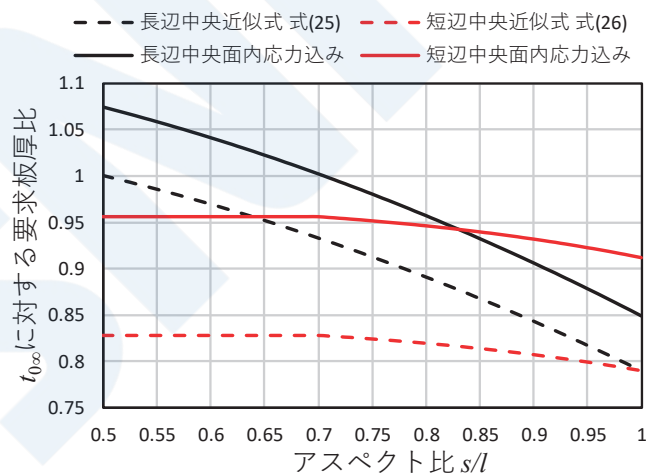


図26 アスペクト比と要求板厚比の関係

以上をもとに、 $s/l < 0.5$ に縦式構造の面内応力影響、 $s/l > 2.0$ に横式構造の面内応力影響を適用して、 $0.5 \leq s/l < 1.0$ 間、および $1.0 \leq s/l \leq 2.0$ 間において線形補間すると、 α, β を表3のように設定することができる。

表3 パラメータ α, β の補間

		面内応力	s/l	α	β
縦式構造	引張圧縮 共通		$\frac{s}{l} \leq 0.5$	2	0.5
			$0.5 \leq \frac{s}{l} \leq 1$	2	$\frac{s}{l}$
横式構造	引張		$1 \leq \frac{s}{l}$	2	1
		圧縮	$1 \leq \frac{s}{l} \leq 2$	$2 \frac{l}{s}$	1
			$2 \leq \frac{s}{l}$	1	1

このようにおくと、面内応力影響係数とアスペクト比補正係数を組み合わせた複合影響係数は次式のように表すことができる。

$$\frac{t}{t_{0\infty}} = \frac{C_{Aspect-L}}{\sqrt{C_a}} = \frac{\min\left(1.07 - 0.28\left(\frac{\min(l,s)}{\max(l,s)}\right)^2, 1\right)}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{|\sigma_{BM}|}{\sigma_Y}\right)^{\alpha, \beta}\right\}}}$$

(27)

4.2 弾塑性FEMによるアスペクト比影響の検証

ここでは、3章と同様、各面外圧力レベルに応じて残留たわみ0.26mmを生じる板厚をFEMの繰り返し計算で求めた。FEMモデルは3章で用いたものと同様で、アスペクト比を変える際には短辺の長さが800mmを保持するようにした。

図27に面内応力がゼロの場合の要求板厚比に対するアスペクト比影響の計算結果を示す。横軸は s/l を対数スケールで表示しており、左半分が縦式構造、右半分が横式構造に対応する。黒破線は式(25)、赤実線はCSRによるアスペクト比影響である。FEM結果では、作用面外圧力が小さいほどアスペクト比影響が顕著に表れている。また、提案式(25)はFEM結果を安全側にカバーしている。CSRによる補正式は一部でわずかに危険側になっている箇所もあるが、全体にFEM結果とよく一致している。

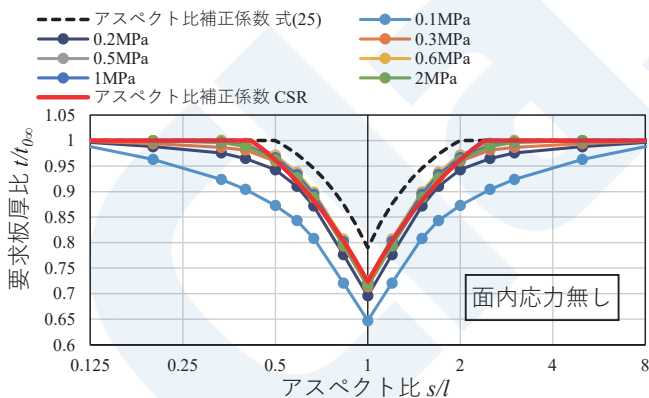


図27 面内応力無しの場合のアスペクト比影響

次に、面内応力が作用しているときのアスペクト比影響の計算結果を図28に示す。左の3つが圧縮面内応力の場合、右の3つが引張の場合である。面内応力の大きさは上から順に $0.3\sigma_Y$ 、 $0.5\sigma_Y$ 、 $0.7\sigma_Y$ である。面内応力が圧縮のとき、板厚が薄い場合に座屈により計算が続行できない場合があり、その結果は図に含まれない（特に横式構造で面内応力が大きく、面外圧力0.3MPa以下の場合など）。また、計算はで

きたが要求板厚に基づくオイラー座屈応力が面内応力を下回るものは三角のマーカー(▲)で示した。図中、黒の実線が面内応力影響を考えない式(25)による要求板厚比、黒の破線がこれに面内応力影響を加味した式(27)による要求板厚比である。

全体に黒破線はFEM結果を安全側にカバーしている。圧縮面内応力の場合に一部黒破線を上回っている結果があるが、これらはオイラー座屈応力を満足していないか(▲マーカー)もしくはそれに近いものであり、別途座屈基準でカバーされるべきものとする。縦式構造の $0.5 \leq s/l < 1.0$ 間で、特に面外圧力が小さいとき、アスペクト比が1.0に近づくにつれて一度大きくなる現象が観察される。縦式構造では面内応力に伴う付加面外荷重影響を無視しているが、アスペクト比が1.0に近い場合、実際には若干の付加面外荷重影響が生じることが原因と考えられる。面内応力が引張の場合の対応する箇所では、要求板厚比のグラフが反対側(下側)にずれていることから、このことが裏付けられる。以上より、圧縮面内応力では面外圧力が大きいとき、引張面内応力では面外圧力が小さいときかなり安全側の評価となるものの、提案式(27)は全体としてFEM結果を安全側に評価しており、妥当な基準と言える。

5. おわりに

本稿では鋼船規則C編の見直しに当たり、最も基本的な要素である板部材の局部強度算式に関して検討した主な内容を紹介した。この結果、理論式の裏付けがあり損傷との対応がより明確な寸法算式に見直していくという当初の目標は、ある程度達成されたと考える。

板部材の寸法算式は基本的なものでありながら様々な要因の影響を複雑に受けるものでもあり、主要な要因の影響を定量的に確認しつつ、できるだけ簡便な算式にまとめることが重要である。さらに2軸面内応力やせん断応力を受ける場合や、やせ馬などの初期不整がある場合など、より詳細な解析と、それらを規則算式がどのようにカバーしているかの検討などが、今後の課題である。

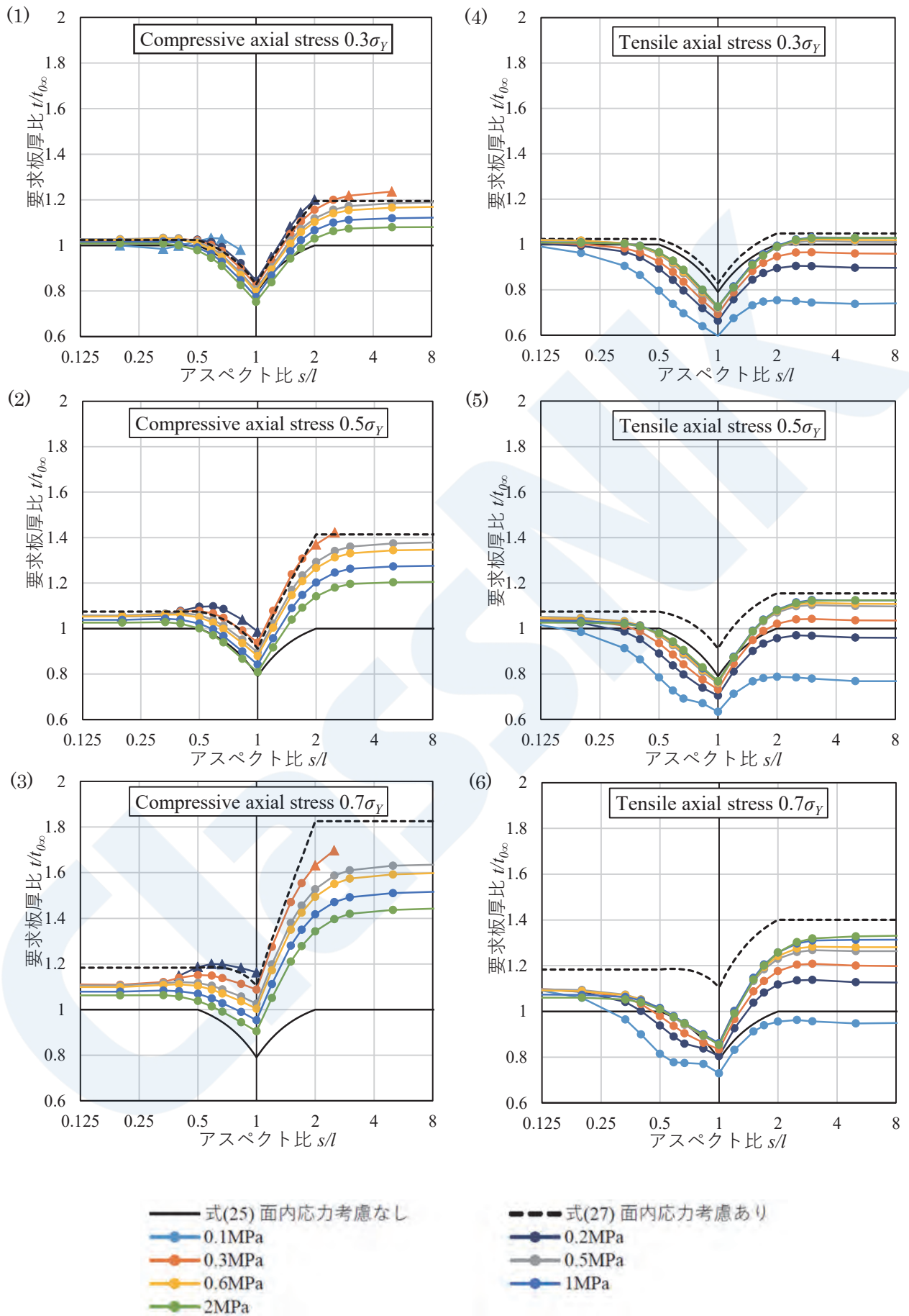


図28 面内応力作用時のアスペクト比と要求板厚比の関係

参考文献

- 1) Okumoto, Y., Takeda, Y., Mano, M., Okada, T.: Part II, Chapter 5 Design of plates, in Design of ship hull structures – A practical guide for engineers, Springer, 2009
- 2) 山本善之：弾性・塑性，朝倉書店，1961
- 3) Jones, N.: Plastic behavior of ship structures, Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, pp.115-145, 1976
- 4) 日本海事協会：昭和55年鋼船規則及び検査要領の改正点の解説，日本海事協会会誌No. 172, 1980
- 5) 日本海事協会：昭和36年鋼船規則及び検査要領の改正点の解説，日本海事協会会誌No. 67, 1961
- 6) International Association of Classification Societies: Common structural rules for bulk carriers and oil tankers – technical background rule reference, 2020
- 7) Naruse, Y., Kim, M., Umezawa, R., Ishibashi, K., Koyama, H., Okada, T., Kawamura, Y.: Scantling evaluations of plates and stiffeners based on elasto-plastic analysis under axial loads and lateral pressures, In: Practical design of ships and other floating structures - proceedings of the 14th international symposium, PRADS2019, September 22-26, 2019, Volume II, Yokohama, Japan: Springer, pp. 100-127, 2021
- 8) Umezawa, R., Naruse, Y., Okada, T., Kawamura, Y., Ishibashi, K., Koyama, H.: A study on scantling formulae of plate members due to lateral pressure under the effect of axial loads, Marine Structures 80, 103099, 2021
- 9) Yamada, M., Okada, T., Naruse, Y., Kawamura, Y., Hayakawa, G., Ishibashi, K., Koyama, H.: Influence of plate aspect ratio on the axial load effect on the plate strength against lateral pressure, 15th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, PRADS2022, Dubrovnik, Croatia, October 9th –13th, 2022
- 10) Hughes, O. F. et al.: Ship structural analysis and design, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010
- 11) Hughes, O. F.: Design of laterally loaded plating – uniform pressure loads, Journal of Ship Research, 25(2), pp.77-89, 1981
- 12) Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S.: Theory of plates and shells, McGraw-Hill Book Company, New York, 2nd Edition, 1959

世界初ゼロエミッションバッテリー推進タンカーと 今後の展望について

平松 雄樹*, 小野寺 達也*

1. はじめに

地球温暖化対策として、温室効果ガス（GHG）の排出削減は喫緊の課題である。船舶においても目標達成に向けてさらにGHGを削減していくためには、船体形状やエンジン、プロペラ等の単体の効率改善だけでなく、船内も含めた船全体での使用エネルギーに対する考えを変えていく必要がある。その一つが、自動車での適用事例が広がっているハイブリッド推進システムや、バッテリー推進システムである。

川崎重工業株式会社（以下、川崎重工業）は、旭タンカー株式会社（以下船主という）が発注し、2022年3月末に竣工した世界初のゼロエミッションバッテリー推進タンカー「あさひ」（図1参照）向けに、内航船向け大容量バッテリー推進システムを納入した。本船は興亜産業株式会社（以下造船所という）にて建造され、東京湾内を運航する船用燃料供給船として運用される。本稿では、バッテリー推進システムの開発の背景、概要、特徴、今後の展望などについて紹介する。



図1 バッテリー推進タンカー「あさひ」

2. 開発の背景

2.1 開発の背景

2018年4月、IMO（国際海事機関）は国際海運におけるGHG削減戦略を採択し、2050年までに2008年比でGHG排出量を50%削減、さらに今世紀中の

なるべく早期にGHGゼロ排出とする目標を掲げている。さらに2021年11月に英国で開催されたCOP26では、各国が2050年に国際海運のカーボンニュートラルを目指すことを表明している。このように船舶におけるGHG削減への機運は世界的に加速している。

国内では、菅前首相がGHG排出を2050年に実質ゼロとすること、及び2030年までに2013年比で46%削減する目標を掲げている。これを受けて、2021年8月に国土交通省は内航海運の2030年度のCO₂削減目標を2013年度比15%減から17%減に引き上げた。

また、内航船の省エネ・省CO₂排出を促進するため、船舶の省エネ・省CO₂排出性能を評価する内航船省エネルギー格付制度を設置、2020年3月から本格運用が開始されている*1。このように内航海運でもGHG削減の機運は高まっている。

2.2 船舶におけるエネルギー使用

船舶で使用されるエネルギーは、推進動力とポンプや照明、制御用などの船内電力の2つに分けられる。推進動力は主機エンジンにより供給され、船内電力は発電機により供給され、図2に示すように、この2つは完全に分離されて使用されることが一般的である。船の用途やサイズにもよるが、主機単体は発電機単体比べて格段に大きく、効率も高いことが多い。

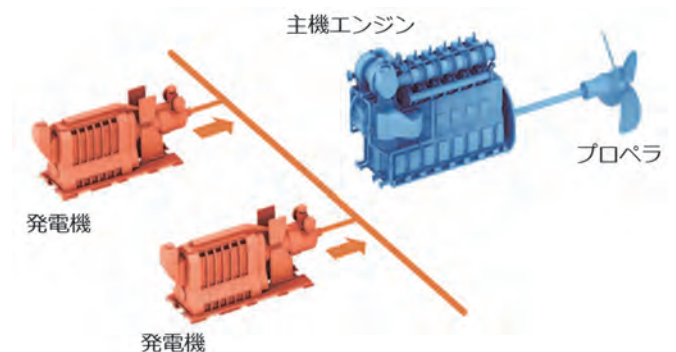


図2 一般的な船舶のエネルギー系統

船舶の運航において、主機及び発電機で消費される燃料代は、運航費用の大きな部分を占めるため、

* 川崎重工業株式会社

*1 国土交通省 内航船省エネルギー格付制度について https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk7_000021.html

その削減に関しては常に大きな関心を集めてきた。船舶の推進性能に関わる、推進抵抗を小さくする船体形状、主機やプロペラの性能・効率向上、あるいはこれらを促進するための付加物など、継続的に研究開発が行われてきている。しかし、船体は造船所、主機は主機メーカー、プロペラはプロペラメーカーと担当する企業が別であることもあり、これらの改善活動は、あくまでも“単体”について行われるのが一般的であった。

2.3 船舶におけるエネルギー使用

そのような中、1997年の京都議定書に基づく環境意識の高まり、2005年頃より始まった原油価格の高騰・高止まりなどを背景に、機器単体ではなく、船全体での燃費削減、省エネ化が図られるようになってきた。推進用の主機と船内電力用の発電機の両エネルギー源を電氣的に結合し、船全体での必要パワーを考慮した主機/発電機の運転を最適化しようとする試みである。推進力を主機、発電機の2つのエネルギー源で供給することから、ハイブリッド推進システムと呼ばれている（図3参照）。

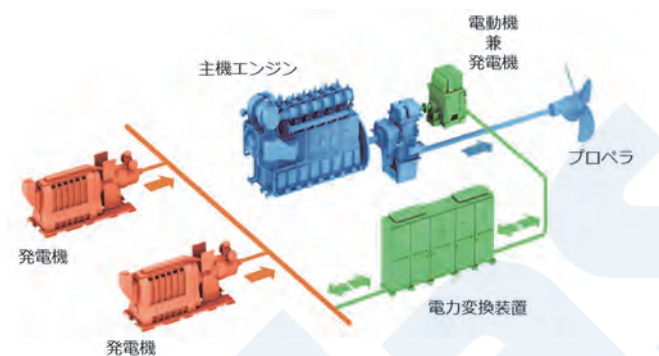


図3 ハイブリッド推進システム

2.4 バッテリーを取り入れた環境対応システムへの流れ

上述したハイブリッド推進システムに加え、一般産業用や自動車用として普及が進み、高エネルギー密度化が進んでいたリチウムイオンバッテリーが船用として登場した。これを組み合わせたものがバッテリーハイブリッド推進システムである

バッテリーからエネルギーを供給して運航している間、船舶からの排出ガスはゼロとなり、港湾内などの局所的なゼロエミッション航行が可能となる（図4参照）。

さらに、図4の構成から主機、主発電機を取り除いたものがバッテリー推進システム（図5）である。内燃機関を使用しないため、全ての運行においてゼロエミッションが実現可能となる、非常に環境にやさしいシステムである。

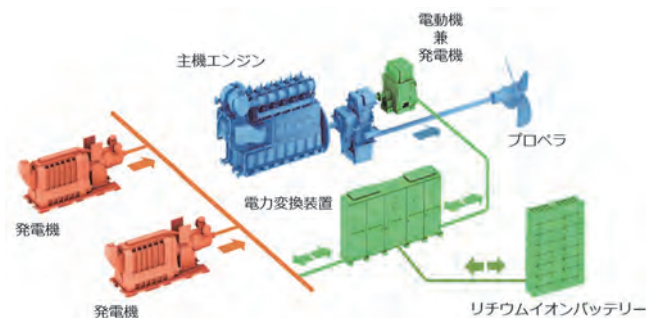


図4 バッテリーハイブリッド推進システム

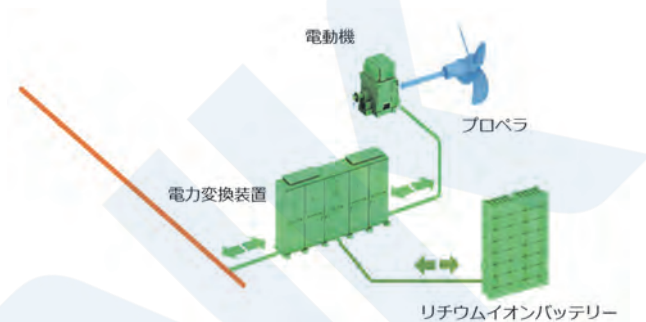


図5 バッテリー推進システム

2.5 川崎重工業の取り組み

川崎重工業では、主機用/発電機用エンジン、可変ピッチプロペラ、360°任意の方向に推力を発生できる旋回式スラスト・川崎レックスペラ®などの船用推進機器の設計・製造を行ってきた。それらの性能向上、改善により船舶の省エネ・省CO2排出に貢献してきたが、さらに、2014年よりハイブリッド推進システムの開発を行い、製品化している。主機、発電機、バッテリーなど複数のエネルギー源を最適に制御するパワーマネジメント技術と、現時点でゼロエミッション航行に欠かせないバッテリーマネジメント技術に重点を置いた開発を行い、必要な動力、電源品質を確保しつつ、経済効果と排気ガス低減を達成するシステムパッケージの提案を行っている。

環境対応推進システムは、上述のように複数のパターンがあり、船舶の大きさや運用によって適したシステムは異なる。本船の役割や運用、得たい効果など船全体を俯瞰することが重要であり、川崎重工業では船主と十分なコミュニケーションを取り、構想の早い段階で最適化を図っている。

3. ゼロエミッションバッテリー推進タンカー「あさひ」の概要と特徴

3.1 バッテリー推進システムの特徴

バッテリー推進システムのメリットとしては、二酸化炭素 (CO₂)、窒素化合物 (NO_x)、硫黄化合物

(SOx)、煤煙などの排出を大幅に削減できることが挙げられる。さらに、主機が無いことによる騒音・振動の低減により、乗組員の居住環境や、港湾周辺地域環境の改善が図れる点も、バッテリー推進システムのメリットである。

一方、バッテリー推進システムに用いられるバッテリーは、一般的な船舶用燃料として使用されている重油と比べてエネルギー密度が大幅に小さいため、航続距離に課題がある。システム構成的には簡単に見えるが、実運用上はチャレンジングな試みであり、バッテリーのみで船舶運航の全エネルギーを供給するシステム構成が採用されているのは、定期航路の短距離フェリーなど一部の限られた船種のみである。

3.2 「あさひ」の仕様検討

船用燃料供給船には、大きく①荷役作業（本船への燃料油積込み、他船への燃料油供給）、②荷役場所への航海（航行）、③出入港、離着岸、燃料供給対象船への離接舷、④停泊（運航中待機、係船地）の4つのオペレーションがあり、それぞれのオペレーションにおける主要使用機器は次の通りである。

表1 各オペレーションにおける主要使用機器

①荷役	カーゴポンプ（他船への燃料供給時）、制御機器等船内機器
②航行	推進動力（プロペラ）、船内機器
③出入港、離着岸、離接舷	推進動力（プロペラ）、サイドスラスト、甲板機
④停泊	（待機時）ポンプ等船内機器、（係船地）調理器等生活用機器

バッテリー推進システムにおいて一番大きなファクターであるバッテリー容量は、エネルギー使用のシミュレーションを実施し決定した。バッテリー容量に関わる要因として、各オペレーションの運転時間、オペレーションのエネルギー消費量がある。荷役作業場所は東京湾内に分布しており、かつ1日の荷役回数が異なるため、様々なオペレーションパターンの考慮が必要である。そこで、船主より現行船の運航データや航行距離等を受領し、本船仕様にカスタマイズしてシミュレーションのインプットデータとして利用した。また、推進性能やバッテリーへの知見もバッテリー容量を決定する上で重要な要素となる。推進性能はこれまで多数のプロペラを納めてきた船用部門の経験を、バッテリー技術は

技術開発部門のバッテリーチームの知見を生かしてシミュレーションを実施し、総合重工としての強みを生かして取り組んだ。これらの情報を基にエネルギー使用のシミュレーションを実施し、本船の運航に必要なバッテリー容量を決定した。また、算出されたバッテリー容量で実際の運航が可能であるかの確認作業も行っている。

バッテリーへの充電は陸上電力を使用する、プラグイン型システムを採用している。本船の運用では、1日の運航を終えて帰港した後、夜間の停泊中にバッテリーを充電し、翌朝また出港することとなる。川崎重工業は陸上設備会社と協力して、充電の要領や夜間停泊中に充電を完了するための給電容量について検討を行っている。

こうして決定したバッテリー容量を踏まえ、船主、造船所と協議を行って船内の配置検討を行った。バッテリー推進の配置のフレキシブル性を生かしてバッテリーは船首側に2層に分けて配置し、乗組員の居住エリアを大きく確保しながら、必要な供給用燃料の積載量を確保できる船内配置を実現した。

船用燃料供給船は出入港、離着岸、燃料供給対象船への離接舷を頻繁に行うため、高い操船性が要求される。そこで推進装置としてアジマススラストx2基、サイドスラストx2基の構成を提案した。推進装置の出力は必要な速力を確保しつつ、総トン数499トンの船体への配置を考慮して決定した。

上述の検討を基に、次の本船仕様とした。

表2 「あさひ」の仕様

寸法	全長62m／全幅10.3m／喫水4.15m
速力	約10ノット
タンク容量	1,277m ³
推進装置	アジマススラスト 300kW x 2基 サイドスラスト 68kW x 2基
バッテリー容量	3,480kWh

3.3 大容量バッテリー推進システム

川崎重工業が担当する大容量バッテリー推進システムは、大容量リチウムイオンバッテリー、配電盤、電力管理装置、電力変換器盤、主電動機、アジマススラスト（川崎レックスペラ®）、推進制御装置、サイドスラストなどから構成されている（図6参照）。

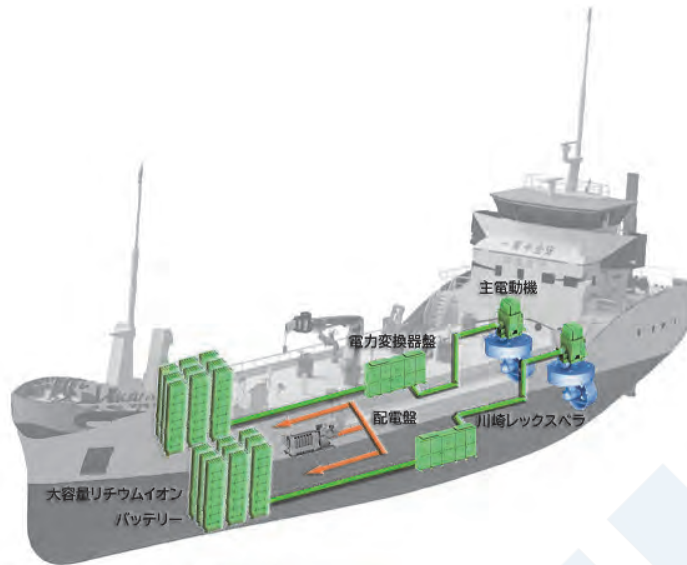


図6 大容量バッテリー推進システム

図6に示すように、リチウムイオンバッテリーは電力変換器盤に結合されている。バッテリーの電力は、電力変換器盤で主電動機、配電盤に配分され、それぞれ推進動力、船内電力として使用される。3.2節に示したように、本船には①荷役、②航行、③出入港等、④停泊の4つのオペレーションがあり、これら4つのオペレーションに対して次のモード設定を行った。

表3 運転モードの定義

荷役モード	カーゴポンプを使用し、燃料供給対象船へ燃料を供給するモード
航行モード	アジマススラストを使用し、航行を行うモード
出入港モード	アジマススラスト、サイドスラストを使用し出入港、離着岸、燃料供給対象船への離接舷を行うモード
停泊モード	アジマススラスト、サイドスラストを停止し、停泊するモード

これらをスムーズに使い分けることは本船運用効率面から非常に重要である。また、荷役作業中に推進機器が誤って作動することの無いよう安全面も考慮する必要がある。運用と安全の両面を考慮し、推進機器を使用する航行モード、出入港モードと、荷役モードの切り換えには一旦停泊モードを経由するモード切り換えを設定している。

4つのオペレーションモードでは使用する機器が異なり、航行モードでは推進動力が大きく、荷役モード、出入港モードでは船内電力が大きく必要と

なる。そのため、オペレーションモードに基づいて、必要な推進動力、船内電力をシームレスに切り替えることが重要である。これを意識した作動機器の切り換え、電力配分変更は操船者の負担となるため、本船用システムでは、オペレーションモードを自動判別し、自動でエネルギー配分を切り換える機能を搭載している。この機能は推進制御装置においてエネルギー／パワーフローを最適に管理することで実現している。なお、係船地での停泊モードでは、陸上電源設備から電力供給を受け、バッテリーに充電を行う。

またオペレーションモード切り換えや推進動力、船内電力の管理の他に、バッテリーの充放電管理も、推進制御装置が統合的制御を行っている。

3.4 システムの安全性

現在、バッテリー推進システムに関するNK船級規則は策定されておらず、バッテリー室やバッテリーそのものに関する設計は、NKが発行している大容量蓄電池ガイドラインに基づき実施した。安全性に関しては、本ガイドラインの第4章9項でリスク評価の実施が要求されており、HAZID (Hazard Identification) を用いてシステムの安全性の確認を行っている。HAZIDとは、対象となるシステムが人命や環境にどのような影響を与えるか、想定される事象(ハザード)を洗い出し、発生頻度や影響度と合わせてシステムの安全性を検討する評価手法の一つで、通常時及び火災などの異常時の運航状態におけるリスクを検証し、安全対策の検討を行っている。本船のHAZIDは、船主、基本設計会社、川崎重工業が参加してリスクアセスメントを実施したが、第三者の視点での安全性評価するため、NK及びリスクアセスメントのファシリテータも兼ねて株式会社

ClassNKコンサルティングサービスに参加していただいている。

HAZIDでは、本船に関するハザードをリチウムイオン蓄電池システム、電氣的、熱的などハザードの起因ごとに洗い出している。以下に代表的なハザードの例を示す。

- ①バッテリーの過充電
- ②バッテリーの熱暴走*2
- ③制御装置の異常

これらのハザードに対して、HAZID前の段階での設計の妥当性を評価し、追加安全対策の要否について協議を行った。その結果、HAZID時の設計、及び追加の安全対策を実施することで、全てのハザードのリスクが許容される範囲に抑えられていることを確認し、これら安全確認した設計を本船に実装している。

3.5 バッテリーの取扱い及び注意点

携帯電話など身近な電子機器でもバッテリーは使用と共に劣化してその性能が徐々に落ち、有寿命であることが知られている。また、最近は少なくなったが、過去にはモバイルバッテリーが爆発する事故例がテレビなどで報道されていた。船舶で大容量バッテリーを使用するにあたっての注意点として、以下が挙げられる。

①温度管理

バッテリーを使用するための周囲環境の温度管理を適切に行うことが重要である。適切な温度管理ができていないと、バッテリーの劣化が早まる可能性があり、バッテリーを主電力源とするバッテリー推進システムにとっては致命的となる。そこで、造船所、エアコンメーカー等と協議を行い、バッテリーからの発熱やバッテリー室への外部入熱を加味してエ

アコン選定を行っている。

②消防法の適用

リチウムイオンバッテリーには、第四類第二石油類に該当する可燃性の液体が電解液として含まれている。保管や造船所での艀装工事においても、消防法又は、各自治体の条例に従った適切な取り扱いに留意する必要がある。

③バッテリー室の消火装置

バッテリー室の消火装置はCO2消火装置を採用している。火災発生時に確実に消火を行えるよう、制御場所や消火剤の格納場所についても、HAZIDにて協議を行っている。

3.6 「あさひ」の特徴

本船では、複数の操船要素を統括して操縦することができる統括操縦装置 KICS (Kawasaki Integrated Control System) を採用している。操船性を向上させ、離着岸などにかかる時間を短縮することは、船舶運航に必要なエネルギーを減少させ、バッテリー推進システムにおいてはバッテリー容量の低減につながる。通常の操船で、操船者が船体を意図する方向に移動させるためには、複数の推進機を同時に操作する必要がある。KICSは、ジョイスティックとダイヤルを操作することで、ジョイスティックを倒した方向に船体を移動させ、ダイヤルを回した方向に船体を回頭(旋回)させる装置である(図7参照)。操船者のジョイスティック、ダイヤル操作に応じて複数の推進機が出すべき力の大きさ、向きを計算し、各推進機に指令を出すことができる。これにより離着岸など難しく気を遣う作業においても、直感的な操作のみで操船を行うことが可能となる。

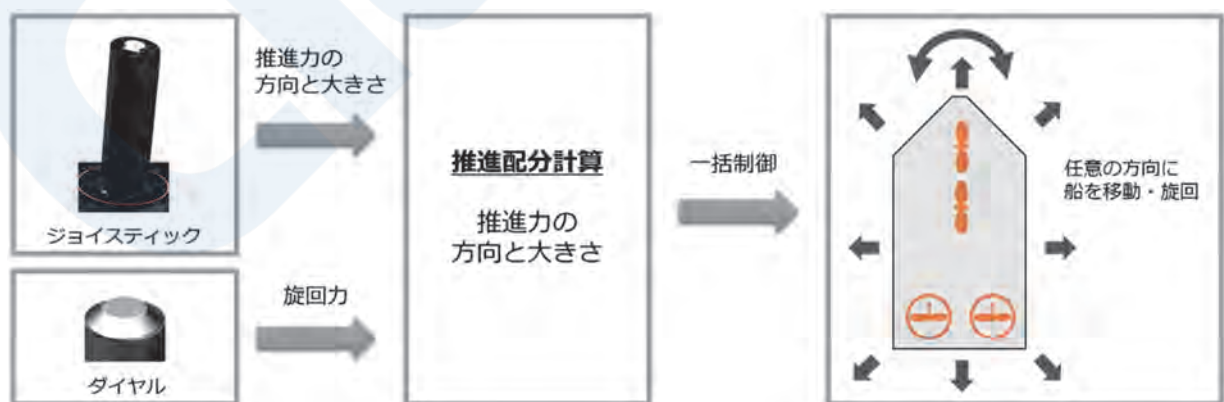


図7 KICSの概要

*2 何らかの要因でバッテリー内部の特定部材が発熱、その発熱がさらに他の部材の発熱を引き起こし、バッテリー温度の上昇が続くことである。主な要因としては、内部短絡や外部短絡、過充電、外部からの加熱などがある。

もう一つの特筆すべき特徴に、船主、株式会社e5ラボのアイデアによる、大規模自然災害時の緊急電源としての利用がある。船内のバッテリーに蓄えた電気を非常用電源として陸上で活用することで、地域社会のBCP（事業継続計画）やLCP（生活継続計画）への貢献が可能である。また船舶ということで、渋滞や道路の遮断等により陸上の交通網が機能しない状況であっても、海上から電力を必要とする地点へアクセスができるため、緊急事態対応の可能性を広げることになる。

4. 今後の展望

4.1 船舶に応じた最適システム構成

バッテリーは技術革新によって高エネルギー密度化が進んできたとはいえ、船舶用燃料として使用されている重油と比べるとエネルギー密度が大幅に小さい。このため、船のスペースとの兼ね合いからバッテリーのみでの航続距離には限界がある。比較的航続距離が長い船や大きな船は出入港のみバッテリー推進とするなど、内燃機関とのハイブリッド推進が現実的となる。船内スペースや航続距離に加え、充電ポイント（充電間隔）、充電に取れる時間なども考慮すべき要素となるほか、船の配置面、運用面だけでなく、陸側充電設備を含めた全体でのソリューションを検討する必要もある。

また、荷役や洋上作業など、船種によってオペレーションは様々であり、それぞれ最適な主機や発電機の大きさ、バッテリー容量、システム構成は異なる。川崎重工業はそれぞれの船のオペレーションや船主のご要望に応じて、あらゆるサイズ、船種の船舶に対して最適なシステム構成を提案する。

さらに、バッテリーハイブリッド／バッテリー推進システムは近年低環境負荷燃料として採用が進むLNGエンジンや、将来の脱炭素燃料として期待される水素、アンモニアといった将来燃料を使用したエンジン、燃料電池などの動力源との親和性も高い。本システムとの組み合わせによって将来も含めたGHG削減オプションとしても提供可能である。

4.2 ガス専焼エンジン+バッテリーハイブリッド推進システム

川崎重工業は船用ガス専焼エンジン（図8参照）と大容量リチウムイオンバッテリーを組み合わせたハイブリッド推進システムを開発・初受注した。ハイブリッド推進システムの基本構成はガス専焼エンジンと大容量リチウムイオンバッテリーであるが、川崎重工業はシステムインテグレータとしてガス燃料供給システム、可変ピッチプロペラやサイドスラ

スタ等の推進機、電力変換装置、推進用制御装置等といった機器を併せて所掌する。航海状況に応じこれらの機器を適切に制御し、必要な推進力を維持しつつCO2削減に最適な運転を実現する。

航行時には減速機を介したガス専焼エンジンによる推進を行うと同時に、軸発電機にて発電した電力を船内電力の供給とバッテリーへの充電に用いる。ガス専焼エンジンは熱効率を高く維持できる高負荷領域で継続運転することができ、従来船の様に船内電力供給のために発電機を別途運転する必要もない。また、悪海象時には推進力と発電量のバランスを適切に制御することで、ガス専焼エンジンは高負荷での運転を継続できる。入出港時や停泊時はガス専焼エンジンを停止し、航行時に充電したバッテリーにて電気推進と船内電力の供給を行う。これによってゼロエミッション運転を実現する。



図8 船用ガス専焼エンジン

4.3 船用リチウムイオンキャパシタ

バッテリーハイブリッド／バッテリー推進システムにおいて、バッテリーなどの電力貯蔵システムの役割は、推進動力、船内電力にかかるエネルギーを供給又は貯蔵することであるが、その他の役割として、主機及び主発電機の負荷変動を吸収することも可能である。すなわち、急加速など、推進力急増時の主機負荷変動アシストや、荒天時などの推進出力変動補償を行うことで、燃費改善を行う。

上述したLNGや、水素、アンモニアといった将来燃料を用いたエンジンは、一般的に重油燃焼のディーゼルエンジンに比べて安定燃焼領域が狭く、負荷変動による失火、ノッキングが起きやすいと言われている。このため、バッテリーなどの電力貯蔵システムと組み合わせることでエンジンの負荷を安定させる

表4 LiBとLiCの比較

項目	LiB	LiC	備考
使用環境温度	15～25℃	5～45℃	
サイクル寿命	1万回以下	50万回以上	試験条件は異なる
浮遊寿命	約10年	20年以上	25℃において
充放電レート	約3C	100C	1C：1時間で全電力を放電

ことで、これらの新燃料エンジンへの適用範囲，運転可能領域の拡大に寄与できる。

川崎重工業はこのような電力貯蔵システムの負荷変動吸収用途にいち早く着目し，船用リチウムイオンキャパシタ（LiC）（図9参照）を用いた電力貯蔵システムの開発を進めてきた。

LiCは出力密度が高く（瞬時に大電力を充放電できる），繰り返し充放電に対する寿命が非常に長い蓄電デバイスである。同じ蓄電デバイスであるリチウムイオンバッテリー（LiB）の代表的な仕様との比較を表4に示す。LiBは高いエネルギー密度を有し，長時間のエネルギー供給に適しているが，充放電の繰り返しによる劣化が大きく，出力密度が低い。一方，LiCはエネルギー密度が低く，長時間のエネルギー供給には向いていないが，出力密度が高く，繰り返し充放電に対する寿命が非常に長いといったメリットがある。このため，LiC単独で船舶の推進，給電用途には使えないが，負荷変動吸収用途に限定することで大幅な小型化，低コスト化，長寿命化が期待できる。



図9 船用リチウムイオンキャパシタ

5. まとめ

IMOによる各種排ガス規制強化が進む中，海運業界では一般的に利用されてきた重油に代わるク

リーンな動力源の利用に大きな期待と注目が集まっており，運航時における二酸化炭素（CO₂），窒素酸化物（NO_x），硫黄酸化物（SO_x），粒子状物質（PM）の排出量を大幅に削減できるバッテリー推進システムはその一つである。また船ごとに異なる最適なシステム構成を提供し，本稿に示したシステムが広く普及することが，地球環境改善へ貢献することとなり，川崎重工業もその一端を担っていきたいと考えている。

川崎重工業は今後も，お客様の要望に沿った環境性，経済性に優れ，オペレーションに最適化されたシステムの供給に注力していく。

参考文献

- 1) 旭タンカー株式会社，次世代内航電気推進タンカー船「あさひ」竣工について
<https://www.asahi-tanker.com/news-release/2022/647/>（参照日 2022年8月1日）
- 2) 前川真吾，船舶からの排ガス削減に向けて一船用推進システムの電動化・ハイブリッド化 日本マリンエンジニアリング学会誌 第57巻 第2号（2022）P20-24

「付加製造（3Dプリンティング）に関するガイドライン」の紹介

大滝 一紀*

1. はじめに

近年、3Dプリンティングに代表される付加製造技術を用いた金属製品の開発が急速に普及し、特に自動車、航空宇宙、医療、産業機器等の分野において同技術が活用されている。その理由として、付加製造の特徴である、従来は不可能であった形状の造形能力が挙げられる。この能力により、三次元の複雑形状、格子構造、傾斜構造等の造形が実現し、高度に設計された製品の製造が可能となることから、今後のものづくりに大きな変革をもたらす技術といわれている。

付加製造の歴史は長く、1980年代初頭に日本において紫外線及び感光性樹脂を用いた光造形法を発明したことに始まるといわれ、後に米国企業や日本企業が事業化した。当初は樹脂造形を中心としたものであったが、米国において金属材料への適用についても研究が開始され、現在までに多数の付加製造装置が開発されている。

昨今、各種製造業においてはコスト削減や生産性向上が強く求められており、その打開策として省人化しつつ効率的に製品製造が可能となる付加製造技術が注目されている。加えて、付加製造装置の市場規模も年々拡大している。このため、付加製造技術を用いる製品製造の分野は今後更に拡大し、船用機器の分野においても活用されることが見込まれる。

このような背景から、本会では付加製造技術の紹介を目的として、用語、当該技術の分類、特徴等を纏め、加えて、当該技術を用いて製造された金属製船用機器等の承認要件についても取り纏めた付加製造（3Dプリンティング）に関するガイドラインを策定した。以下、当該ガイドラインの内容を紹介する。

2. ガイドラインの紹介

2.1 付加製造に関する基礎知識（本会ガイドライン中の第1部）

2.1.1 用語

本ガイドラインにて使用する用語は付加製造

(Additive Manufacturing：以下、「AM」という。)技術における基本的な用語であることから、ISOやJIS等の国際規格又は国家規格を参考に規定している。具体的に参考とした規格は以下の通りである。

- (1) ISO/ASTM 52900：2015 “Additive manufacturing – General principles – Terminology”
- (2) JIS B9441：2020 「付加製造（AM）-用語及び基本的概念」

2.1.2 付加製造技術（AM技術）

AM技術の種類として、以下の表1に掲げる7種が定義されている。このうち、現在、金属製品の製造に主として用いられているAM技術は、粉末床熔融結合（Powder Bed Fusion）及び指向性エネルギー堆積（Direct Energy Deposition）が一般的であるが、本ガイドラインにおいては、表1に掲げる全7種のAM技術に対する概要、造形用材料、積層後の工程を紹介している。その他、各造形用材料に対して使用されている主なAM技術の分類についても紹介している（図1）。

表1 AM技術の種類

AM技術	
1	結合剤噴射 (Binder Jetting : BJT)
2	材料噴射 (Material Jetting : MJT)
3	粉末床熔融結合 (Powder Bed Fusion : PBF)
4	指向性エネルギー堆積 (Directed Energy Deposition : DED)
5	シート積層 (Sheet Lamination : SHL)
6	液槽光重合 (Vat Photopolymerization : VPP)
7	材料押出 (Material Extrusion : MEX)

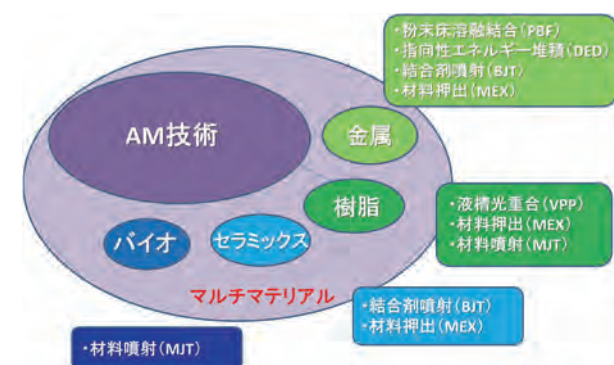


図1 各造形用材料に対して使用されている主なAM技術の分類

* 開発本部 機関開発部

2.2 AMにより製造される金属製船用機器等の取り扱い（本会ガイドライン中の第2部）

2.2.1 一般

(1) 適用

本会ではAM技術は鋳造技術の代替手法と捉え、これまで鋳造技術を用いて製造されてきた製品・部品が、近い将来AM技術を用いて製造される場合があることを予想している。従って、船舶に使用される鋳造製品であり、且つ本会が承認を要求している製品が本ガイドラインの適用対象となると考えている。具体的な対象としては、船用材料・機器等の承認及び認定要領第1編3章に掲げる金属製品（NK船用材を使用）（表2）を想定している。一方で、表2以外の金属製品（非NK船用材を使用）に対する承認要望へも応えられるようにすべく、別途承認スキームを用意しており、その内容は2.2.5で紹介する。

表2 適用対象となる製品例

材料区分	用途区分
鋳造鋼製品*	(1) 船体用部品（例：船尾材、舵骨、舵頸材等）
鋳造低合金鋼製品	(2) 内燃機関用部品（例：連接棒、ピストン棒、ピストンクランク、シリンダカバー等）
鋳造ステンレス鋼製品	(3) クランク軸
鋳造低合金鋼製品	(4) 推進軸系用部品（例：スラスト軸、中間軸、プロペラ軸等）
鋳造球状黒鉛鋼製品	(5) 動力伝達装置用部品（例：減速歯車、減速歯車軸等）
鋳造ねずみ焼結品	(6) 蒸気タービン用部品（例：タービンロータ、タービンディスク、タービン羽根等）
鍛造炭素鋼製品*	(7) 配管用品（例：弁、管取付け物等）
鍛造低合金鋼製品	(8) 揚貨装置用部品（例：ガスネックピン、ガスネックブacket）
鍛造ステンレス鋼製品	(9) ボイラ及び圧力容器（低圧用は除く。）用部品
鍛造低合金鋼製品	(10) 液化ガスばら積船用部品

(2) 承認までの流れ

本ガイドラインにおける承認の流れを図2に示す。前(1)で述べた通り、表2に該当する製品をAM技術を用いて製造する際、図2における「NK船用材」と記したフローが適用となる。一方、表2以外の金属製品（非NK船用材を使用）に対して任意での承認を希望する場合には、「非NK船用材」と記したフローが適用となる。なお、図2に示すフロー中の各項目の詳しい内容については、2.2.2に「造形用材料の認定」、2.2.3に「製造方法の承認」、2.2.4に「製品の試験・検査」、2.2.5に「製造予定製品の事前審査」に関する内容を記載している。

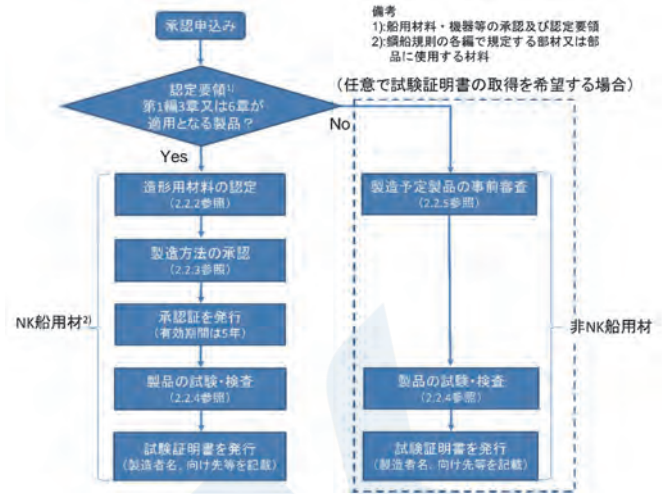


図2 承認の流れ

(3) 造形用材料と製品の材料記号

AMに関する造形用材料と製品の材料記号については、本会の鋼船規則K編又は本会が適当と認める国際規格又は国家規格等（例JIS、ISO等）の公的規格に規定される材料記号を使用する。

AM用の造形用材料については、同材料記号の後ろに-F-AM、続いて以下に記載の熱処理の表示記号（表3）、AM技術に関する表示記号（表4）を追加する。必要に応じて、本会の鋼船規則M編6章に規定される水素量に関わる記号（-H5、-H10、-H15）も使用する。

AMにより製造された製品については、同材料記号の後ろに-AM、続いて表3に記載の熱処理の表示記号、表4に記載のAM技術に関する表示記号を追加する。

表3 熱処理の表示記号

-A	付加製造まま(as printed)
-SR	応力除去焼鈍(stress relieve heat treated)
-SA	溶体化処理(solution annealed / e.g. for homogenization)
-HIP	熱間等方圧加工法(hot isostatic pressed)
-HPHT	高圧熱処理(high pressure heat treatment)
-X	その他の熱処理

表4 AM技術に関する表示記号

MJT	材料噴射 (material jetting)
PBF-LB	レーザービーム粉末床溶融結合 (powder bed fusion for laser beam melting)
PBF-EB	電子ビーム粉末床溶融結合 (powder bed fusion for electron beam melting)
PBF-SL	レーザー焼結粉末床溶融結合 (powder bed fusion for selective laser melting)
LMD	直接金属レーザー焼結法 (laser metal deposition)
WAAM	ワイヤアーク焼結法 (wire arc additive manufacturing)
その他のAM技術	本会の適当と認めるところによる。

一例として、材料記号の記載例を以下に示す。

KSCA45-F-AM-A-WAAM:

ワイヤアーク焼結法によってAMされたままの低合金鋼鋼品KSCA45用の造形用材料

KFCD45-AM-A-PBF-LB:

レーザービーム粉末床溶融結合によってAMされたままの球状黒鉛鋳鉄KFCD45のAM製品

2.2.2 造形用材料の認定

(1) 認定までの流れ

造形用材料の認定の流れを図3に示す。ここでいう「申込」は、造形用材料の材料供給者が行うことを想定している。なお、各項目の詳細については、以下の(2)以降で紹介する。本会では、本会船級船として登録している船舶における船体構造やエンジン等の主要な構造物等に対し、本会が承認した材料の使用を要求しており、AMにより製造される金属製船用機器等の材料においても同じ考え方を適用している。



図3 造形用材料の認定までの流れ

(2) 提出書類

認定に際し、最低限提出が必要となる書類を表5に示す。なお、既に造形用材料について本会の認定を受けており、その際に提出した書類と重複するものがある場合にあっては、提出書類の一部を省略することができる。

表5 造形用材料の認定のための提出書類

提出書類	
①	造形用材料の認定申込書
②	認定試験方案（合否基準を含む）
③	製造工場の概要 (a) 製造所名及び所在地 (b) 沿革 (c) 組織及び従業員数
④	製造工程に関する資料 (a) 製造工程（主要製造工程毎のフローチャートを含む） (b) 主要製造設備の概要
⑤	造形用材料に関する資料（材料供給者に関する社名、所在地等の情報を含む） (a) 造形用材料の製造方法、タイプ (b) 造形用材料特性（例：粉末の流動性、充填性。） ● ワイヤタイプ：心線の種類、化学成分、受入、伸線、防錆、ワイヤ径に関する資料 ● 粉末タイプ：主要成分、密度、表面積、粒度分布、流動特性、均一性/同等性、形態的特徴、粒子間摩擦、粒子凝集等に関する資料 (c) 付加製造した製品の特性（引張強度範囲等/付加製造技術毎） (d) 造形用材料製造所における管理方法 (e) 再利用基準及びその方法（該当する場合）
⑥	造形用材料の品質管理に関する資料 (a) 品質管理体制、管理基準 (b) 社内検査規格及び検査設備 (c) 社内検査部門及び苦情処理部門 (d) 出荷証明書の例
⑦	主要な造形用材料の製造実績に関する資料
⑧	造形用材料の化学成分に関する資料
⑨	熱処理に関する資料（実施する場合）
⑩	貯蔵方法及び開封前/開封後の保存期間に関する資料
⑪	包装、荷造、表示、トレーサビリティに関する資料
⑫	使用方法、適用する付加製造技術（推奨条件等を含む）に関する資料
⑬	その他本会が必要と認める資料

(3) 認定基準調査（実情調査）

本調査では、造形用材料を安定した作業の下で認定試験に使用した造形用材料と同等又はそれ以上のものを均一旦つ継続した品質で製造し得る能力（設備、技術、品質管理及び社内検査部門）があるか否かを確認することを目的としている。なお、調査に際し、主に以下の項目について確認を行うこととしている。

- 製造工程
- 社内検査部門及び苦情処理部門
- 製造設備及び検査設備
- 各種社内規格、作業標準及び品質管理体制とその実施状況

(4) 認定試験

承認された試験方案に従い、以下の項目（表6）に関する試験の実施を規定している。本試験では、材料の健全性を確認することを目的としている。

表6 認定試験

試験項目	試験内容
化学成分分析	JIS G 0321等の本会が適当と認める方法で化学成分分析を実施し、分析結果が事前に提出した資料（提出資料⑧）の数値通りとなっているか確認する。
引張試験	造形用材料を用いて製造される製品（認定最大寸法）と同時に作成された試験片を用いて、引張試験を実施し、試験結果が事前に承認された試験方法に記載の合否基準に適合するか確認する。なお、引張試験片に関しては、急激な溶融凝固による組織の異方性を考慮し、図4から図6に示すように各角度に対し少なくとも3本の試験片を作成しなければならない。
組織観察	試験片に対し、x、y、z各方向の断面における組織観察を実施し、破壊の原因となり得る欠陥（空隙や未溶融不良等）が無く、組織が連続となっていることを確認する。
その他の試験 （本会が必要と認めた場合）	硬さ試験、曲げ試験、衝撃試験、表面粗度試験、脆性破壊試験、疲労試験、腐食試験、水素試験、粉末再利用試験、粒度分布試験、粒子形態試験、金属粉末流量試験、安息角試験、せん断強度試験、圧縮強度試験等を追加で要求することができる。

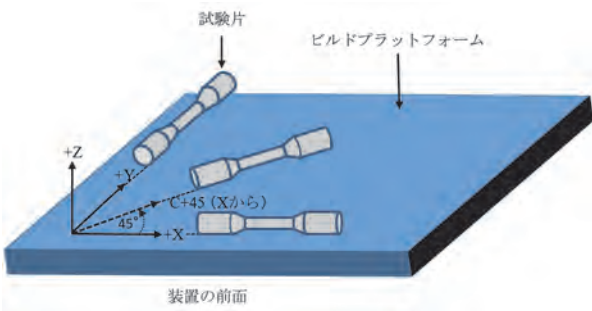


図4 引張試験片【0°】

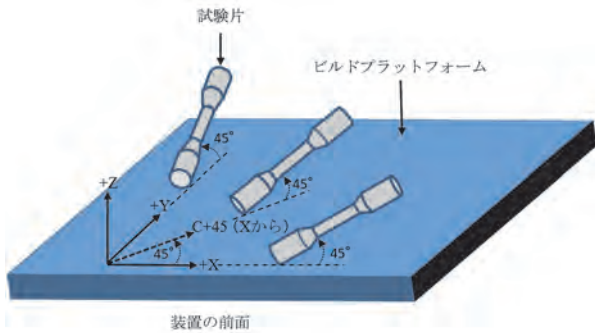


図5 引張試験片【45°】

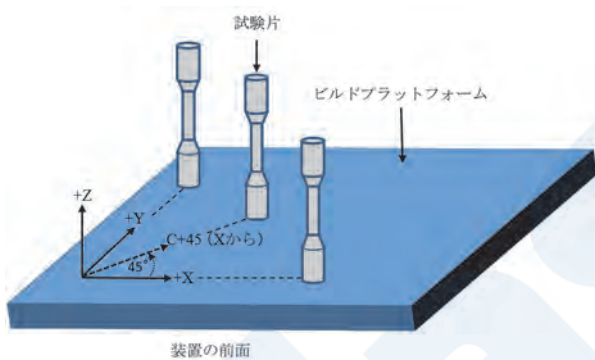


図6 引張試験片【90°】

する製造方法として適切であると判断できた際の証明を意味する。当該承認における流れを図7に示す。なお、ここでいう「申込」はAMシステムの全体を管理する所有者が行うことを想定している。



図7 製造方法の承認までの流れ

(2) 提出書類

承認に際し、最低限提出が必要となる書類を表7に示す。なお、既に製品について本会の承認を受けており、その際に提出した資料と重複するものがある場合は、提出資料の一部を省略することができる。

表7 製造方法の承認のための提出書類

提出書類	
①	製造方法の承認申込書
②	承認試験方案 (合否基準を含む)
③	製造工場の概要
	(a) 製造所名及び所在地
	(b) 沿革
	(c) 組織及び従業員数
④	使用する付加製造装置に関する資料 (最大寸法, 最大板厚を含む)
⑤	製造工程に関する資料 (溶着速度, トポロジー最適化に関する資料を含む)
⑥	造形用材料に関する資料 (材料供給者に関する社名, 所在地等の情報を含む)
	(a) 製造方法
	(b) 造形用材料特性 (例: 粉末の場合は, 粉末の流動性, 充填性。)
	(c) 管理方法
	(d) 再利用基準及びその方法 (該当する場合)
	(e) 品質管理
⑦	製品の品質管理に関する資料 (試験機等を含む)
	(a) 品質管理体制, 管理基準
	(b) 社内検査規格及び検査設備
	(c) 社内検査部門及び苦情処理部門
	(d) 出荷証明書の例
⑧	熱処理方法に関する資料 (該当する場合)
	(a) 熱処理炉 (タイプ, 寸法, 熱源熱電対位置等)
	(b) 熱処理条件 (温度, 保持時間, 冷却媒質等)
	(c) 熱処理記録方法
⑨	非破壊試験に関する資料 (従事者名簿を含む)
⑩	主要製品の製造実績に関する資料
⑪	製品の化学成分及び機械的性質に関する資料
⑫	製品の溶接性に関する資料 (該当する場合)
⑬	表面状態 (粗度, 仕上げ状態等) に関する資料
⑭	補修要領に関する資料 (きずの許容条件を含む)
⑮	その他本会が必要と認める資料

(5) 合否基準

合否基準は鋼船規則K編又は本会が適当と認める国際規格又は国家規格等 (例JIS, ISO等) の公的規格に基づき、申込者が設定することとしている。

(6) 認定通知

実情調査及び試験成績書により、本会が適当と認めた造形用材料に対して、銘柄ごとに、認定品証明書を発行する。なお、当該証明書の有効期限は発行日から1年を経過した日とする。

2.2.3 製造方法の承認

(1) 承認までの流れ

製造方法の承認とは、製品の品質の均一性を前提として、あらかじめ代表的な個品に対する製造方法、品質管理を確認した上で、製品に対して審査、試験及び検査を行い、当該製品に対

(3) 実情調査

本調査は、申込者が製品を均一な品質で製造できる設備、工程、品質管理等を有していることの確認を目的としている。なお、本調査は実際のAMシステム及び製造工程等を調査できるよう、適当な時期に行うこととしている。

(4) 承認試験

承認された試験方案に従い、以下の項目 (表8) に関する試験の実施を規定している。本試

験では、あらかじめ決められた製造方法に基づき製造された製品を用いて、当該製造方法の妥当性について確認することを目的としている。

表8 製造方法の承認試験

試験項目	試験内容
引張試験	製品と同時に作成された試験片を用いて、引張試験を実施し、試験結果が事前に承認された試験方法に記載の合否基準に適合するか確認する。なお、引張試験片に関しては、造形用材料の認定試験と同様に、前図4から図6に示すように各角度に対し少なくとも3本の試験片を作成しなければならない。
組織観察	試験片に対し、x, y, z各方向の断面における組織観察を実施し、破壊の原因となり得る欠陥（空隙や未溶融不良等）が無く、組織が連続となっていることを確認する。
非破壊試験	製品に対し、使用上有害と認められる内部欠陥及び表面欠陥を検知できる方法で非破壊試験を実施し、当該製品の内部及び表面に使用上有害と認められる欠陥の有無を確認する。
外観検査	製品に対し、目視により外観検査を実施し、製品表面において、使用上有害と認められる欠陥の有無を確認する。
化学成分分析	JIS G 0321等の本会が適当と認める方法で化学成分分析を実施し、分析結果が事前に提出した資料（提出資料①）の数値通りとなっているか確認する。
その他の試験 （本会が必要と認めた場合）	硬さ試験、曲げ試験、衝撃試験、表面粗度試験、脆性破壊試験、疲労試験、腐食試験、せん断強度試験、圧縮強度試験、溶接性試験等を追加で要求することがある。

(5) 合否基準

合否基準は鋼船規則K編又は本会が適当と認める国際規格又は国家規格等（例JIS, ISO等）の公的規格に基づき申込者が設定することとしている。

(6) 承認証

実情調査及び試験成績書により、本会が適当と認めたAMシステムを用いた製品に対する製造方法を承認し、承認証を発行する。なお、当該承認証の有効期限は承認の日から5年とする。

2.2.4 製品の試験・検査

(1) 製品の試験・検査の流れ

製品の出荷に先立ち行う試験・検査手順の流れを図8に示す。なお、ここでいう「申込」はAMシステムの所有者や本試験・検査の実施を請け負ったAMシステムの所有者が行うことを想定している。



図8 製品の試験・検査の流れ

(2) 提出書類

製品の試験・検査に際し、本会へ試験・検査方案の提出が必要となる。なお、本試験・検査に対する合否基準についても当該方案へ含めることとしている。

(3) 試験・検査

承認された試験・検査方案に従い、以下の項目（表9）について試験・検査の実施を規定し

ている。本試験では、代表的な製品を用いて製品の健全性を確認することを目的としている。

表9 製品の承認試験

試験項目	試験内容
機械試験	以下の試験を行い、承認された試験・検査方法に記載の合否基準に適合するか確認する。 (1) 引張試験（表6参照） (2) 硬さ試験 (3) 衝撃試験※ （※使用する造形用材料によっては、本会が本試験の省略を認める場合もある。）
組織観察	試験片に対し、x, y, z各方向の断面における組織観察を実施し、破壊の原因となり得る欠陥（空隙や未溶融不良等）が無く、組織が連続となっていることを確認する。
非破壊試験	製品に対し、使用上有害と認められる内部欠陥及び表面欠陥を検知できる方法で非破壊試験を実施し、当該製品の内部及び表面に使用上有害と認められる欠陥の有無を確認する。
外観検査	製品に対し、目視により外観検査を実施し、製品表面において、使用上有害と認められる欠陥の有無を確認する。
寸法計測	製品の寸法計測を行い、設計通りの寸法となっているかの確認をする。
化学成分分析	JIS G 0321等の本会が適当と認める方法で化学成分分析を実施し、分析結果が事前に提出した資料（製造方法の承認時の提出資料①）の数値通りとなっているか確認する。
その他の試験 （本会が必要と認めた場合）	曲げ試験、表面粗度試験、脆性破壊試験、疲労試験、腐食試験、せん断強度試験、圧縮強度試験等を追加で要求することがある。

(4) 合否基準

合否基準は鋼船規則K編又は本会が適当と認める国際規格又は国家規格等（例JIS, ISO等）の公的規格に基づき申込者が設定することとしている。

(5) 刻印

試験・検査に合格した製品について、本会印を刻印する。一方、刻印することが適当でない場合には、適宜押印等の他の方法で対応する。

(6) 証明書

前(5)に加え、試験及び検査に合格したことを示す「試験検査証明書」を発行する。なお、当該証明書には有効期限に関する記載は無く、あくまで事実証明を行うものとなる。

2.2.5 製造予定製品の事前審査

(1) 審査の流れ

本審査は、表2以外の金属製品（非NK船用材を使用）に対して任意での承認を希望する場合に適用する要件であり、その審査の流れを図9に示す。なお、ここでいう「申込」はAMシステムの所有者が行うことを想定している。



図9 製造予定製品の事前審査の流れ

(2) 提出書類

AMシステムを用いた製造を予定する製品に

対する本ガイドライン適用の妥当性を確認するため、審査に際し、表10に示す書類の提出が必要となる。審査の結果、本ガイドラインの適用に特段の問題が無ければ、本会は前2.2.4に規定する試験・検査の申込を行うよう申込者へ通知する。

表10 製造予定製品の事前審査のための提出書類

提出書類	
①	製造を予定する製品の詳細資料（例：構造図面、材料供給者、造形用材料の銘柄、積層構成、内部構造等）
②	使用するAM装置の仕様書
③	製造を予定する製品のAM工程に関する資料（ビルドチャンバ内又はビルドプラットフォーム上のどの位置においても、均一な品質でAMが可能であることを示す資料を含む）
④	品質管理に関する資料（造形用材料の受け入れ基準を含む）
⑤	製品の化学成分及び機械的性質に関する資料
⑥	その他本会が必要と認める資料

(3) 試験・検査

前2.2.4の要件に規定する試験・検査を実施し、製品の健全性を確認する。当該試験・検査に際し、合否基準を含む試験・検査方案を作成し、本会へ提出することが必要となる。また、当該合否基準作成にあつては、鋼船規則K編又は本会が適当と認める国際規格又は国家規格等（例JIS, ISO等）の公的規格によることとしている。

(4) 刻印

前2.2.4と同様に、試験・検査に合格した製品に対し、本会印を刻印する。一方、刻印することが適当でない場合には、適宜押印等の他の方法で対応する。

(5) 証明書

前2.2.4と同様に、試験及び検査に合格したことを示す「試験検査証明書」を発行する。

2.3 金属粉末の特徴（本会ガイドライン中の付録1）

AM技術を用いた金属製品の製造において重要となる金属粉末に焦点をあて、その特徴、保管・管理方法、不慮の事故への対策と対応に関する基本事項を付録1として纏めている。各項目の概要は以下の通り（表11）である。

表11 付録1における記載内容（概要）

金属粉末の特徴：	<ul style="list-style-type: none"> ✓ AMにおいて求められる金属粉末は、流動性、拡がり性、充填性が重要である。 ✓ AM技術において使用される粉末の一般的な粒径サイズは以下の通りである。 <ul style="list-style-type: none"> ・レーザービームパウダーベッド方式：20～45 μm ・電子ビームパウダーベッド方式：45～105 μm ・デポジション方式：45～105 μm
保管・管理方法：	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 湿気の多い場所は避け、冷暗所での保管が必要。加えて、乾燥剤を入れた容器又は不活性ガスで密閉して保管することが必要である。 ✓ 管理方法のマニュアル化が望ましい。 ✓ 粉末の使用前には湿度計を用いて必ず水分量（湿度）を計測し、自社で定めた閾値未満であることの管理が必要である。 ✓ 再利用粉末は、定期的に粉末形状や酸素量を測定し管理する必要がある。
不慮の事故への対策と対応：	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 金属粉末の燃焼は、①可燃物、②酸素、③着火源があることにより発火するため、これら三要素のうちいずれかを排除することが必要である。 ✓ 作業時に発火した際には、金属粉火災用消火器、乾燥砂を使用し、酸素を遮断することが必要である。なお、泡消火器は使用せず、水による消火も水素を発生するため厳禁である。

参考文献

- 1) 日本海事協会，付加製造（3Dプリンティング）に関するガイドライン，（2021）

実船モニタリングに向けた波浪情報の推定・活用

藤本 航*, 見良津 黎*, 石橋 公也*, 朱 庭耀*

1. はじめに

近年、船舶分野において実船モニタリング・デジタルツイン技術の開発が活発に行われている。例えば、推進性能分野においては、海事クラスター共同研究として「実海域実船性能評価プロジェクト(OCTARVIA)」が実施されており¹⁾、この中で船舶が遭遇する気象・海象を把握することが必要不可欠とされている²⁾。また、構造分野においても船体構造デジタルツインの研究が進められており、遭遇海象の推定についても高い関心が寄せられている³⁾。2022年3月に開催された日本船舶海洋工学会関西支部/KFR・KSSG共催シンポジウム「実船モニタリングの最前線」においては、両分野のモニタリング技術においても、波浪情報の推定・利用が共通項であり、多様な波浪情報があることが認識された⁴⁾。そして、波浪情報を安全かつ高度に活用していくには、それぞれの長所と注意点を踏まえて活用していく必要がある。

本会は業界の研究開発を促進すべく、各種モニタリング・デジタルツインプロジェクトに参画し、波浪データ解析も実施してきた。こうした取り組みの中で、各種アプリケーションに対する波浪データの要件について一定の知見を得た。

本稿においては、船舶構造デジタルツイン等も含む意味で「実船モニタリング」と総称し、実船モニタリングに対する波浪データの活用について検討する。まず初めに、一般に普及している観測機器や解析手法を概説した後、主要な波浪情報の特徴を俯瞰的に比較しつつ、実船モニタリングへの活用に対する適合性について考察する。

2. 船上観測値：レーダーを中心として

船体周辺の広い波浪場を観測する機器として、レーダーが有力であり、近年注目を集めている。ただし、波の山に隠れて直接観測できない範囲が多いため、その範囲を何らかの手法で補間する必要がある。以降、レーダーの観測原理と、種類、特徴や注意点について概要を説明する。

2.1 レーダーの原理

マイクロ波は、表面張力波の波長と近いため、Bragg共鳴散乱という機構によって、マイクロ波の照射方向と反対側に強く散乱する(図1)。そのため、レーダーで波浪を観測できるのは、表面張力波が生じるほどに風速がある場合に限られる。なお、表面張力波とはその名の通り表面張力を復元力として生じるさざ波である。

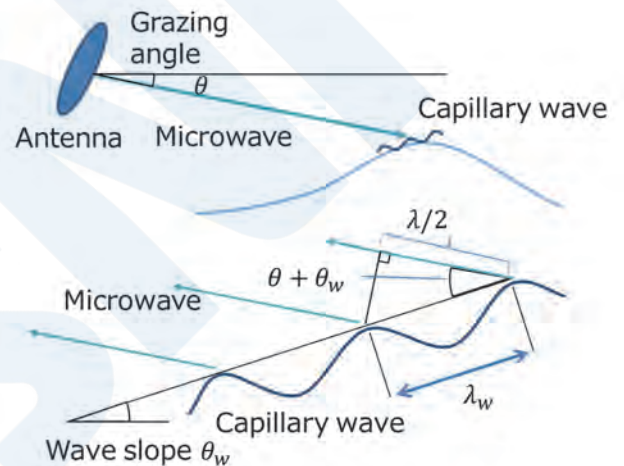


図1 マイクロ波レーダーによる波浪観測の概念図(上)アンテナと海洋波の配置(下)表面張力波のスケールでの拡大図。 $\lambda/2 = \lambda_w \cos(\theta + \theta_w)$ の時に、Bragg共鳴散乱によってアンテナ側にマイクロ波が強く反射される。

レーダー反射断面積は、下記のようなメカニズムによって変化する⁵⁾。

① Shadowing modulation

レーダーから見て、波の山の反対側が隠される効果(図2)。船用レーダーの設置高さは数十m程度である一方、Xバンドレーダーの観測半径は数km程度であり、レーダーから離れたエリアほどShadowingが支配的になる。波浪予測では可能な限り遠くの観測値を用いる必要があるため、Shadowing modulationは重要である。

② Tilt modulation

波面の傾きによって、レーダー反射が変化する効果(図2)。レーダーから離れるほど、波の山

* 技術研究所

のみが観測されるようになり、そこでは波面の傾きが小さくなり、tilt modulationは弱くなる。レーダーから近い範囲はtilt modulationが強いものの、反射が強すぎるために観測範囲から除くことも多い。

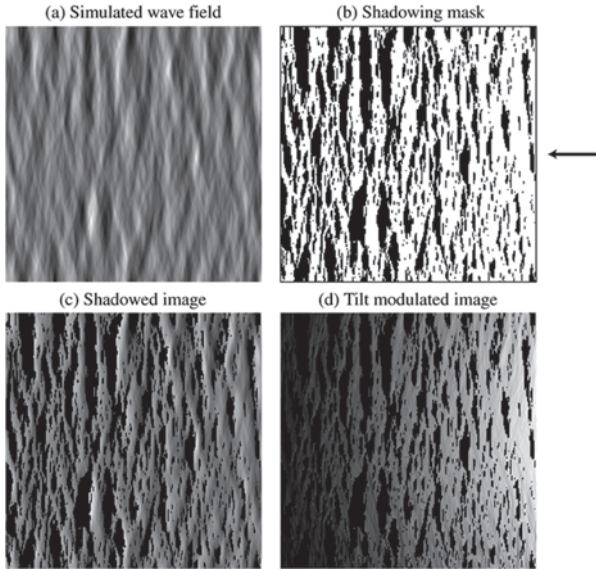


図2 Shadowing modulation, tilt modulationのイメージ図⁵⁾。© American Meteorological Society. Used with permission.

レーダーは直接波形を計測しているわけではなく、あくまで反射断面積を計測している点に注意が必要である。レーダー反射から波浪スペクトルを推定する標準的な手法⁵⁾においては、

- ① レーダー反射の時空間データ $\rho(x,t)$ を得て、その長方形の領域を抽出する (図3 (a), (b))。3D FFT (Fast Fourier Transformation) を施し、 (\mathbf{k}, ω) の画像スペクトルを得る (図3 (c))。ここ

で、 $\mathbf{x} = (x, y)$ は水平空間座標、 t は時刻、 $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$ は水平方向の波数、 ω は角周波数である。

- ② (\mathbf{k}, ω) の画像スペクトルから、線形分散関係に適合する成分のみをバンドパスフィルターする (図3 (d))。ここで流速や船速によるドップラー効果を加味した線形分散関係を用いる。フィルターアウトされた成分はノイズと見なす。
- ③ Shadowing modulationを考慮するために、MTF (Modulation Transfer Function) $M(k)$ を導入する。経験的に、 $M(k)$ はべき乗則に従うことが知られており、 $M(k) = k^{-q}$ として指数 q は他の観測値 (ブイなど)との比較によってチューニングする (図3 (e))黒線はレーダー、赤点線はブイ)。ここで、 $k = |\mathbf{k}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ である。
- ④ MTFを用いて画像スペクトルからshadowingの効果を補正し、逆3D FFTをすることで、波面を推定する (図3 (f))。
- ⑤ 有義波高については、ブイとの比較で推定する。すなわち、②でバンドパスフィルターしたシグナルに対し、それ以外をノイズとして扱い、シグナルノイズ比 (Signal Noise Ratio, SNR) とブイで計測した波高を比較して回帰式を作成し、以後は回帰式に基づいて波高を推定する。

精度の良い波浪観測のためには、ブイなどの他の観測機器を用いたレーダーのキャリブレーションが非常に重要である⁷⁾。沿岸に固定された波浪レーダーであれば、気候条件が限られ、ブイなどの観測機器も設置しやすいため、キャリブレーションを比較的行いやすい。一方、外洋を航海する船舶では、気候条件は大きく変化し、参照する別の観測機器を用意するのが難しいケースがある。

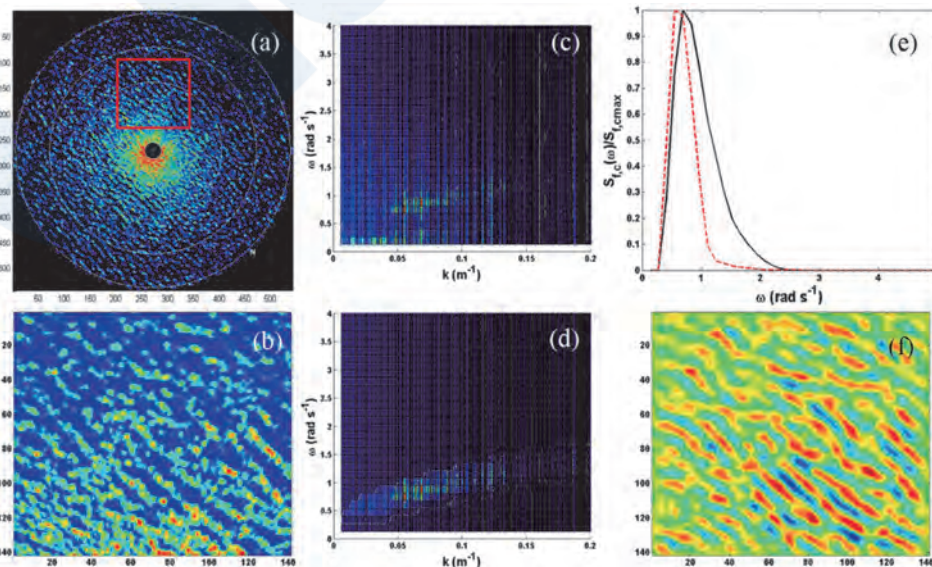


図3 レーダー反射画像の解析のイメージ図⁶⁾。© American Meteorological Society. Used with permission.

2.2 レーダーの種類

レーダーはマイクロ波の波長によって種類があり、主にXバンド（8-12GHz）およびSバンド（2-4GHz）が船用レーダーに用いられている。

Xバンドは表面張力波の波長に近く、散乱の強度、すなわちレーダー反射断面積（Radar Cross Section, RCS）が強いため、空間解像度がSバンドよりも細かい。ただし、降雨時に雨粒によってマイクロ波が散乱され、観測精度が落ちやすいという短所もある。Sバンドも用いられるが、波長がより長いために、解像度がXバンドと比較すると粗い。一方で、波長が長い場合降雨時にも観測精度が下がりにくいという長所もある。

Cheng and Chien (2017)⁸⁾では台湾沿岸に設置したXバンドレーダーとSバンドレーダーの比較をしており、空間解像度の違いや、降雨影響の違いについて分かりやすく図示されている。

セクション2.1の記述は、ノンコヒーレントレーダーという、レーダーから発射する送信波の位相を制御しない形式のレーダーに関する記述である。位相を制御するコヒーレントレーダーというタイプでは、水面上の粒子速度をドップラー効果によって測定する⁷⁾。このタイプをドップラーレーダーとも呼ぶ場合があり⁹⁾、日本船舶海洋工学会誌においてもドップラーレーダーの解説がある¹⁰⁾。

2.3 その他の船上観測値：船用波高計

船上で波浪を計測する機器として、船用波高計も普及している。船用波高計は、主に船首部に設置して、マイクロ波などにより直下の海面とセンサとの間の変動距離（相対水位）を直接計測する¹¹⁾。静水面からの水位（絶対水位）を求めるには、船首部に設置される加速度計などによって求められる船体上下動を、相対水位から差し引く方法がある。波高の信頼性は比較的高い一方、点での波高時系列のみ得られ、波向は計測できない。

3. 波浪モデル

波浪モデルは、全球を網羅した波浪の推定を行うことができ、公的な気象機関や、民間気象会社が波浪モデルデータを提供している。用途としては、船舶に対してはウェザールーティング、固定されている海洋構造物に対しては特定海域における波浪推算のために活発に用いられている。ここでは、波浪モデルが何を解いているのかという原理と、実船モニタリングへの活用に関する観点から注意点を述べる。

3.1 基礎方程式

現在広く使われている波浪モデルでは、波作用

$N \equiv S(k, \theta)/\sigma$ と呼ばれる保存量に関する時間発達方程式（波作用保存則）を解き、波パワースペクトル $S(k, \theta)$ を得る^{12) 13)}。

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \dot{x}N + \frac{\partial}{\partial y} \dot{y}N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k}N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}N = \frac{S_{force}}{\sigma} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= c_g \cos \theta + U_x \\ \dot{y} &= c_g \sin \theta + U_y \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{k} &= -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s} \\ \dot{\theta} &= -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} - \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial m} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma^2 = gk \tanh kd$ は成分波の角周波数、 g は重力加速度、 $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$ は成分波の波数、 d は水深である。ここで、 $k = |\mathbf{k}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ である。 $c_g \equiv \partial \sigma / \partial k$ は群速度、 $\mathbf{U} = (U_x, U_y)$ は海流などによる流速を表している。 σ は海流や潮流などによる流速 \mathbf{U} に沿って移動する座標系での角周波数であることに注意する。さらに、 θ は成分波の波向を表し、 s および m は θ 方向に平行・直角な座標系である。 S_{force} はソースタームと呼ばれる外力項である（後述）。上記の座標系を図4に示した。

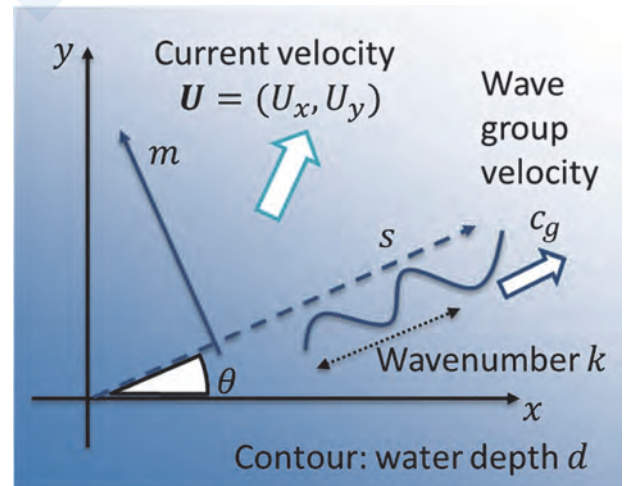


図4 波浪モデルで考える座標系。

まず、式(1)の意味を考察する。 $\frac{\partial}{\partial x} \dot{x}N + \frac{\partial}{\partial y} \dot{y}N$ は空間方向に関する移流項であり、ナビエ・ストークス方程式の移流項と同様である。式(2)を見てわかるように、波作用 N が移流する速度は、波のエネルギーが伝搬する群速度 c_g と海流・潮流などによる流速 \mathbf{U} による。

波作用方程式の場合は、さらに、スペクトル空間 (k, θ) に関する微分項 $\frac{\partial}{\partial k} kN + \frac{\partial}{\partial \theta} \theta N$ が現れる。この中で、 $\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s}$ や $\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m}$ という水深 d について波方向 θ に平行・直角な座標系 (s, m) の微分が含まれる。これは波の海底地形による回折・屈折を表している。沿岸では地形による回折・屈折の影響が大きいため、水深 d に関する微分項の精度を高める必要があり、空間解像度を上げる必要がある。

さらに、 $\frac{\partial U}{\partial s}$ や $\frac{\partial U}{\partial m}$ という項が現れるが、これは流速 U の波方向 θ から見た速度勾配を表している。この項によって、流速 U による波の屈折を表現する。

有義波高・平均波周期・平均波向などの波浪パラメータは、波浪スペクトル $S(k, \theta)$ を積分することで得られる。気象機関・気象会社によっては、風浪・うねりに対応する複数のスペクトルピークを分解したような波浪パラメータも提供している。波浪スペクトルそのものは、積分された波浪パラメータよりもデータ量が非常に大きくなるので、気象機関・気象会社から提供されない場合もある。

3.2 ソースターム

ソースタームと呼ばれる外力項 S_{force} には、主に以下の項が含まれる。

$$S_{force} = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} + \dots$$

S_{in} は風による波浪の発達を示す。波浪モデルを駆動するには各種気象機関が公開する風速データや、ダウンスケールした気象モデルで独自に計算した風速の推定値を用いる。例えば、気象庁・アメリカ海洋大気庁 (NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)・ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) が、風速の推定値を公開している。風速の精度はダイレクトに波浪モデルの精度に影響するので、波浪モデルを走らせる前に風速の精度を検証する必要がある。

S_{ds} は砕波 (白波など) による波エネルギーの散逸を表す。波浪場へのエネルギーの流入・散逸を示す S_{in} および S_{ds} は有義波高の推定において重要である。

S_{nl} は、成分波同士の非線形相互作用を表す¹⁴⁾。線形波であれば成分波のエネルギーは常に一定であり、波スペクトルは不変であるが、非線形性により成分波がエネルギーを交換し合って波スペクトルが変化する。この項は波スペクトルの形状に大きく関わっている。

これ以外にも、波浪と海底の摩擦や、波浪と海氷の相互作用を S_{force} に組み込むなどして、様々な物

理過程を波浪モデルで考慮できる。

3.3 波浪モデルのプログラム

現在波浪予報に主に用いられている波浪モデルは、第三世代波浪モデルと呼ばれ、セクション3.1や3.2に示したような、詳細な物理過程をスペクトル空間で明示的に解く。主要な第三世代波浪モデルのプログラムを紹介する。

WAM (WAve Modeling) は、欧州を中心に世界の波浪研究者を集めた WAMDI グループ (The Wave Model Development and Implementation Group) によって開発された、最初の第三世代波浪モデルである^{15) 16)}。ECMWFはECWAMと呼ばれるWAMから派生した内部モデルを開発している¹⁷⁾。

WAVEWATCH III¹⁸⁾はNOAAを中心に開発されている。オープンソースであるため、大学や研究機関によって積極的に改良が続けられている。

デルフト工科大学によって開発されたSWAN (Simulating WAVes Nearshore)¹⁹⁾は、当初から沿岸域の波浪を解析することを主目的にしており、現在も沿岸域や高潮の予測を中心に用いられている。こちらもオープンソースである。

気象機関・気象会社によっては、独自モデルを開発している。気象庁で運用されている波浪モデルは、気象研究所で開発されたMRI-IIIである²⁰⁾。

3.4 時間軸による違い

大気循環はカオスとしての性質を持っており、初期値鋭敏性により、初期値に誤差があると予報値の誤差も指数関数的に増大していく。例えば、中緯度の低気圧などの気象擾乱の誤差は、2~3日程度で倍になり、10日程度で誤差が最大になる²¹⁾。つまり10日程度が中緯度における気象の予報限界と考えられる。

中緯度帯での気象の予報限界は、波浪予報にとっても重要である。なぜなら、強い温帯低気圧によって波高が高くなる場合があり、台風などの熱帯低気圧の経路も中緯度の気圧配置や偏西風の位置に依存するためである。風によって駆動される波浪予報も、気象の予報限界に制限され、その予報限界は (目安として) 10日程度以下であると考えられる。

実船モニタリングにおいて波浪予報値を使う際、予報期間は10日程度に抑える必要がある。予報限界内において、気象と波浪の予報値の不確実性を考慮するためのデータとして、アンサンブル予報がある。これは、微小な摂動を与えた初期値を数十個程度生成し、それに基づいて大気・波浪モデルを計算するものである。台風の予測、治水や農業に関連した季節予報などにアンサンブル予報が活用されており²²⁾、実船モニタリングへの活用も今後考えられる。

気象庁・NOAA・ECMWFなどの気象機関も波浪のアンサンブル予報を提供している。図5に、ある欧州沿岸の航路を例としてECMWFの波浪アンサンブル予報ENS-WAM²³⁾のデータを可視化した。2021-11-22を初期値とし、4日間の予報を表示している。各アンサンブル (N=50) は色分けされている。予報期間が長くなるほど有義波高などの波浪パラメータのバラつきが大きくなるのがわかる。アンサンブル予報の注意点としては、アンサンブル数が多い分、一個の予報値のみ出す決定論的予報よりも粗い空間解像度で計算されているケースが多い点である。

気象モデルの予報精度を保つには、カオスである大気の状態を気象モデルに反映させ続ける必要がある。そのため、データ同化によって、定期的に観測値をモデルに反映させる²¹⁾。データ同化と時間軸によって気象・波浪モデルの推算値には3種類ある²⁴⁾。第一に実況推定値 (nowcast) であり、数値モデルによる推算値の初期時刻を、観測値によりデータ同化した値である。第二に、予測値 (forecast) であり、実況推定値を元に、その時刻よりも将来を推算した値である。第三に、追算値 (hindcast) であり、解析期間全体にわたって確定した観測値を用い、過去の気象・海象を推算した値である。データ同化できるデータ量は追算値>実況推定値>予測値の順に多くなるため、一般的な傾向として、精度もこの順で良くなる。

過去の船舶の状態を知りたい場合など、リアルタイム性が要求されない場合は追算値の利用が推奨される。また、前述の予報期間の限界を超えた場合に対し、船舶の安全性などを評価するには、波浪追算値を長期間 (数十年程度) 取得し、それを統計解析することが望ましい。

波浪追算値には主に2パターンある。①風速場だけ気象の追算値を使い、波浪はデータ同化しないパターン。②波浪も衛星海面高度計データやブイデータなどを使ってデータ同化するパターン。例えば、本会鋼船規則C編の2022年全面改正にあたり、IOWAGA²⁵⁾とERA5²⁶⁾という波浪追算データを用いている²⁷⁾。IOWAGAは①にあたり、フランス海洋開発研究所 (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, IFREMER) によって、NOAAの風プロダクトCFRSRによりWAVEWATCH IIIを駆動し、海面高度計データやブイデータによってキャリブレーションしている。ERA5は②にあたり、ECMWFによってECWAMを駆動し、衛星海面高度計とのデータ同化によって解析値を得ている²⁸⁾。

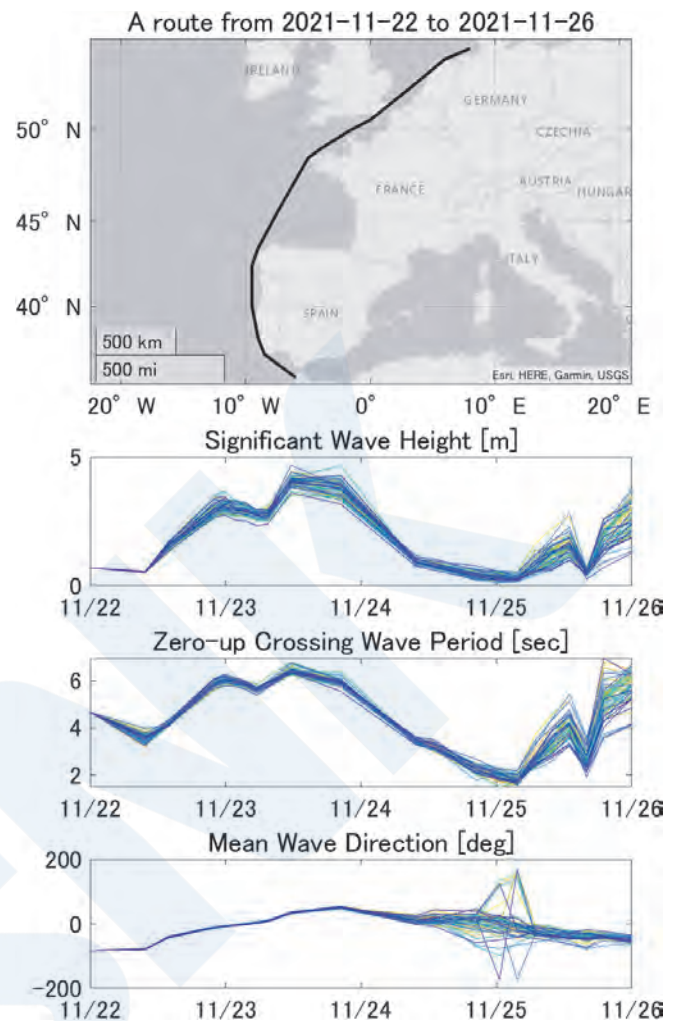


図5 ある欧州沿岸の航路を例としてECMWFの波浪アンサンブル予報ENS-WAM²³⁾のデータを可視化した例。

3.5 波浪モデルの課題

数千キロメートル以上の遠方から到達するうねりの分散関係や散逸などを正確に考慮することには未だに課題がある²⁹⁾。例えば、ブイと波浪モデルを比較したところ、うねりの到達時間には数十時間誤差があるケースが報告されている³⁰⁾。衛星海面高度計などによってうねりをデータ同化することは可能だが、全てのうねりを捕捉することは難しい²⁹⁾。

前述の通り (セクション3.1)、流速 U は波浪を移流させたり、屈折させたりする効果がある。世界には強い海流がいくつか存在しており、代表的なものとしてはメキシコ湾流・黒潮・アガラス海流などがある。海流に含まれる10-100kmスケールの渦によって波高が影響されるという指摘もある³¹⁾。波浪モデルに海流の影響があるかどうか、計測値などと比較検証することが推奨される (注: 前述のIOWAGAやERA5については、北大西洋においてブイ計測値と良好な一致を示すことを確認している³²⁾⁻³⁴⁾)。気象庁気象研究所では、日本近海の波浪モデルの予報値を、海流の予報値で修正する式を考案

しており³⁵⁾、気象庁の波浪予報図には海流の影響を受ける海域が図示されている³⁶⁾。

船舶の燃費向上のために、海流に沿って船舶が航行する場合がある。そういった場合に、船舶の燃費性能を把握するには、海流の位置精度、また海流による波浪への影響を確認することが望ましい。

4. 検証用観測値

波浪モデルやレーダーなどは、ブイや衛星海面高度計など船上以外での観測データで検証、またはキャリブレーションされていることが多い。本稿は船舶への波浪データの活用がテーマであるが、背景知識として、船上以外の検証用観測値についても紹介する。

4.1 ブイ

ブイは最も基本的かつ信頼度の高い波浪観測データとされる。ブイはz方向の変位を計測することにより、波高や周波数スペクトルを推定可能である。x, y, z方向変位・波傾斜などのデータを観測できれば、最大エントロピー法³⁷⁾などにより2次元の周波数・方向の波浪スペクトルも推定可能である。

日本においては、国土交通省港湾局などによって運営されている波浪情報観測網NOWPHAS³⁸⁾に、GPS波浪計のデータも集約されている。このGPS波浪計はGPSによって数cmの精度でブイの位置を測定しており、海岸から約10~20km、水深100~400mの海域で、一点係留で設置されている³⁹⁾。大型のブイであり、直径5~7m、全高10~19mとなっている。東北沿岸、東海から九州にかけての沿岸に18基設置されている。

他にも、NOAAが太平洋・大西洋にブイを展開し、情報を公開しているほか⁴⁰⁾、欧州についてはCMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) がウェブ上でデータを公開している⁴¹⁾。

近年ではより小型のブイが登場している。例えば、米Sofar Ocean社は直径42cm、重さ7.5kgほどのSpotterと呼ばれる小型ブイを開発している⁴²⁾。彼らはこのブイを2019年から展開し、現在では全球をカバーするほどの観測ネットワークになっている(図6)。彼らはこれらのブイを使って、波高だけでなく波周期や波向もデータ同化し、うねりの予測精度を向上することを試みている⁴³⁾。他にも、多くの種類の小型ブイがあり、詳細な解説記事がある⁴⁴⁾。

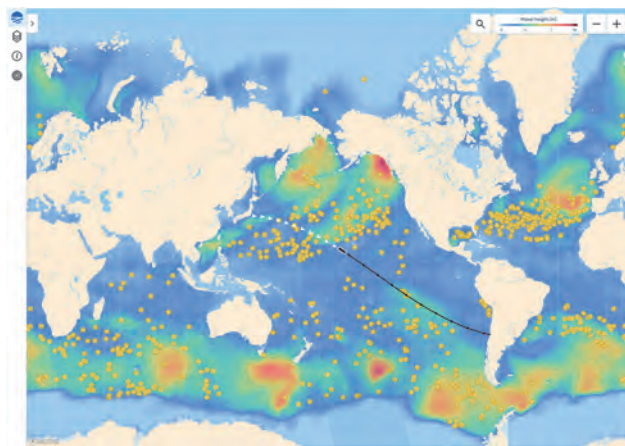


図6 米Sofar Ocean社の2022年7月現在でのブイ展開図⁴⁵⁾ (黄点：ブイ，コンター：波高の実況値)。

4.2 衛星海面高度計

衛星海面高度計は、マイクロ波を海面に射出し、反射した電波を受信して伝達時間を計測することで、有義波高を計測できる(論文⁴⁶⁾のセクション3.3.1)。波浪モデルの精度検証・キャリブレーション・データ同化などに用いられている。

衛星海面高度計全球を周回し、その軌跡は毛糸玉のようになっており(例：図7)、10~35日程度で元の位置に戻る。現在では複数の衛星海面高度計が運用されており、同時にカバーできる範囲は広がっている。しかし、あくまでデータは移動する点のように得られ、全球で面的に密にデータが得られるわけではない。全球の波浪を面的に把握するには波浪モデルが必要である。

衛星海面高度計のデータをブイとキャリブレーションし、複数の衛星の30年以上の観測データを結合したデータセットも登場している^{47) 48)}。

最近では、合成開口レーダー(SAR, Synthetic Aperture Radar)を用いて波浪スペクトルを推定する衛星もある。このタイプの衛星については⁴⁶⁾⁴⁹⁾が詳しく記述している。

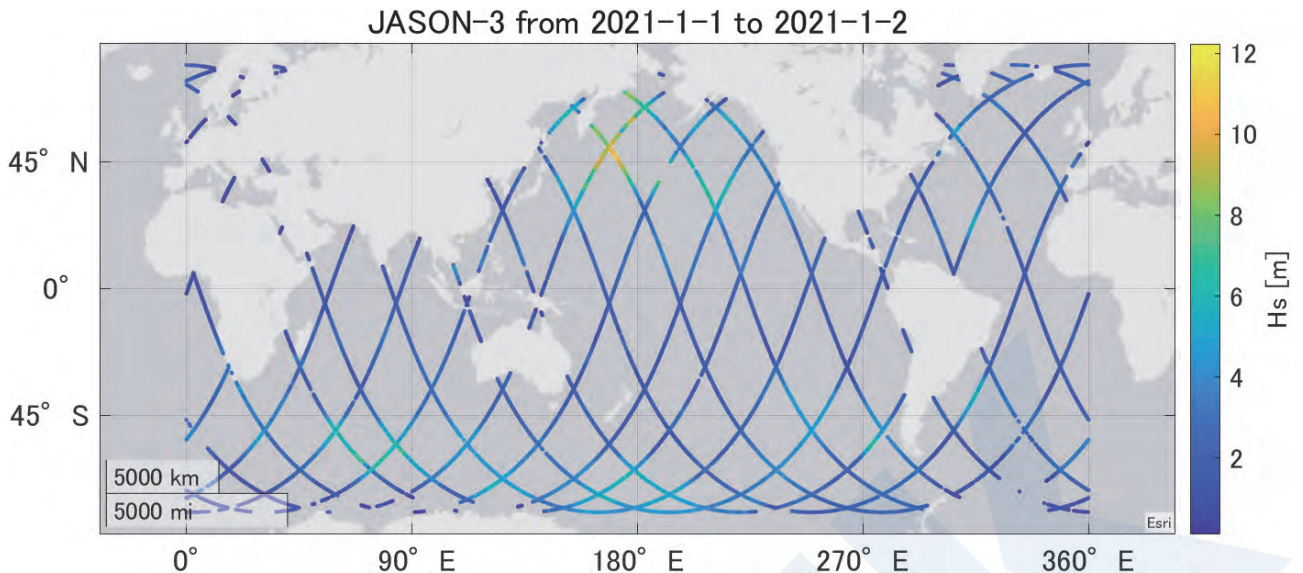


図7 衛星JASON-3のある1日における軌道と観測された有義波高の例。Ribal & Young (2019)のキャリブレーション済みデータ⁴⁷⁾を使用。

5. 考察：各種実船モニタリングへの応用

船体構造デジタルツインや実海域性能モニタリングなどにおいて、船体運動・応力・波浪中抵抗増加などの各種応答を求めている。そのための基本的な手法は、線形周波数領域で求めたRAO (**R**esponse **A**mplitude **O**perator) に波浪スペクトルを掛け合わせるという順解析の手法であり、いわゆる応答の短期予測である。応力などの応答の計測値を反映するデータ同化・キャリブレーションを用いた手法もあるものの、順解析の手法は応答計測値を必要としないという意味で、単純で解析コストが低い。以下では、順解析の手法を想定して、各種実船モニタリングを実現するための、波浪データの要件を考察する。

まず得られる波浪パラメータが重要である。特に、波高・波周期・波向は、ありとあらゆる船体応答(運動・応力・波浪中抵抗増加等)に対して必須のデータである。波浪モデルやレーダーから得られる波浪スペクトルの有用性について考える。RAOがなだらかな形状をしている場合、応答の波浪スペクトル形状への依存性は小さい。逆に、RAOのピークが鋭い形状をしている場合、応答の波浪スペクトル形状への依存性は大きいと考えられる。例えば、横揺れ(Roll)については、RAOのピークが鋭いケースが多く、ピークはGMや船速に応じて敏感に変化する。RAOのピークが鋭い応答を短期予測するためには、波浪スペクトルデータの活用が有効である可能性があるが、今後の検討が必要である。

次に、時間的な範囲である。疲労評価や、燃費性能評価などでは、リアルタイム性が要求されず、事

後解析で十分な場合がある。そのようなケースでは、多くの観測値でデータ同化されていて一般的に実況値より精度が良いとされる追算値が適している。波浪レーダーなどの船上観測データは、当然過去から現在までのデータしか得られない。将来の応答を予測したい場合、波浪モデルによる予報値が必要である。予報限界内(10日程度)における予報の不確実性はアンサンブル予報で評価すれば、予報値の不確実性に由来する応答の不確実性も評価することが可能と考えられる。

最後に、空間的な範囲である。波浪モデルは、ほぼすべての海域をカバーでき、船位における波浪データを抽出可能である。船上観測データは、船同士で融通しない限り、船位における波浪のみを観測する。

こういった要件を元に、どの波浪データがどのような種類の実船モニタリングに適しているかを、大まかに整理したのが、表1である。

表1 各種実船モニタリングに向けた波浪データの適合性（○は適用可能，△は場合により適用可能，×は適用不可を表す）

カテゴリ	データの種類	データの性質				
		推定可能パラメータ			カバー範囲	
		波高	波周期・波向	波浪スペクトル	時間	空間
波浪モデル	追算値	○ 観測値とデータ同化済	○	○	過去	○ ほぼ全海域・船位でも取得可 ただし、沿岸に近い場合は高解像度な波浪モデルが必要
	実況値	○	○	○	現在	
	決定論的予報値	○	○	○	未来	
	アンサンブル予報値	○ ただし決定論的予報値より空間解像度が粗いケースが多い			未来（予報値の不確実性を考慮）	
船上観測値	波浪レーダー	○ 降雨やキャリブレーションに注意	○	○	現在	○ 船上観測
	船用波高計	○	× 波向は不可	×		
検証用観測値	衛星海面高度計	○	△ 最近では波浪スペクトルを推定する衛星も一部ある ⁴⁶⁾		過去・現在	全球をカバーデータの空間密度は低い
	ブイ	○	○ 3自由度以上の計測データが必要			

カテゴリ	データの種類	応用先				
		過去		現在	将来	
		疲労評価（応力）	燃費性能評価（波浪中抵抗増加）	船体運動・応力 波浪中抵抗増加		
波浪モデル	追算値	○ リアルタイム性を要求されないのであれば、一般的に精度が良い追算値が適する			/	/
	実況値	○	○	○		
	決定論的予報値	/	/	/	○	
	アンサンブル予報値	/	/	/	○	
船上観測値	波浪レーダー	○	○	○	/	/
	船用波高計	△ 波高のみ計測するため、他のデータと組み合わせる必要がある			/	/

6. おわりに

本稿では、盛んに研究開発がなされている実船モニタリング技術への応用に向け、各種波浪データの概要等を紹介し、比較した。波浪の推定に関する技術は多岐にわたり、日進月歩で進んでいる。本稿では紙面が限られているため、一般的に普及している観測機器や解析手法のみを解説した。また、本稿は各技術の概要を簡単に紹介しているが、詳細については、参考文献を参照されたい。

さらに波浪分野について調査されたい読者に向け、いくつか教科書を紹介する。

- ① 『海洋波の物理』光易恒 著⁵⁰⁾
初学者に適した本であり、波浪の統計・信号処理、波浪の生成・発達過程、ブイによる観測などについて本質を平易に書かれている。絶版であるため入手が難しい。
- ② 『波浪の解析と予報』磯崎一郎・鈴木靖 著⁵¹⁾
海洋波の基礎から、観測、海上風、波浪モデルについて網羅されている。特に日本近海での波浪モデルの運用について詳しく書かれている。
- ③ 『The Interaction of Ocean Waves and Wind』, Peter Janssen著⁵²⁾
ECMWFの波浪専門家によって書かれた、波浪モデルについてより詳しく説明された教科書。
- ④ 『Ocean Wave Dynamics』, Ian Young and Alexander Babanin編⁵³⁾
2019年出版と最近の研究成果まで網羅された、大学院生・研究者向けの教科書。波浪モデル、衛星観測、非線形波など各分野の専門家によってオムニバスのように書かれている。

また、日本船舶海洋工学会 学会誌KANRIN第98号に「海洋波研究の最前線」という特集⁵⁴⁾、KANRIN第77号に「船舶海洋分野における気象情報の利用」という特集⁵⁵⁾が組まれている。さらに、オーストラリアの波浪研究グループが、将来に向けた波浪の研究課題について整理している²⁹⁾。ここでは、研究機関・政府関係者・民間企業等で波浪に関わるステークホルダーにアンケートし、運営委員会が整理、再度ステークホルダーに投票してもらった結果をまとめている。現状の波浪データの・モデルの限界、波浪研究の今後の課題について、関心のある読者はこちらの記事も参照されたい。なお、この記事において、*Better engagement of maritime industries with research*が課題の一つとして挙げられている。

§1「はじめに」で述べたように、実船モニタリングにおいては、現在提供されている波浪データを、その有用性と限界を踏まえながら、活用していくことが必要である。本稿が、実船モニタリングへの波浪データ活用の促進につながれば幸いである。さらに、実船モニタリングの海事産業への展開を通じて、*Better engagement of maritime industries with research*が実現されることを願う。

参考文献

- 1) 海上技術安全研究所, “海事クラスター共同研究 実海域実船性能評価プロジェクト (OCTARVIA) フェーズ2の開始について,” 2022. <https://www.nmri.go.jp/news/press/press20220315.html>
- 2) 粉原直人 and 米澤拳志, “実船モニタリングデータからの実船性能評価,” *Kanrin Bull. Japan Soc. Nav. Archit. Ocean Eng.* = 威臨日本船舶海洋工学会誌, vol. 82, pp. 6-11, 2019.
- 3) 藤久保昌彦, “船体構造デジタルツインの研究開発,” 溶接学会誌, vol. 90, no. 1, pp. 36-43, 2021, doi: 10.2207/jjws.90.36.
- 4) 牧敦生, “関西支部だより,” *Kanrin Bull. Japan Soc. Nav. Archit. Ocean Eng.* = 威臨日本船舶海洋工学会誌, vol. 102, p. 48, 2022.
- 5) J. Nieto Borge, G. R. Rodríguez, K. Hessner, and P. I. González, “Inversion of Marine Radar Images for Surface Wave Analysis,” *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 21, no. 8, pp. 1291-1300, Aug. 2004, doi: 10.1175/1520-0426(2004)021<1291:IOMRIF>2.0.CO;2.
- 6) Y. Qi, W. Xiao, and D. K. P. Yue, “Phase-resolved wave field simulation calibration of sea surface reconstruction using noncoherent marine radar,” *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 33, no. 6, pp. 1135-1149, 2016, doi: 10.1175/JTECH-D-15-0130.1.
- 7) W. Huang, X. Liu, and E. W. Gill, *Ocean wind and wave measurements using X-band marine radar: A comprehensive review*, vol. 9, no. 12. 2017. doi: 10.3390/rs9121261.
- 8) H.-Y. Y. Cheng and H. Chien, “Implementation of S-band marine radar for surface wave measurement under precipitation,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 188, pp. 85-94, 2017, doi: 10.1016/j.rse.2016.10.042.

- 9) N. Braun, F. Ziemer, A. Bezuglov, M. Cysewski, and G. Schymura, “Sea-Surface Current Features Observed by Doppler Radar,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 4, pp. 1125-1133, 2008, doi: 10.1109/TGRS.2007.910221.
- 10) 林昌奎, “ドップラーレーダによる沿岸域海洋波の定点観測,” *Kanrin Bull. Japan Soc. Nav. Archit. Ocean Eng. = 咸臨 日本船舶海洋工学学会誌*, no. 98, pp. 8-11, 2021.
- 11) 武田誠一, “実船による波浪計測,” *日本造船学会誌*, vol. 831, pp. 36-41, 2002.
- 12) K. Hasselmann *et al.*, “Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP),” *Deutsches Hydrographisches Institut*, 1973.
- 13) H. L. Tolman and N. Booij, “Modeling wind waves using wavenumber-direction spectra and a variable wavenumber grid,” *Glob. Atmos. Ocean Syst.*, vol. 6, pp. 295-309, 1998.
- 14) K. Hasselmann, “On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum Part 1. General theory,” *J. Fluid Mech.*, vol. 12, no. 04, p. 481, 1962, doi: 10.1017/S0022112062000373.
- 15) T. WAMDI Group, “The WAM model - A third generation ocean wave prediction model,” *Journal of Physical Oceanography*, vol. 18, no. 12, pp. 1775-1810, 1988. doi: 10.1175/1520-0485(1988)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2.
- 16) G. J. Komen, L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, and P. A. E. M. Janssen, *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. doi: DOI: 10.1017/CBO9780511628955.
- 17) S. Park, “Part VII : ECMWF Wave Model IFS DOCUMENTATION - Cy38r1 Operational implementation 19 June 2012 PART VII : ECMWF WAVE MODEL Table of contents Numerical scheme,” no. June, pp. 1-79, 2012.
- 18) H. L. Tolman, “User manual and system documentation of WAVEWATCH III,” 2016.
- 19) R. C. Ris, L. H. Holthuijsen, and N. Booij, “A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification,” *J. Geophys. Res. Ocean.*, vol. 104, no. C4, pp. 7667-7681, Apr. 1999, doi: <https://doi.org/10.1029/1998JC900123>.
- 20) 峯松宏明, “気象庁で現業運用している波浪モデル,” *天気*, vol. 56, pp. 669-674, 2009.
- 21) 三好建正, “ビッグデータ同化と気象予測,” *応用物理*, vol. 90, no. 8, pp. 470-475, 2021.
- 22) 山口宗彦, “気象データの利用におけるリスクマネジメントへさまざまなアンサンブル予報の形態へ,” 2020.
- 23) ECMWF, “Ocean Wave Model Ensemble 15-day forecast (Set IV - ENS-WAM).” <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/set-iv>
- 24) 松浦邦明, 前田正裕, 中野知香, 黒木健太郎, 越田理, and 佐藤淑子, “気象海象の推算とその精度 : 推算値の特徴を踏まえた利用のために (特集 船舶海洋分野における気象情報の利用),” *Kanrin Bull. Japan Soc. Nav. Archit. Ocean Eng. = 咸臨 日本船舶海洋工学学会誌*, no. 77, pp. 6-10, 2018.
- 25) M. Alday, F. Arduin, M. Accensi, and G. Dodet, “A global wave parameter database for geophysical applications. Part 3: improved forcing and spectral resolution,” 2021.
- 26) H. Hersbach *et al.*, “The ERA5 global reanalysis,” *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 146, no. 730, pp. 1999-2049, 2020, doi: 10.1002/qj.3803.
- 27) 見良津黎, 福井努, and 朱庭耀, “船舶の実遭遇海象に基づく操船影響の定量的評価,” *ClassNK 技報*, vol. 5, pp. 71-74, 2022.
- 28) ECMWF, “Forecast User Guide, 2 The ECMWF Integrated Forecasting System, 2.2 Ocean Wave Model - ECWAM,” 2022. <https://confluence.ecmwf.int/display/FUG/2.2+Ocean+Wave+Model+-+ECWAM>
- 29) D. Greenslade *et al.*, “15 Priorities for Wind-Waves Research: An Australian Perspective,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 101, no. 4, pp. E446-E461, 2020, doi: 10.1175/BAMS-D-18-0262.1.
- 30) H. Jiang, A. V Babanin, and G. Chen, “Event-Based Validation of Swell Arrival Time,” *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 46, no. 12, pp. 3563-3569, 2016, doi: 10.1175/JPO-D-16-0208.1.
- 31) F. Arduin *et al.*, “Small-scale open ocean

- currents have large effects on wind wave heights,” *J. Geophys. Res. Ocean.*, vol. 122, no. 6, pp. 4500-4517, Jun. 2017, doi: <https://doi.org/10.1002/2016JC012413>.
- 32) T. Kodaira, K. Sasmal, R. Miratsu, T. Fukui, T. Zhu, and T. Waseda, “Uncertainty in wave hindcasts in the North Atlantic Ocean,” pp. 1-15, 2022.
- 33) G. de Hauteclocque, T. Zhu, M. Johnson, H. Austefjord, and E. Bitner-Gregersen, “Assessment of global wave datasets for long term response of ships,” *Proc. Int. Conf. Offshore Mech. Arct. Eng. - OMAE*, vol. 2A-2020, no. August, 2020, doi: [10.1115/omae2020-18874](https://doi.org/10.1115/omae2020-18874).
- 34) K. Sasmal, T. Kodaira, Y. Kita, R. Miratsu, and T. Zhu, “Modeled and satellite-derived extreme wave height statistics in the North Atlantic Ocean reaching 20 m,” *ESSOAr*, 2021.
- 35) 久保剛太 and 高野洋雄, “波浪に対する海流の影響調査,” *測候時報*, vol. 77, pp. S141-S157, 2010.
- 36) 高野洋雄 and 山根彩子, “「航行に危険な荒れた海域情報」の波浪予想図への追加,” *測候時報*, vol. 85, pp. 1-12, 2018.
- 37) 橋本典明, “最大エントロピー原理 (MEP) を用いた方向スペクトルの推定,” *港湾空港技術研究所 報告*, vol. 24, no. 3, pp. 123-146, 1985.
- 38) 国土交通省港湾局, “全国港湾海洋波浪情報網 : NOWPHAS.” <https://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/index.html>
- 39) 伊藤吉孝, “港湾用語の基礎知識「GPS波浪計」,” *港湾*, vol. 3, p. 56, 2017.
- 40) NOAA, “National Data Buoy Center.” <https://www.ndbc.noaa.gov/>
- 41) C. M. E. M. Service, “In Situ TAC.” <http://www.marineinsitu.eu/dashboard/>
- 42) Sofar Ocean, “Spotter Buoy.” <https://www.sofaroccean.com/products/spotter>
- 43) P. B. Smit *et al.*, “Assimilation of significant wave height from distributed ocean wave sensors,” *Ocean Model.*, vol. 159, 2021, doi: [10.1016/j.ocemod.2020.101738](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101738).
- 44) 平川嘉昭, “外洋域における船舶・海洋構造物の遭遇波浪観測,” *Kanrin Bull. Japan Soc. Nav. Archit. Ocean Eng. = 咸臨 日本船舶海洋工学学会誌*, vol. 98, pp. 12-16, 2021.
- 45) Sofar Ocean, “Sofar Ocean.” <https://weather.sofaroccean.com/>
- 46) F. Ardhuin *et al.*, “Observing Sea States,” *Frontiers in Marine Science*, vol. 6, 2019.
- 47) A. Ribal and I. R. Young, “33 years of globally calibrated wave height and wind speed data based on altimeter observations,” *Sci. Data*, vol. 6, no. 1, p. 77, 2019, doi: [10.1038/s41597-019-0083-9](https://doi.org/10.1038/s41597-019-0083-9).
- 48) F. Laboratoire d’Océanographie Physique et Spatiale (LOPS), CNRS, IRD, Ifremer, IUEM, Univ. Brest, Brest, “The Sea State Climate Change Initiative dataset is available,” 2019.
- 49) 早稲田卓爾, “世界の海洋波研究の動向と課題,” *Kanrin Bull. Japan Soc. Nav. Archit. Ocean Eng. = 咸臨 日本船舶海洋工学学会誌*, no. 98, pp. 1-7, 2021.
- 50) 光易恒, *海洋波の物理*. 岩波書店, 1995.
- 51) 磯崎一郎 and 鈴木靖, *波浪の解析と予報*. 東海大学出版会, 1999.
- 52) P. A. E. M. Janssen, *The interaction of ocean waves and wind*. Cambridge University Press, 2004.
- 53) I. R. Young and A. V. Babanin, *Ocean Wave Dynamics*. WORLD SCIENTIFIC, 2019. doi: [doi:10.1142/11509](https://doi.org/10.1142/11509).
- 54) 日本船舶海洋工学学会編, “海洋波研究の最前線,” *Kanrin Bull. Japan Soc. Nav. Archit. Ocean Eng. = 咸臨 日本船舶海洋工学学会誌*, vol. 98, 2021.
- 55) 日本船舶海洋工学学会編, “船舶海洋分野における気象情報の利用,” *Kanrin Bull. Japan Soc. Nav. Archit. Ocean Eng. = 咸臨 日本船舶海洋工学学会誌*, vol. 77, 2018.

IMOの動向

— IMOでの主な審議内容・結果の紹介 —

開発本部 国際部

1. はじめに

本稿においては、国際海事機関（IMO）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、2021年11月に開催された第77回海洋環境保護委員会（MEPC 77）及び2021年10月に開催された第104回海上安全委員会（MSC 104）の審議内容を紹介した。

今号では、2022年6月6日から10日に開催された第78回海洋環境保護委員会（MEPC 78）及び2022年4月20日から29日に開催された第105回海上安全委員会（MSC 105）の主な審議結果を紹介する。

2. MEPC 78の審議結果—海洋環境保護関連—

2.1 温室効果ガス（GHG）関連

地球温暖化対策の観点から、温室効果ガス（GHG）排出の抑制が世界的な課題となっている中、国際海運からのGHG抑制対策はIMOにて検討が進められている。

IMOでは、現在までにエネルギー効率設計指標（EEDI）による規制、船舶エネルギー効率管理計画書（SEEMP）の所持、及び燃料消費実績報告制度（DCS）を導入している。加えて、2018年4月に開催されたMEPC 72では、GHG削減目標とGHG排出削減策の候補を盛り込んだIMO GHG削減戦略が採択され、国際海運の脱炭素化に向けたGHG削減手法について継続審議が行われている。

2.1.1 GHG排出削減のための短期対策

IMO GHG削減戦略の短期削減目標では、2030年までに国際海運全体の輸送効率を2008年比で最低40%改善することが明記されている。この短期目標を達成するための対策として、MEPC 76では、EEXI規制と、燃費実績（CII, Carbon Intensity Indicator）格付け制度を導入するためのMARPOL条約 附属書VIの改正、及び関連するガイドラインが採択され、2023年より適用が開始される。

(1) CII燃費実績格付け制度

CII燃費実績格付け制度は、DCSにて収集したデータを基に毎年のCO₂排出量の実績値となる attained CIIを計算し、基準値との比較から格付け評価を行う制度である。MEPC 76にて設

置された通信部会では、燃費実績格付け制度を実施するための、DCSとSEEMPに関する関連ガイドライン、及び船種等に対するCIIの補正係数に関するガイドラインの検討作業を行っており、今回の会合にて党が通信部会とMEPC 78に先立ち開催された中間会合（ISWG-GHG 12）を経て作成された関連ガイドラインが採択された。

CII規制及びSEEMP Part III審査、及び上記のガイドラインに関する詳細な情報については、以下の本会ウェブサイトを参照されたい。

ホーム>業務サービス>条約関連>エネルギー効率関連条約（SEEMP, IMO DCS, CII）

URL:<https://www.classnk.or.jp/hp/ja/activities/statutory/seemp/index.html>

(2) EEXI規制

EEXI規制は、新造船におけるEEDI規制と同等に、就航船に対して一定以上の燃費性能を要求する規制である。今回の会合では、運航中の海上速力試験方法や軸発電機付き船舶のEEXI計算方法を追加したEEXI計算ガイドラインの改正（MEPC.350(78)）及びEEXI検査認証ガイドラインの改正（MEPC.351(78)）が採択された。また運航中の海上速力試験について具体的な手順を示すガイダンス（MEPC.1/Circ.901）も併せて承認された。

2.1.2 船舶燃料のライフサイクルGHG強度に関するガイドラインの策定

船舶の脱炭素化に向けて今後普及が進むことが予測される水素やアンモニア、バイオマス燃料などの低/ゼロ炭素燃料については、それら燃料の製造や流通過程において排出されるCO₂にも留意すべきことが認識されている。また、メタン（CH₄）などのCO₂以外のGHGについても、地球温暖化に与える影響の大きさが注目されている。このような背景から、IMOでは、船舶で使用される燃料について、燃料の製造、流通、及び船上での使用を通じたライフサイクルにおけるGHG排出を総合的に評価するための、ライフサイクルGHG強度に関するガイドラインの策定が開始されている。

今回の会合では、通信部会を設置して当該ガイドラインの内容について集中的に検討し、来年夏に関

催されるMEPC 80における同ガイドラインの最終化を目指すことが合意された。

2.1.3 GHG排出削減のための中・長期対策

IMO GHG削減戦略では、中期削減目標として2050年までに輸送効率を2008年比で最低70%改善すること、及びGHG総排出量を同じく2008年比で最低50%削減すること、並びに長期削減目標として今世紀中の出来るだけ早い時期にGHG排出量をゼロとすることが掲げられている。中・長期削減目標を達成するための対策の検討を進めるにあたり、2021年に開催されたMEPC 76では、今後の作業を表1の通り3つのフェーズに分けて検討を行うワークプランが合意されている。

表1 中・長期削減目標の検討スケジュール

フェーズI (2021-2022)	具体的な対策案を各国が検討しIMOに提案
フェーズII (2022-2023)	検討すべき提案を選別し、優先順位付け
フェーズIII (2023-)	優先順位の高い提案について、制度案を具体化

今回の会合では、5月に開催された中間会合(ISWG-GHG 12)にて各国から提案されていた対策案について、詳細な検討(フェーズII)を進めていくことが合意された。主な対策案は表2の通り。

表2 主な対策案

GFS (GHG Fuel Standard)	船舶で使用される燃料について、単位エネルギー当たりのライフサイクルGHG強度を規制
IMRF (IMO研究開発ファンド)	船舶燃料1トンあたりUS\$2を課金し、低・脱炭素技術の研究開発を促進するためのIMO研究開発ファンドの運用資金に充てる制度
IMSF&R	CII格付けの情報を基に、CO ₂ 排出量の多い船舶へ課金し、CO ₂ 排出量の少ない船舶へ還元する制度
課金・還付 (feebate) 制度	化石燃料船へ課金 (fee) し、ゼロエミ燃料船へ還付 (rebate) する制度
単純課金	GHG排出量1トンあたりUS\$100の課金制度。課金による収益は、UNFCCCの監督による気候変動緩和策、及びIMOの監督による脱炭素技術の研究開発に使用

ECTS (Emission Cap-and-Trade System)	排出量取引制度。各船に排出枠を設け、排出枠の余剰分や不足分を取引する制度
---	--------------------------------------

2.1.4 IMO GHG削減戦略の見直し

2018年に採択されたIMO GHG 削減戦略では、5年ごとにその内容を見直すことが規定されている。パリ協定の下で各主要国政府が2050年までにGHG排出ゼロを目指すなど意欲的な姿勢を示している状況の中、前回のMEPC 77では、IMO GHG削減戦略で規定している国際海運からのGHG排出削減目標を強化する必要があるとの認識から、2023年春に開催されるMEPC 80での採択に向けてIMO GHG削減戦略の見直し作業を開始することが合意されている。今回の会合では、IMO GHG削減戦略の見直し作業を進めるために、次回の会合(MEPC 79)の前に開催される中間会合にて集中的に検討することが合意された。

2.2 バラスト水管理条約

2.2.1 処理済み汚水とグレーウォータの貯蔵

特定の港湾において処理済みの汚水やグレーウォータの排出が禁止されていることから、業界よりこれらを一時的にバラストタンクに貯蔵する運用をしてよいか、との疑問が上がっている。今後、MARPOL条約 附属書IVやバラスト水管理条約にて、処理済みの汚水やグレーウォータの排出をどのように取り扱うべきかを検討していくことが合意された。

2.2.2 処理が困難な水質でのバラスト水処理

バラスト水処理装置(BWMS)の使用について、バラスト水処理が困難となるような水質に問題のある寄港地にてバラスト水を積み込む場合の手順を明確化すべきとの意見があり、MEPCにてガイダンスの作成が検討されている。

今回の会合では、現在までに候補として挙げられているバラスト水交換とBWMSによる処理を組み合わせた対応方法が閉鎖的な海域では実行できないという懸念や、想定できなかったContingencyなケースとして対応することの是非、問題になる水質の特定方法などを整理する必要があることが認識され、次回以降の会合に向け更に検討を行うこととなった。

2.3 大気汚染防止

2.3.1 バイオ燃料使用におけるNO_x規制

燃料の品質に関する要件を規定するMARPOL条約 附属書VIの第18規則では、石油由来の燃料油、及び石油精製以外の方法で得られる燃料油の使用について、それぞれに対する要求事項を規定している。

今回の会合では、GHG削減対策として導入が見込まれるバイオ燃料、及び化石燃料とのブレンド油に対する同規則の適用について検討を行い、同規則に対する統一解釈が承認された（MEPC.1/Circ.795/Rev.6）。この統一解釈では、バイオ燃料の化石燃料油へのブレンド比率が30%以下である場合には従来の石油由来の燃料油として扱い、追加のNOxに関連する要件が課されないことが規定されている。またバイオ燃料や、化石燃料との比率が30%を超えるブレンド油を使用する場合であっても、原動機取扱手引書（テクニカルファイル）に規定しているNOx重要構成部品や同手引書で指定している設定値、運転値の範囲を超えるような変更をせずに運転できる原動機は、追加のNOxに関連する要件が課されないことが規定された。

なお、ブレンド比率が30%を超え、重要構成部品や設定値、運転値などに変更がある場合においては、排出量の確認はNOxテクニカルコードの6.3に規定される簡易計測法を採用できる旨も明確化されている。

2.3.2 SOx排出規制海域の追加

MARPOL条約 附属書VIの第14規則では、硫黄酸化物（SOx）及び粒子状物質（PM）の排出を抑制するために、2020年より一般海域で使用する燃料油中の硫黄分濃度が0.50%に制限されている。また、バルト海海域、北海海域、米国・カナダ沿岸200海里内の海域、及び米国カリブ海海域をSOxの排出規制海域（Emission Control Area: ECA）として指定しており、これらの海域で使用する燃料油の硫黄分濃度を0.10%に制限している。

今回の会合では、欧州諸国や地中海沿岸国から、地中海海域をSOx ECAに指定すべきとの提案があり、同海域をSOx ECAに指定するMARPOL条約 附属書VIの改正案が承認された。なお、最短で2025年の春より地中海を航行する船舶に適用されることになるが、今回の会合では適用日について結論が得られなかったため、次回のMEPC 79において適用日に関する審議を再度行った上で、採択されることになる。

2.3.3 SOx排出規制海域の追加

燃料油中の硫黄分濃度規制について、MARPOL条約 附属書VI第4規則により、適合燃料油と同等の実効性を持つ排ガス浄化装置（EGCS）の使用に替えることが認められている。

EGCSを使用する場合は、性能要件を規定するEGCSガイドライン（決議 MEPC.259.(68)）に基づき主管庁の承認を受ける必要があり、洗浄水の排出に適合することが要求され、EGCSからの排水に

についても基準が設けられている一方、EGCSにて使用した洗浄水の排出による海洋環境への悪影響を懸念する港湾では、EGCSの使用を制限する動きがでてきている。この状況を踏まえ、汚染防止・対応小委員会（PPR）にて、統一的な規制を制定するためのEGCSからの排水による影響評価について検討されている。

今回の会合では、PPRで作成されたEGCSの排水が海洋環境に与える影響の評価方法を定めるガイドラインが承認された。

2.4 その他の審議事項

2.4.1 AFS条約

海洋生物の付着を防ぐ為の防汚塗料について、2008年に発効した船舶の有害な防汚方法の規制に関する国際条約（AFS条約）では、有機スズ化合物を使用することが禁止されている。また、MEPC 76ではシブトリンを新たに禁止物質に加える条約改正が採択されており、2023年より規制が開始される。

今回の会合では、新たにシブトリンを禁止物質とすることに伴うAFSサンプリングのためのガイドライン（MEPC.356(78)）、PSC検査のためのガイドライン（MEPC.357(78)）、AFSの検査・認証に関するガイドライン（MEPC.358(78)）の改正が採択された。

2.4.2 海洋プラスチックごみ

近年問題となっているプラスチックごみの海洋投棄については、2013年に発効したMARPOL条約 附属書Vの改正により、全ての船舶からのプラスチックごみの排出が禁止されている。しかしながら国連の調査によると、未だ船舶に由来するプラスチックごみが排出されていることが報告されていることから、MEPC 77では、現行規定の順守と2025年までに船舶からの海洋プラスチックごみ排出ゼロを目指すことを盛り込んだ海洋プラスチックごみに対する戦略がMEPC決議として採択された。

今回の会合では、400トン以上の国際航海船に備えることが要求されている廃物記録簿について、100トン以上の国際航海船まで対象を拡大するMARPOL条約 附属書Vの改正案が承認された。この改正案は次回のMEPC 79にて採択される予定となっている。

2.5 採択された強制要件

2.5.1 水密戸に関する要件

SOLASに規定される水密戸に関する要件と整合させるための、MARPOL条約 附属書Iの改正（MEPC.343(78)）、及びIBC Codeの改正（MEPC.345(78)）が採択された。適用日は

MARPOL条約 附属書Iの改正については2024年1月1日、IBC Codeの改正については2024年7月1日となっている。

2.5.2 有害液体物質の分類

MARPOL条約 附属書IIの付録1に記載している有害液体物質の分類のための指針について、GESAMPハザード評価手順の変更に伴う改正が採択された。この改正は2023年11月1日より発効となる。

3. MSC 105の審議結果—海上安全関連—

3.1 条約及び関連コードの主要な改正の採択

MSC 105で採択された主要な義務要件は以下の通り。

(1) Global Maritime Distress and Safety System (GMDSS) の近代化に伴うSOLAS等の改正
GMDSSの近代化に伴い、SOLAS II-1, III, IV, V章及び付録(証書)等の改正が採択された。また関連の諸々の性能基準、ガイドラインや指針が併せて承認された。本改正の要点は以下の通り。

- 「A3海域」の定義が「インマルサット静止衛星の通信圏」から「認定された移動衛星業務による通信圏」に改正。
- SOLAS III章6規則に規定されていた双方向VHF無線電話装置及び捜索救助用レーダトランスポンダ(SART)の規定がSOLAS IV章に移設。
- 海上安全情報に関する調整された放送の受信機(ナブテックス)、船用VHF無線設備、船用MF/HF無線設備、インマルサットC型船舶地球局等の性能基準が改正された。

(2) IMSBCコードの改正

新規貨物の追加を含む、IMSBCコードの第6回改正が採択された。

(3) IMDGコードの改正

国連による2年周期での「危険物輸送に関する勧告」の改正に伴う、第41回IMDGコードの改正が採択された。

3.2 承認された条約及び関連コードの主要な改正

今回の会合で承認された主要な義務要件は以下の通り。これらは、2022年11月に開催されるMSC 106にて採択される見込みである。

(1) IGCコードの改正

設計温度が-55℃より低く-165℃までの貨物タンク又はプロセス用圧力容器及び二次防壁用の

板、形材及び鍛造品に関するIGCコード表6.3に高マンガンオーステナイト鋼を対象に含める改正が承認された。

(2) IGFコードの改正

設計温度が-55℃より低く-165℃までの燃料タンク又はプロセス用圧力容器及び二次防壁用の板、形材及び鍛造品に関するIGFコード表7.3に高マンガンオーステナイト鋼を対象に含める改正が承認された。

(3) 洋上作業員運送の安全に関する国際コード(IPコード)

IPコードの新規制定及び同コードを強制化するためのSOLAS XV章の制定が承認された。IPコードは12人を超える作業員を運送する500GT以上の貨物船及び高速艇が適用対象とされており、2024年7月1日に発効する見込みである。

(4) 2011 ESPコードの改正

主に以下の点における、2011 ESPコードの改正が承認された。

- ばら積み貨物船において毎年の検査実施が要求される条件となるバラストタンク(二重底タンクを除く)の塗装状態を、「不良(POOR)」から「優良未満(less than GOOD)」に変更。
- 船齢20年を超える150m以上の二重船側ばら積み貨物船の貨物艙に隣接する二重船側空所において、塗装状態が「不良(POOR)」の場合は、毎年の検査実施が要求される旨を規定。
- 独立タンクにより油を運送する油タンカーは同コードの適用対象とならないことを明確化。
- 油タンカーの更新検査時に要求される圧力試験の実施時期の明確化。

(5) 燃料油の使用における安全性強化

2020年1月1日から適用が開始となった燃料油の硫黄分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た結果、給油の際に燃料油供給業者が船舶に提供するbunker delivery noteに引火点の情報を記載することを強制化するためのSOLAS条約II-2章の改正が承認された。

3.3 統一解釈等の承認

今回の会合において承認された統一解釈、ガイドライン及び指針等のうち、主要なものは以下の通り。

3.3.1 統一解釈

(1) IGCコードの統一解釈

IGCコード5.4.4及び5.13.2.4において、ガス燃料装置のダクトの定義に、ガスバルブユニットの囲壁及び船体構造等の構造の一部を利用したダクトが含まれる旨を明確にするための統一解釈 (MSC.1/Circ.1625) の改正。尚、ガスバルブユニット室にあっては本規則の適用対象外とされたが、ガス燃料管の破裂により生じる最大の圧力に耐えることを計算により文書化することが要求される。

- (2) 損傷時復原性に関連する甲板上木材貨物の統一解釈 (MSC/Circ.998付録) の更新
2011 TDCコードと整合するため、損傷時復原性計算において予備浮力に算入する甲板上木材貨物の解釈 (MSC/Circ.998付録) の更新。(関連IACS UI SC161)
- (3) 騒音コードに関する統一解釈
騒音コード付録のパラグラフ4.2.1に規定される「機関区域外の作業室」について明確にするための解釈。
- (4) 1988年のLL議定書の統一解釈 (MSC.1/Circ.1535/Rev.1) の改正
1988年のLL議定書37規則に規定される「船楼及びトランクによる乾舷の控除」について、控除が認められていない船首楼の有効長さが0.07L未満のB型乾舷船舶に対しては、船首楼以外の船楼による控除も認められない旨を明確にする解釈を追加するための、MSC.1/Circ.1535/Rev.1の改正。
- (5) SOLAS条約II-1章の統一解釈 (MSC.1/Circ.1362) の改正
軽荷重量の変更に関するSOLAS条約II-1章5.4及び5.5規則について、変更に伴い要求される傾斜試験の再実施や復原性資料の更新の条件を明確にするための解釈を追加するMSC.1/Circ.1362の改正。

3.3.2 ガイドライン

- (1) 第二世代非損傷時復原性基準の暫定ガイドライン (MSC.1/Circ.1627) の注釈
「デッドシップ状態」「過大加速度」「復原力喪失」「パラメトリック横揺れ」及び「ブローチング」の5つの現象について波浪中を航行する状態を想定して評価するための、第二世代非損傷時復原性基準を規定した暫定ガイドライン (MSC.1/Circ.1627) が発行されている。今般、基準を構成する要素の更なる明確化や説明により、本ガイドラインを適用する一助となることを目的とした注釈が承認された。
- (2) 燃料電池搭載船の安全に関する暫定ガイドライ

ン

長年検討されてきたIGFコード見直し作業の一環として、燃料電池搭載船の安全に関する暫定ガイドラインが承認された。

3.4 自動運航船関連要件の検討

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で検討が行われている。

今回の審議では、2024年内に自動運航船に関する非強制の目標指向型のガイドラインを作成した上で、新規強制要件 (MASS Code) を2028年1月1日から発効することを目標とした作業計画が合意された。具体的な要件は、コレスポンデンスグループ (作業グループ) を設置して検討作業が進められていく予定である。

3.5 アンモニア燃料船の安全性に関する新規検討項目

GHGの排出を削減するために、代替燃料を使用する動きが加速している。今回の会合では、アンモニアを燃料として使用する船舶に対する関連のガイドラインを検討することが提案された。

審議の結果、2023年の作業完了を目標にアンモニア燃料船の安全に関するガイドラインを検討していくことが合意された。今年9月のCCC小委員会より審議が開始される。

本件に関連し、本会はアンモニア燃料船に関わる船舶、船員及び環境に与えるリスクを最小化するための設備、制御及び安全装置等に関する要件を規定した「代替燃料船ガイドライン (第2.0版)」を2022年7月に発行している。