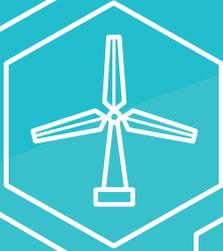


# ClassNK 技報

No.5 2022年(1)

特集：ゼロエミッション船



## —目 次—

ゼロエミッション船特集によせて……………	執行役員 技術研究所長 藤浪 幸仁…………	1
----------------------	-----------------------	---

## 特集記事 ゼロエミッション船

## (招待巻頭論文)

## 次世代環境船舶開発センターの取り組みについて

……………	一般財団法人次世代環境船舶開発センター 垣内 隆太郎…………	3
-------	--------------------------------	---

一般財団法人次世代環境船舶開発センター（GSC）では、2020年10月の設立以来、国際海運からのGHG排出削減に向けた国内外の動向等について調査分析を進めるとともに、2050年ネットゼロに至るトランジション期における船舶の在り方について、どうすれば海事業界がより円滑にネットゼロに移行できるのかといった視点から、環境船舶の開発を進めている。本稿では、ネットゼロに向けて、船舶設計に影響を与える脱炭素化に関わる規則や燃料の動向、及び国際海運からのGHG排出削減・ゼロエミッションに対応する次世代環境船舶の開発について、当センターの取組みの一部を紹介する。

船上CO <sub>2</sub> 回収装置の開発……………	三菱造船株式会社 川又 伸一，渡辺 祐輔，雲石 隆司…………	11
--------------------------------	--------------------------------	----

三菱造船は三菱重工グループの描くエナジートランジション戦略の一環として船舶が排出するCO<sub>2</sub>を削減すべく船上CO<sub>2</sub>回収装置の開発にも取り組んでいる。本稿では、この最新の取り組みとして国土交通省支援のもと、川崎汽船、日本海事協会と共同で実施した、洋上用CO<sub>2</sub>回収装置実証プロジェクト（CC-Ocean（Carbon Capture on the Ocean）Project）について紹介し、今後の開発の展望について述べる。

## 次世代型標準EV船ROBOSHIPの普及に向けての展望

……………	株式会社e5ラボ 神内 悠里，土屋 岳彦…………	17
-------	--------------------------	----

内航海運は、従来から言われている2つの高齢化（船舶・船員）、ノウハウ継承の限界だけではなく、近年では環境対策の遅れや企業評価低下の可能性といった課題に直面している。本稿では、これらの課題の現実的かつ実装可能なソリューションとしての次世代型標準EV船ROBOSHIPの特徴、従来の船舶と比較した優位性及び拡張性に関して紹介している。併せて、内航海運の課題であるデジタル化の遅れへの対応として提供を予定している、船舶向けのデジタル化ツールMarindowsを紹介する。

## 船舶からのGHG排出削減に向けた本会の取り組み

……………	企画本部 ゼロエミトランジションセンター，技術本部 GHG部…………	25
-------	------------------------------------	----

就航船のCO<sub>2</sub>排出削減のための「EEXI規制」及び「CII燃費実績格付け制度」が2023年から導入されるとともに、海上輸送ビジネスにおいても、ゼロエミッションに向けた動きが加速していくこととなる。本稿では、「EEXI規制」及び「CII燃費実績格付け制度」の概要及び本会の対応、ならびに本会が展開している「ClassNKゼロエミッション・サポート・サービス」の概要について紹介する。

ものづくりをめぐる今後の流体力学解析とAIサロゲートモデル

.....事業開発本部 環境・再生可能エネルギー部..... 33

カーボンニュートラルの実現に向けて風力エネルギーの利用拡大が促進されている。しかし、施設の規模と投資額が巨大になるほど、より高精度な構造的な安全設計や性能推定を行うため、流体力学計算の飛躍的な高速化が必要である。本稿では、時間発展計算を導く微分方程式の代替として「格子ガス法の仮想粒子モデル」を用いる“AIサロゲートモデル”を紹介し、そのファジィ推論や実時間学習の機能を通じて、高速化に資するアイデアを説明する。

代替燃料船ガイドラインC部「アンモニアを燃料として使用する船舶の安全に関するガイドライン」について

.....技術本部 技術部..... 49

2016年にパリ協定が発効され脱炭素化の世界的な気運が高まる中、2018年にIMOのMEPC72においてGHG削減戦略が採択された。GHG排出ゼロであるアンモニアが代替燃料として注目され、アンモニア燃料船の開発が世界的に進んでいる。そのような現状に対応する為、NKは昨年「代替燃料船ガイドラインC部」を発行し、アンモニア燃料船の安全性に関する指針を示した。本稿では、現状について概観するとともに、ガイドラインの概要を解説する。

鋼船規則C編の変遷と全面改正の概要

.....開発本部 船体開発部..... 57

本会は、2017年から5年間の中期経営計画の中で5つの基本戦略を策定し、その戦略の一つである「研究開発活動の推進」に対応した形で、本会独自の船体構造規則である鋼船規則C編の全面改正作業に着手した。全面改正された鋼船規則C編は、2022年7月頃に示達される予定である。本稿では、1921年に初刊行されてからの本会の構造規則の変遷について解説し、これまでの変遷から見た今回の全面改正の位置付けについて言及する。

最新の板厚計測データに基づく腐食予備厚の設定

.....開発本部 船体開発部..... 63

船体構造強度に関する規則を開発するにあたっては、船舶が25年間に腐食する衰耗量を適切に見積る必要がある。本稿では、従来用いている腐食の発生及び進行の過程に対する確率モデルに対して、最新の板厚計測データを用いることで腐食衰耗量の推定を行った結果を紹介する。また、求めた腐食衰耗量から規則に規定する腐食予備厚を定め、IACSの構造規則に規定されている腐食予備厚との比較を行った。

船舶の実遭遇海象に基づく操船影響の定量的評価

.....技術研究所..... 71

近年、自動船舶識別装置（Automatic Identification System, AIS）で得られた位置・時刻情報と波浪追算（wave hindcast）で算出した海象データを紐づけることで、船舶が実際に遭遇した海象を把握することが可能になっている。本稿では、北大西洋における一般商船の実遭遇海象を踏まえて、当該船舶の船体運動、波浪中縦曲げモーメント及び波浪変動圧を対象に、国際船級協会連合（IACS）が規定する北大西洋海域の波浪発現頻度表Recommendation No. 34に基づく操船影響の定量的評価を実施した。

## CBMライフサイクル保守管理

……………株式会社MTI 寺 剛史, 株式会社ジャパンエンジンコーポレーション 飯間 智史,  
日本海事協会 技術研究所 若生 拓也…………… 75

本研究は、「主軸受潤滑油（LO）出口温度の監視による軸受の損傷把握」を目的として行った共同研究である。研究は実船試験と模擬試験で構成されている。実船試験ではデータの監視だけではなくより監視しやすい解析方法等についても検討し、模擬試験では実船の計測ではできない損傷項目について検討を行った。

## IMOの動向 …………… 開発本部 国際部…………… 79

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77回海洋環境保護委員会（MEPC 77）及び第104回海上安全委員会（MSC 104）の審議概要を紹介する。



# ゼロエミッション船特集によせて

執行役員 技術研究所長 藤浪幸仁

ClassNK技報No.5「ゼロエミッション船」の特集に際してご挨拶申し上げます。

グローバルでの脱炭素化機運の高まりもあり、日本も2050年迄にGHG排出量実質ゼロを目指す方針を発表し、2021年4月の気候変動サミットでは、2030年度にGHG排出量を2013年比マイナス46%とする方針を打ち出すなど取組みを加速させています。

外航海運ではIMO主導で設定されたGHG削減目標のもと、規制検討・導入が進められてきましたが、2021年4月以降、各国から目標引き上げが提言されました。

これらの状況に対して、本会では2021年10月に組織改編を行い、GHG業務に関する事業戦略の立案等、統括的な管理を実施するために「ゼロエミトランジションセンター」、ならびに国際条約等への対応をはじめとした海運GHG削減という顧客ニーズに一元化して対応するために「GHG部」を創設いたしました。

これらを中心に組織が一丸となって、カーボンニュートラルの支援に取組み、皆様の事業拡大に貢献してまいります。

一方で、技術サービスの拡充を図るための技術研究開発や実証調査等を着実に進めております。本年度には新たな研究開発ロードマップを策定し、社会・環境・安全を研究重点領域として、海事業界各社、専門研究機関ならびに大学等と積極的に共同研究を計画、実施しております。

ClassNK技報では、このような連携を通じて開発された技術成果や知見をはじめ、本会の技術研究活動や国際条約の動向等を掲載しております。

前号のClassNK技報 No.4では、「自動運航」を特集とし、共同研究者各位より自動運航システムのリスク評価やシミュレーションシステムの開発等について寄稿いただきました。

本技報No.5では「ゼロエミッション船」を特集とし、カーボンニュートラルに向けた共同技術開発や次世代環境船舶開発センターの取組み等に関する寄稿をいただいております。

本会は今後も社会や業界のニーズに応えた技術研究に積極的に取組み、環境や安全に関する課題の解決を支援する技術ツールの開発や研究開発成果の公表等によって、グローバルな社会的貢献の実現を図ってまいります。

今後とも皆様からの一層のご指導とご支援をお願い申し上げます。

# 次世代環境船舶開発センターの取り組みについて

垣内 隆太郎\*

## 1. はじめに

現在、SDGsへの取り組みやそれに伴うESG投資が全ての企業の行動規範となっている。特に温室効果ガス（GHG）排出削減の動きは、企業活動・製品における価値観の大きな変換をもたらしており、地球温暖化対策の取り組みは世界的に益々加速される方向である。

国際海運についても国際海事機関（IMO）にてGHG排出削減戦略が2018年4月に採択され、2050年までにGHG排出総量を2008年比で50%以上削減（中期目標）、今世紀のできるだけ早い時期にゼロにする（長期目標）とされているが、国内外の主要海運会社が2050年ネットゼロへの挑戦を明言するなど、もはや国際海運においては2050年ネットゼロを前提に取り組んでいく時代となりつつある。このような状況において、GHG排出削減を始めとする環境性能及びその関連技術が、船舶にとって益々大きな価値を持つようになってきている。

四方を海に囲まれた日本において、海運・造船を中心とする海事産業は欠かせない産業である。一方で、熾烈な国際競争の中で生き残っていくためには、世界に先んじて様々な環境関連技術を統合し、競争力ある船舶として成立させる努力を加速していく必要がある。

当センターは、このような社会的、産業的な変革を背景に、これまでに日本の造船業が蓄積してきた力を糾合し、現在ある、また、今後開発が進む環境関連技術を統合して、最先端の船舶を持続的に企画・発信する中核的な組織として、趣旨に賛同した国内の造船業有志により2020年10月に設立された。2022年3月現在における会員企業は、今治造船株式会社、株式会社大島造船所、尾道造船株式会社、ジャパンマリンユナイテッド株式会社、株式会社新来島サノヤス造船、株式会社新来島どつく、住友重機械マリンエンジニアリング株式会社、内海造船株式会社、株式会社名村造船所、一般財団法人日本海事協会、株式会社三井E&Sマシナリー、三菱造船株式会社（五十音順）である。

当センターでは、個別企業の枠を超えた幅広い情

報収集や技術開発を行い、中長期的な環境規制の強化に対応する、様々な環境関連技術を統合した高度な環境船舶の企画・開発・商品化を促進し、日本造船業の発展に資することを目指している。

## 2. 船舶設計に影響を与える脱炭素化に関わる規則や燃料の動向

### 2.1 国際海運におけるGHG排出削減に向けた規制動向

国際海運におけるGHG排出削減は、便宜置籍や第三国間輸送等の事情から、特定の国に排出量を帰属させることが困難であること、また、国際海運が世界単一市場であることから、IMOにおける議論を通じ、全世界一律の取り組み・規制としての削減が進められている。IMOによる技術上及び運航上の削減対策の全体像を図1に示す。

国際規制の枠組みは、2011年に導入が決定された、設計時における船舶の省エネ性能を義務付ける「エネルギー効率設計指標（EEDI）」及び、CO<sub>2</sub>排出量削減のために最も効率的な運航方法を立案した計画書を船上に備え付けることを義務付ける「船舶エネルギー効率管理計画書（SEEMP）」に始まる。EEDIの導入により、船型改良や、省エネ装置の採用等による推進効率の向上を通じたGHG排出削減が進められてきた。ただし、ようやく低炭素のLNG燃料船が増えつつあるが、ゼロ炭素燃料への転換までには至っていない。

運航上の削減策としては、これまでSEEMPによる効率運航が図られてきたが、直接的に運航におけるCO<sub>2</sub>排出削減を求める規制はなかった。しかし2018年に採択されたIMOのGHG排出削減戦略に基づき、2021年6月に開催された第76回海洋環境保護委員会（MEPC 76）において、船舶の省エネ性能規制を現存船にも遡及適用するEEXI規制と、CO<sub>2</sub>排出量実績に基づく新たな規制「CII燃費実績格付け制度」を導入するためのMARPOL条約付属書VIの改正が採択された。これらの規制は2023年から導入される予定である。

\* 一般財団法人次世代環境船舶開発センター

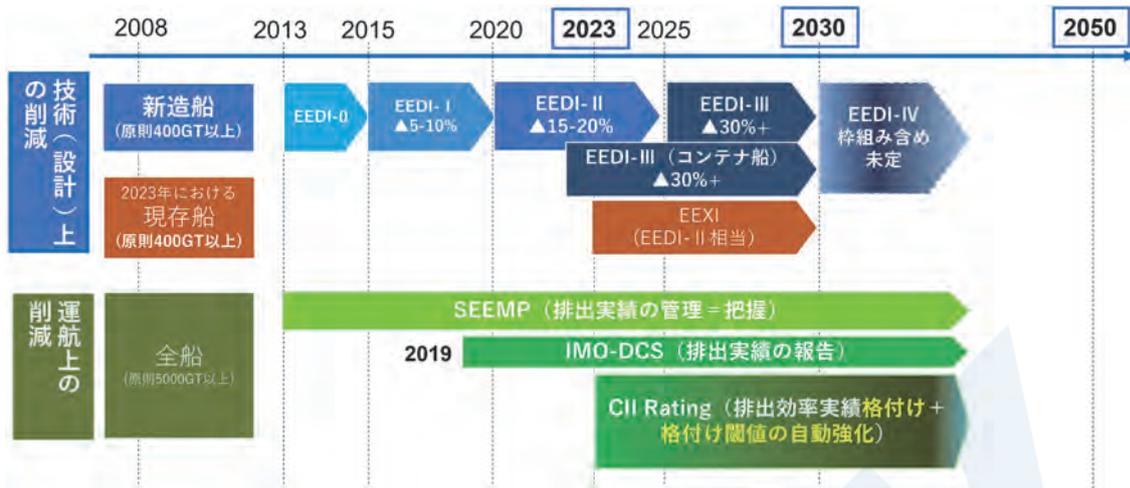


図1 技術上及び運航上の削減対策の全体像

EEXI規制は、就航船の燃費性能に基準値を設けることで、就航船から排出されるCO<sub>2</sub>排出量を削減する技術上の削減策である。本規制は、就航船の船舶の完工日を問わず、400GT以上の国際海運に従事する全ての船に適用される。また、規制値の段階的な強化はなくEEDI Phase2と同レベルの一定値に設定されている。EEXIの導入により、就航船に対しても現時点の新造船と同程度の燃費性能が求められることになる。

一方で、CII (Carbon Intensity Index) GHG排出効率実績格付け制度は、今後の船舶の設計に大きな影響を与える可能性がある規制である。これまで、船舶設計における規制の中核となってきたのは、EEDI規制であり、現在はPhase2が適用されている。今後、Phase3が予定されているが、EEDI規制は、IMOの船舶設計規制として伝統的な手法であり、就航時に適合すれば証書が発給され、原則として、一度合格すれば、その状態を維持する限り本船の運航はその船舶の生涯に亘り可能である。

他方、CII規制は、船舶の年間GHG排出実績をA～Eの5段階で格付けし、格付けの低い(3年連続でDランクまたは単年でEランク)船舶は主管庁から改善指導がなされることとなっている。制度としては環境負荷改善を促す運用上の規制と位置付けられているが、積載量等も関係するため実際には船舶設計にも影響する。注目すべきは、格付けの基準値(削減率)が毎年自動的に強化される仕組みとなっており、新造時の燃費性能を維持したとしても、次第に格付け評価が下がっていくことである。基準値は2026年までが決定済みで、2027年以降の基準値は未定であるが強化されることは決まっている。この点が、先述の伝統的な手法であるEEDI規制と全く異なっている。また、排出実績による評価であるので、減速などの運航上の対策だけで対応できない

場合、船舶設計にも大きな影響を及ぼす可能性がある。さらに、2050年ネットゼロに向けた将来の基準値によっては、製品寿命が20年を超える船舶において、運航中いずれかの時点でゼロカーボン燃料への切り替えが必要となる事態も想定される。

図2は、CIIの基準値(Cランクの中央値)が2050年ネットゼロ目標となった場合に、それを達成するためのCII削減率を試算したものである。

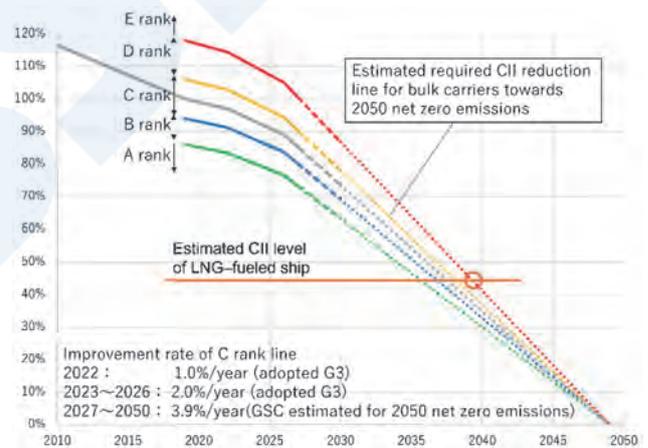


図2 CII Rating 将来の削減率 (GSC想定)

2050年ネットゼロ目標の場合は、毎年4%近くCO<sub>2</sub>排出量を削減していく努力が要求されることとなる。図2に示すように省エネとLNG燃料化によりCII性能50%前後までCO<sub>2</sub>排出量を削減した船舶であっても、2030年代後半にはEランク評価となり、即ち、その頃には図3に示すようにゼロカーボン燃料への転換が必要になると考えられる。また、現時点では規制上のペナルティは改善指導のみであるが、欧米の大手荷主や金融機関を中心に、用船している船舶及び貸出対象船舶のCO<sub>2</sub>排出量を評価する動きが強まっている。荷主における取り組みはSea

Cargo Charter, 金融機関における取り組みはPoseidon原則があり, IMOの削減目標に沿って船舶のCO<sub>2</sub>排出量削減を促すことを目的としており, その評価指標にはIMOの燃費指標が用いられているので, 用船やファイナンス調達におけるCII格付けの低い船舶へのビジネス上の圧力は今後高まっていくものと思われる。

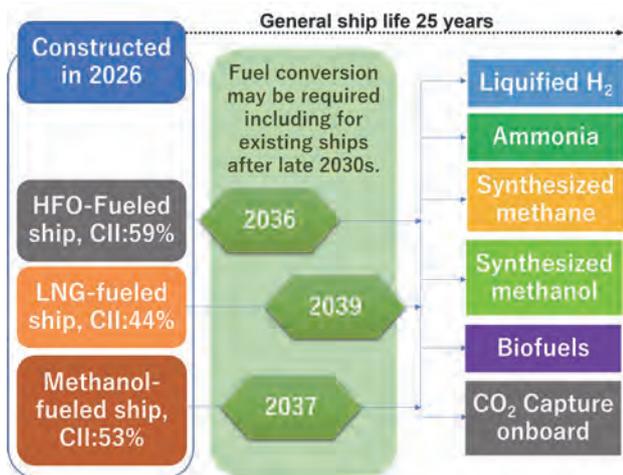


図3 GSCが考える燃料代替シナリオ

## 2.2 低カーボン, ゼロカーボン燃料の動向

ゼロ炭素燃料については, 水素, アンモニア, また合成メタノールやバイオ燃料など様々な燃料の可能性があり, 当センターでは, 燃料の生産技術動向からみた燃料コストの試算, 現時点の供給インフラの状況といった情報について収集分析を行ってきた。調査結果に基づく各燃料の性状と将来の供給可能性は, 付録に掲載する。現時点においては将来の燃料選択を決定できる状況にはないが, 国際海運における普及を考える上で, 安定的な燃焼, 船上での貯蔵性, 船上での取り扱い (安全性, 環境影響), 価格, 入手可能性などが特に重要であると考えている。IEAやNEDOなどの資料を参考に, 2030年から2050年までを対象にした代替燃料の製造コスト予想を図4に示す。

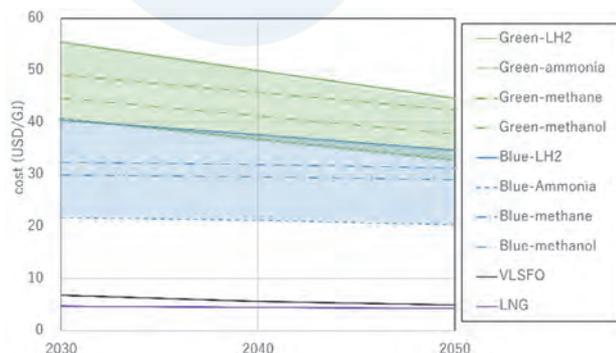


図4 代替燃料の製造コスト予想 (GSC試算)

再生可能電力由来の水素を原料として用いるグリーン燃料 (液体水素, アンモニア, 合成メタン, 合成メタノール), 天然ガス+CCS由来のブルー燃料 (液体水素, アンモニア, 合成メタン, 合成メタノール) の価格について, 燃料製造コストの観点から試算・比較を行った。なお, 合成メタノールの原料となるCO<sub>2</sub>はDAC由来及びバイオ副生由来で試算した。また, 製造・供給プロセスとして, 豪州で代替燃料を生成・貯蔵→日本へ輸送→国内貯蔵・二次輸送→各船舶へバンカリングするとした。ただし, バンカリングのコストは算入していない。

2050年に向け, 再生可能電力の価格低下に伴ってグリーン燃料の価格は低下していくものの, 総じてブルー燃料が安価であり, 最も安価なのはブルーアンモニアである。なお, 熱量 (GJ) 当たりのブルーアンモニアと重油・LNGとの価格差は15USD前後となり, CO<sub>2</sub>換算では250-300USD/CO<sub>2</sub>-t程度である。液体水素は液化・貯蔵・輸送に係るコストが多くなった。もちろん今後の製造技術革新による価格変動はあり得るが, 現在想定される技術ベースではこのような見通しとなる。

## 2.3 外航船舶向けゼロカーボン燃料の見通し

当センターでは, 現時点において外航船舶向けとしては, 2030年代までは当面の低炭素燃料としてLNGの利用拡大が進み, その後にブルーアンモニアへの転換が進むシナリオが有力とみている。その理由としては下記が挙げられる。

- 供給量, 供給拠点からして, 当面の低炭素を進めるための燃料としてはLNGが現実的な解とならざるを得ない状況である。ただし, メタンスリップ対策はより重視される。
- ゼロ炭素燃料 (グリーン及びブルー) の燃料生産コスト予想としてはブルーアンモニアが最も有利であり, 液体水素は液化・貯蔵・輸送のコストが嵩む上, 船上での貯蔵性及び取り扱いの難しさの課題もあり普及には困難が予想される。アンモニアは毒性やN<sub>2</sub>Oの懸念があるものの, 機関メーカーや船級協会ではそれへの対処も想定した機器開発・ガイドライン整備を進めており, 普及に向けて大きな障害にはならないのではないかと考えられる。
- カーボンニュートラル合成メタン及び合成メタノールは, 原料となるDAC由来, バイオ由来のCO<sub>2</sub>のコストと供給力が不透明であり, 排気ガス回収由来のCO<sub>2</sub>では排出権の扱いが課題となる。
- バイオ系燃料は生産スケールに課題がある。また, バイオ油は航空機燃料との需要競合も指摘されており, 船舶用燃料としての必要量を確保するのは困難が予想される (Pilot燃料などでの活用は期

待される)。

ただし、ゼロカーボン燃料の中では比較的安価と予想されるブルーアンモニアでも現在の船用燃料に比べると相当の高価格になると想定され、ゼロカーボン燃料への転換の実現には、IMOによる国際的な規制の確立や脱炭素化に向けた投資促進といったビジネス面での後押しが不可欠である。

なお、既存インフラを活用できる合成燃料(メタン、メタノール)も円滑なトランジションの点から期待する声も強い。また、近距離航路では必要とされる総エネルギー量も少ないため、水素や電力(燃料電池・バッテリー等)なども活用可能と考えられ、航路や船種によって様々な燃料が使用されると見込まれる。

### 3. 国際海運からのGHG排出削減・ゼロエミッションに対応した次世代環境船舶の開発

#### 3.1 規制や燃料動向を踏まえた次世代環境船舶の方向性

国際海運におけるGHG排出規制動向やゼロカーボン燃料の関連技術、インフラ整備動向等を踏まえた上で、2050年ネットゼロに至る海事産業のトランジション期における船舶の姿はどのようなものであるかについて、当センター設立以来、規制動向、代替燃料の動向や関連技術の動向等の様々な調査分析を行いつつ検討を進めてきた。規制動向や代替燃料関連技術開発動向、バンカリングインフラ整備動向に不確実性が大きく、いまだ将来像は不透明ではあるものの、蓋然性の高いトランジションシナリオとして、LNGからアンモニアの利用が進むとの想定のもと、下記のような状況認識、方針で具体的な

ソリューションとしての船舶の概念設計、基本計画を行っている。

- IMOで実燃費格付け制度(CII規制)が導入され、製品評価における環境価値、製品寿命に対する重要性が高まる。
- CII規制の格付け基準値は毎年厳しくなる。
- IMOで「2050年ネットゼロ」目標が導入されることを想定し、2025年から2050年までのトランジション期を通じて競争力を持つ船舶を目指す(市場投入は2025年頃を想定)。
- 国際海運におけるゼロカーボン燃料としては、アンモニアが有力と判断。
- 2030年代までは低炭素燃料としてLNG燃料の利用拡大が進み、その後ゼロエミッションに向けてアンモニアへの転換が進むというシナリオを想定。ただし、合成メタンの可能性も考慮。
- 日本造船業の商品ポートフォリオを考慮し、太宗船分野のゼロカーボン化促進及び日本造船業界の次世代主力商品開発として、バルカー、タンカー、コンテナを主たる開発対象船種に選定。設計難度が高い中小型の船型を対象に開発することで設計の汎用性も確保。

具体的な開発対象燃料コンセプトとしては、船舶の生涯コストや燃料見通し、不確実性を孕む外部環境へのフレキシビリティ等を勘案したメリット、デメリットについて評価を行った。その結果、様々なコンセプト候補の中から、有利と考えられるLNG-DF (Dual Fuel) (CII改良型)、LNG-DF (アンモニア-DF化Ready型)、HFO-専焼 (アンモニア-DF化Ready型)、アンモニア-DFの4つのコンセプトを開発対象に選定した。図5にそれぞれのコンセプト船のトランジションイメージを示す。

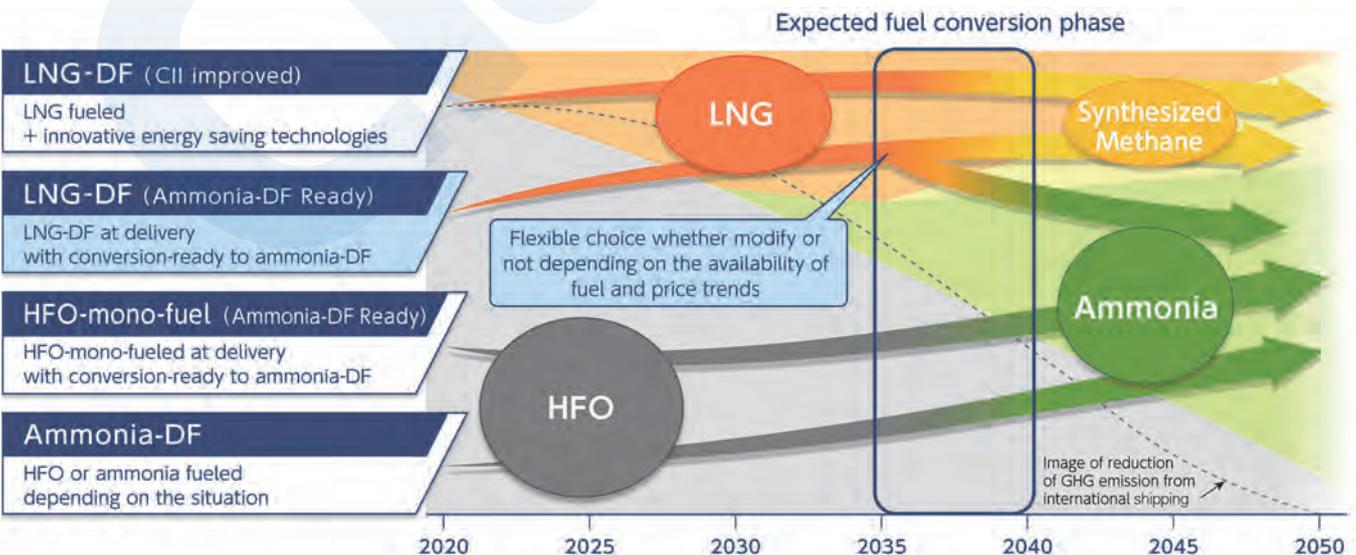


図5 トランジション期におけるソリューション(船舶コンセプト)イメージ

環境負荷の低いLNGや、アンモニア燃料を使用するコンセプト船を検討する際の設計上の主な課題としては、エネルギー密度の関係から、燃料タンク容積・形状に、設計上大きな影響があるという点である。各代替燃料における体積当たりのエネルギー密度と、重量当たりのエネルギー密度の関係性及び想定されるタンク形式の例を図6に示す。

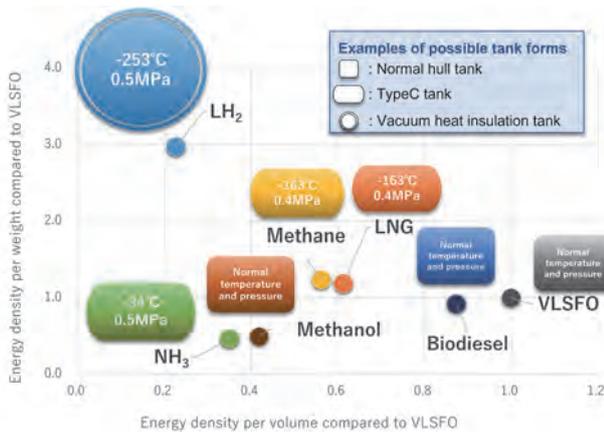


図6 各燃料のエネルギー密度と想定タンク形式のイメージ

従来の重油燃料船並である20,000SMの航続距離を確保しようとする、燃料の熱量と体積の関係からLNGは重油の約1.7倍、アンモニアは約2.7倍の容積を確保する必要がある。このため、本船には想定する出入港ターミナルで許容される主寸法制限範囲内で、貨物積載能力に大きな影響を与えることなく燃料タンクを配置する工夫が求められる。

従来の重油とは全く異なる性状の燃料、即ち常圧では低温、侵入熱によりガス化する、引火性が高い、毒性がある、燃焼性が重油と異なるといった特性を持つ燃料を扱う必要があるため、燃料供給システムがこれまでと大きく異なった物となる。加えて、燃料タンク、燃料供給装置、居住区等の配置や防火、消火、脱出経路の確保といった安全性への配慮が重要となってくる。さらに、配置検討のみならず、ゼロエミ達成に向けて、GHGをこれまで以上に大きく削減するが、従来よりも非常に高価になると予想されるゼロカーボン燃料の使用量を削減し、経済性を向上させるための省エネ装置の評価と採否の検討も併せて行っている。省エネ装置の評価においては、これまでの燃費改善による直接的なメリットのみならず、CII格付け改善による製品寿命の延長効果も見込めるため、従来とは異なった視点も加えて本船に採用する省エネ装置の評価を行う必要がある。

### 3.2 次世代環境船舶の設計事例

以上のような開発の一環として、当センターは、会員造船会社との連携によりアンモニア燃料パナマックスバルクキャリアの設計を我が国で初めて開発し、本年1月20日、一般財団法人日本海事協会（ClassNK）より設計基本承認（Approval in Principle：AiP）を取得した。AiP取得船の概略GAを図7に示す。

この度AiPを取得した設計では、ClassNKのアンモニア燃料船のガイドラインの要件に従って一般配置、燃料供給コンセプト、防火・消火・避難経路、危険区画コンセプト、アンモニア処理対策、バンカリング時緊急離脱要領、トリム・復元性計算等の検討を行い、十分な安全対策を施すとともに、重油に比べて大幅に容積が増えるアンモニア燃料のタンク容量及びタンク配置について入念な検討を行い、貨物積載量・航続距離への影響を最小限にとどめるなど、安心して使いやすい船舶としている。また、ケーブサイズなど、より大型の船舶や、就航後の改造を想定した「アンモニアレディ」のLNG燃料バルクキャリアなどへの展開も考慮した設計とした。

本船の主な特徴は下記の通りである。

- ・船尾に居住区を配置することで、従来の主寸法を維持した上で大容量のアンモニア燃料タンクを効率的に配置
- ・アンモニア燃料タンクと救命艇を隔離することで、非常時にアンモニア燃料タンク近傍を通過しない、より安全な脱出経路を確保
- ・バルクキャリアにおける主要航路である極東～豪州往復、南米～南アジア片道を想定し、十分な航続距離を確保するアンモニア燃料タンク容量
- ・HFO容量も従来船並に確保し、燃料トランジション期におけるアンモニア燃料供給に対する不安へも対応
- ・貨物槽容積は従来の重油焚きパナマックスバルクキャリア並を確保
- ・NKのみならず主要船級ガイドラインを参照し、安全対策を実施
- ・タンク配置等基本的な配置をLNG燃料船と共通の配置・構造とすることで、就航後の改造を想定した「アンモニアレディ」のLNGバルクキャリアへの展開も考慮

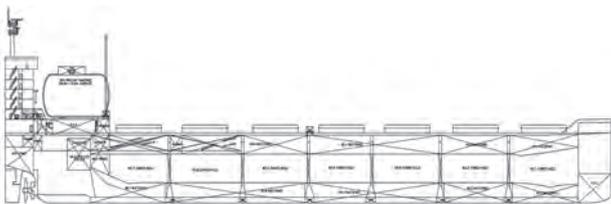


図7 AiP取得船概略配置図

主要目を表1, 外観を図8, 9に示す。

表1 AiP取得船の主要目

主要目	
LENGTH(O.A.)	abt. 228.9 M
LENGTH(B.P.)	225.45 M
BREADTH(MLD)	32.26 M
DEPTH(MLD)	20.10 M
DEADWEIGHT	abt. 80,400 MT
MAIN ENGINE	MCR 8,000 kW
SERVICE SPEED	abt. 14.2 KNOTS
NH <sub>3</sub> FUEL TANKS	2,500m <sup>3</sup> x 2sets



図8 AiP取得船外観（前方から）



図9 AiP取得船外観（後方から）

めた世の中の動向は、今後めまぐるしく変化していくことが予想される。脱炭素に向けた環境価値の高まりによって、経済性に相反する評価基準への対応も迫られている。また、CII格付け制度の導入により、これまで建造後20年以上の長期に亘って運航することが当たり前であった船舶の製品寿命に大きな影響を与える可能性が生じている。こういった世の中の動向のもと、船舶を運航・管理するユーザーにとって、トランジション期における船舶の脱炭素化に関わる事業リスクをどう考え、どのような船舶を購入すべきかについて、これまで以上に難しい判断が求められる。

このような状況に対応するため、当センターでは、継続した情報収集、分析に基づいて、トランジション期においてどのような船舶を提供していくことが、海運・造船業界にとって合理的なソリューションとなりうるかを重要課題と捉え開発を行っている。

具体的な次世代環境船舶の開発については、現状のソリューション案の検討を会員各社の協力も得ながらさらに詳細に設計展開し、客先への提案が可能となるよう検討を深めていく。また、並行して新燃料使用に必要な技術及びシステム、安全性、環境性能、燃料切り替えを想定した複数燃料への対応、さらなる燃費改善といったソリューション実現のために不可欠な共通課題について、検討や船用メーカーとのコラボ等を実施し、今後の設計に反映していきたい。

これらのセンターでの活動を通じ、日本の海事産業の脱炭素化並びに、さらなる日本造船業の発展に貢献していくことを目指している。

## 参考文献

- 1) 平松 彩, 竹内 智仁: 次世代環境船舶開発センター (GSC) の取り組み, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第57巻 第1号, 2022.
- 2) 竹内 智仁: 船舶分野における脱炭素化の展望, 日本エネルギー学会機関誌「えねるみくす」, 第101巻 2号, 2022.

## 付録

GSC調査結果に基づく各燃料の性状と将来の供給可能性 (次ページ参照)

## 4. おわりに

2050年ゼロエミッション達成に向け、規制を含

GSC調査結果に基づく各燃料の性状と将来の供給可能性は下表の通り。

	VLSFO	LNG	液化水素 (LH2)	アンモニア	カーボンリサイクル (CR) 合成メタン	CR 合成メタノール	バイオディーゼル (FAME)
低位発熱量 (GJ/t)	40.4 (39.8~41.7)	48.0 (46.5~50.4)	120.0	18.8	50.0	19.9	37.1
液体密度 (t/m <sup>3</sup> )	0.93	0.48	0.0708	0.7	0.422	0.79	0.885
CO <sub>2</sub> 換算係数 (CO <sub>2</sub> -t/燃料-t)	3.126	2.693	0	0	(0*)	(0*)	0
熱量当たり体積比 (VLSFO比, @液化状態)	1.00	1.63	4.42	2.86	1.78	2.39	1.14
熱量当たりCO <sub>2</sub> 排出量 (CO <sub>2</sub> -g/GJ)	77.38	56.10	0	0	(0*)	(0*)	0
副生GHG及び温暖化係数 (IPCC AR5より)		メタン (スリップ) 温暖化係数: 28		N <sub>2</sub> O 温暖化係数: 265	メタン (スリップ) 温暖化係数: 28		
沸点 (°C)	200~400	abt.-161	-253	-33	-161	65	345~354
船上での貯蔵方法 (液体状態)	常温常圧 船体付きタンク	Type C (低温or加圧) or 独立方形タンク/メムブレ	真空防熱タンク	Type C (低温or加圧) or 独立方形タンク/メムブレ	Type C (低温or加圧) or 独立方形タンク/メムブレ	常温常圧 船体付きタンク	常温常圧 船体付きタンク
船上貯蔵時の性状 (液体状態)	常温, 常圧	-160~-140°C, 0.07~0.5MPa	app.-250°C, 0.5MPa	-30~-10°C, 0.07~0.5MPa	-160~-140°C, 0.07~0.5MPa	常温, 常圧	常温, 常圧
発火点 (°C)	abt.407	abt.537	560	630	537	440	256~266
低速船用エンジンサイクル	ディーゼル	ディーゼル/オットー	ディーゼル/オットー	ディーゼル/オットー	ディーゼル/オットー	ディーゼル/オットー	ディーゼル
パイロット燃料	不要	要	要	要	要	要	FOとブレンド
将来の供給拡大の可能性 (世界全体・陸用) 留意点・影響要素	▲~△ 石油への投資減少	△ ガスへの投資減少	◎ 気体液体を問わず水素全体として拡大, 水素キャリアとして液化は極一部	○ 陸側の需要拡大 (エネルギー産業の参入, スケールアップと低コスト化)	△~○ 原料CO <sub>2</sub> ガスのCN化, 長期的確保	△~○ 陸上 (自動車や火発等) でのメタノール燃料の利用拡大見通し不明	○ 第1世代は土地転換問題あり, 第2世代は作物の伸びと転換技術次第
将来の供給拡大の可能性 (船用) 留意点・影響要素	▲~△ 陸上需要の減少	○ メタンスリップ批判	▲~△ (液化水素)	○	△~○	△~○	△ Pilot燃料向けか航空機向けとの競合
バンカリングインフラ	◎	△~○ 拡大中	無し	輸出入インフラの活用?	△~○ LNGインフラ利用可能		FOのインフラ利用可能?

# 船上CO<sub>2</sub>回収装置の開発

## — 洋上用CO<sub>2</sub>回収装置実証プロジェクト“CC-Ocean Project” —

川又 伸一\*, 渡辺 祐輔\*, 雲石 隆司\*

### 1. はじめに

脱炭素化の世界的な機運が高まる中、IMOでは国際海運分野からのGHG排出量を2050年に半減(2008年比)させ、今世紀中早期にゼロとすることを旨とする「GHG削減戦略」が採択され、更なる削減加速も議論されている。GHG削減策としては化石燃料から合成燃料、水素、アンモニアなどの代替燃料への転換が検討されている。一方、船舶から排出されるCO<sub>2</sub>を船上で分離・回収し、CO<sub>2</sub>貯留地に半永久的に貯留することや転換利用することもGHG削減策の候補の一つと考えられている。

三菱造船株式会社(以下、三菱造船)は三菱重工グループの描くエナジートランジション戦略の一環として船舶が排出するCO<sub>2</sub>を削減すべく船上CO<sub>2</sub>回収装置の開発にも取り組んでいる。この最新の取り組みとして国土交通省支援のもと、川崎汽船株式会社(以下、川崎汽船)、一般財団法人日本海事協会(以下、日本海事協会)と共同で実施した、洋上用CO<sub>2</sub>回収装置実証プロジェクト(Carbon Capture on the Ocean Project: CC-Ocean Project)について紹介する。

### 2. CC-Ocean Project概要

本プロジェクトは洋上におけるCO<sub>2</sub>回収技術の検証と船用化要件の整理のため、世界に先駆けてCO<sub>2</sub>回収小型デモプラント(以下、デモプラント)を川崎汽船運航の石炭運搬船“CORONA UTILITY”(以下、本船)に搭載し、商用運航条件で実証試験を実施したものである。

プロジェクト実施期間は2カ年であり、日本海事協会によるデモプラントのHAZID(潜在危険および想定災害についての同定評価)実施後に、デモプラントを製作し本船に搭載、2021年8月より実証試験を開始し、約6カ月間の洋上環境下における運転と性能確認を行うための計測を実施した。

本船に搭載したデモプラントは化学吸収法を採用した陸上プラント排ガス処理用のCO<sub>2</sub>回収装置をベースに船舶特有の船体動揺・振動などに対する対策を織り込んで船用化し製造したものである。デモプ

ラントのイメージ図を図1に示す。



図1 デモプラントのイメージ図

### 3. CO<sub>2</sub>回収システム概要

図2に船用機関排ガスからのCO<sub>2</sub>回収プロセスフローを示す。デモプラントは、排ガス冷却塔、吸収塔、排ガス洗浄塔、再生塔の主に4塔から構成される。船用機関から排出された排ガスは、煙突出口の排ガス管より一部分岐させた配管よりブローにて吸引し、デモプラントに供給される。デモプラントに供給された排ガスは、排ガス冷却塔に送られ、排ガス冷却塔内で上部より散布した清水により常温近くまで冷却される。尚、当該清水は系内を循環しており海水と熱交換することで排ガスより得た熱を除去する。

排ガス冷却塔を出た排ガスは、吸収塔に送られ、吸収塔内で上部より散布した吸収液と接触することにより排ガス中のCO<sub>2</sub>が吸収液に吸収される。

吸収塔を出た排ガスは、排ガス洗浄塔に送られ、排ガス洗浄塔内で上部より散布した清水により排ガスに含まれるCO<sub>2</sub>吸収液が洗い流される。

排ガス洗浄塔を出たCO<sub>2</sub>の少ないクリーンな排ガスは、煙突近傍まで導設した配管を通り大気に放出される。

CO<sub>2</sub>を吸収した吸収液は、吸収塔下部から再生塔に送られ、蒸気により加熱されることでCO<sub>2</sub>を放出し、再生された吸収液は吸収塔に戻り再利用される。

\* 三菱造船株式会社

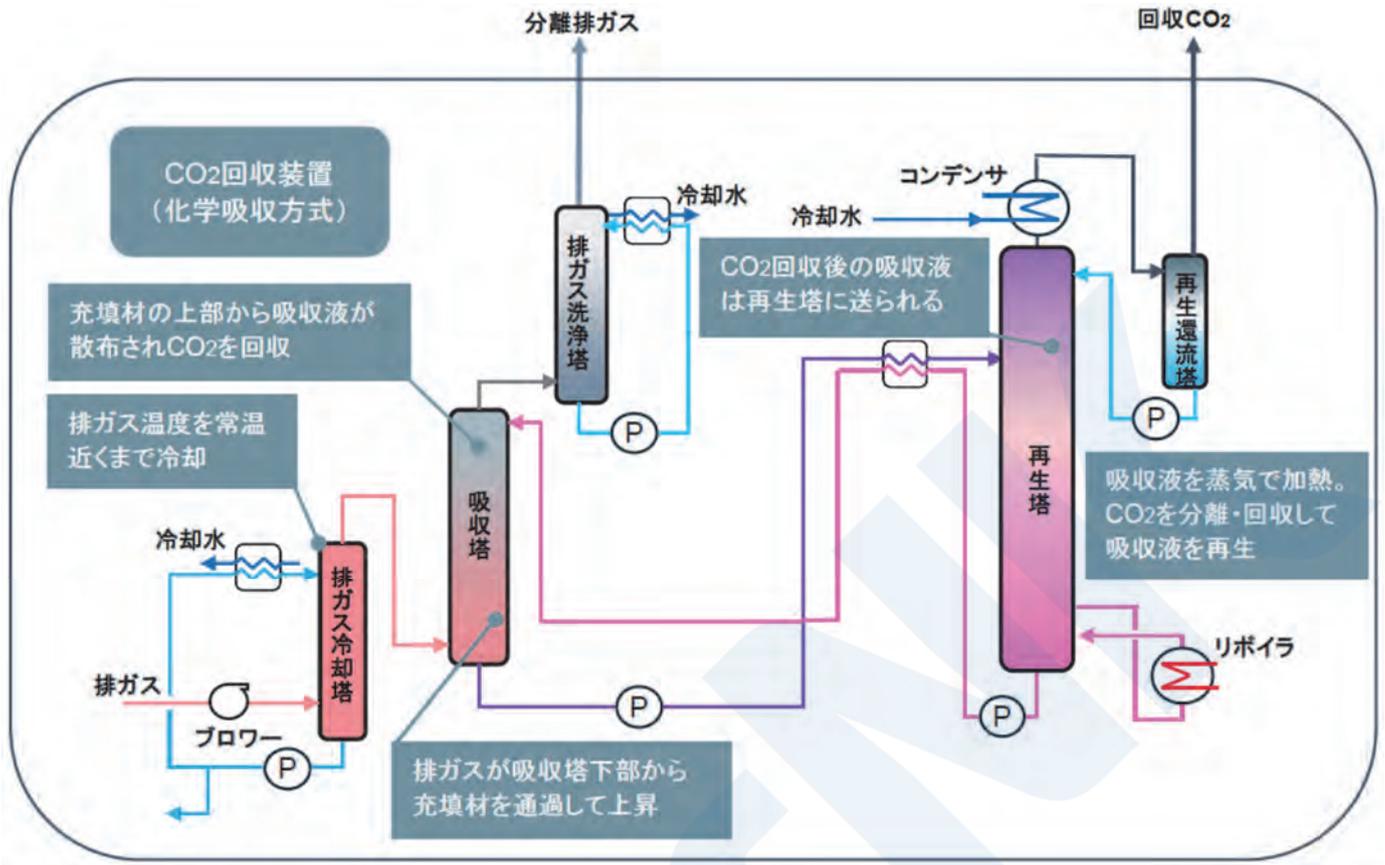


図2 CO<sub>2</sub>回収プロセスフロー

尚、前述の通り本プロジェクトでは、洋上でのCO<sub>2</sub>回収技術の検証を目的としているため、回収したCO<sub>2</sub>の液化装置、貯蔵タンクは装備しておらず、再生塔で回収したCO<sub>2</sub>は、性状分析後に大気開放とした。

#### 4. デモプラントのHAZID

##### 4.1 HAZID実施手順

デモプラントで実施したHAZIDの手順を以下に示す。

- ①日本海事協会が主にCO<sub>2</sub>回収システムの安全性に関するレビューを、川崎汽船が主にデモプラントのオペレーションに関するレビューを行い、リスクを洗い出す。
- ②洗い出したリスクに対し、システムの故障モードと原因、その故障が及ぼす影響（局所的な影響とシステム全体に及ぶ影響）を分析する。
- ③リスクが発生した場合の人間や船舶への影響の深刻度と頻度を指標で数値化しリスクを評価する。
- ④リスク低減対策を立案し、デモプラントの設計・製造や運転要領書、CO<sub>2</sub>吸収液の取扱要領書にフィードバックする。

- ⑤リスク低減対策実施後のリスクを再評価し、リスクが許容可能なレベルであることを確認する。

##### 4.2 リスクおよびリスク低減対策

HAZIDで洗い出した主要なリスクおよびリスク低減対策を表1に示す。

表1 主要なリスクおよびリスク低減対策

リスク	リスク低減対策
CO <sub>2</sub> 吸収液の漏洩	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CO<sub>2</sub>吸収液システムの配管継手部に飛散防止処置を実施する。</li> <li>・デモプラント起動前、運転中、停止後にCO<sub>2</sub>吸収液の漏洩が無いことを目視で確認する。</li> <li>・デモプラント室の入口に注意銘板（「入室時は薬液漏れ等の異常が無いことを確認」）を設置する。</li> <li>・デモプラントからCO<sub>2</sub>吸収液が漏洩した場合でも船外漏洩しない対策を実施する。</li> <li>・運転要領書に、入室時のCO<sub>2</sub>吸収液の漏れ確認、漏洩時の処置要領を追記する。</li> </ul>

リスク	リスク低減対策
CO <sub>2</sub> 吸収液の取り扱いミス	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CO<sub>2</sub>吸収液の取り扱い時は保護具を着用する。</li> <li>・CO<sub>2</sub>吸収液は補給タンクの液位を目視で確認しながら補給する。</li> <li>・デモプラント設置場所真下にある非常用発電機起動中の振動や船体動揺により、CO<sub>2</sub>吸収の補給が困難な場合は補給しない。</li> </ul>
排ガス、CO <sub>2</sub> の漏洩	<ul style="list-style-type: none"> <li>・デモプラント室に入る際またはデモプラントの起動前に排気ファンを運転する。</li> <li>・排気ファンの発停スイッチは区画外部に設置する。</li> <li>・デモプラント室の入口に注意銘板（「入室の際またはデモプラント起動前の排気ファン運転」）を設置する。</li> <li>・運転要領書に、上記排気ファンの運転要領を追記する。</li> </ul>

## 5. 搭載工事

### 5.1 搭載船概要

デモプラントを搭載した本船概要を以下に示す。

船名：CORONA UTILITY

船種：88,000トン型 石炭専用船

船の寸法：全長 229.98m，型幅 38m，型深 19.9m

竣工：2016年1月

船籍：日本

### 5.2 搭載工事概要

搭載工事は三菱重工業 横浜製作所の岸壁にて実施した。図3に搭載工事のイメージ図を示す。

Engine Casing横に張り出しデッキを追設し、その上に設けた独立の部屋（以下、デモプラント室）内にデモプラントを設置した。

電力炭運搬に従事している本船は、揚荷後、積地へ向かう途中で搭載工事を実施する必要があるため、横浜製作所の岸壁の空き状況と本船運航スケジュールを綿密に調整しながら工事のタイミングを決定した。

また、工期を短縮すべく横浜製作所での搭載工事前に以下の準備を実施し、計画通り短期間で搭載工事を完了した。

- ・デモプラントへ接続する配管や電線工事，デモプラント室搭載に伴う船殻補強などは中国ドックで実施した。
- ・デモプラント室は内部の艤装品を含め事前に陸上で製作しておき，本船着岸後に当該室を一括搭載した。

- ・デモプラント室搭載にあたり必要となるJG証書，船級証書の書換えによる改測等諸検査は，同室搭載前に陸上で事前に実施した。
- 図4～6に搭載工事の様子を示す。

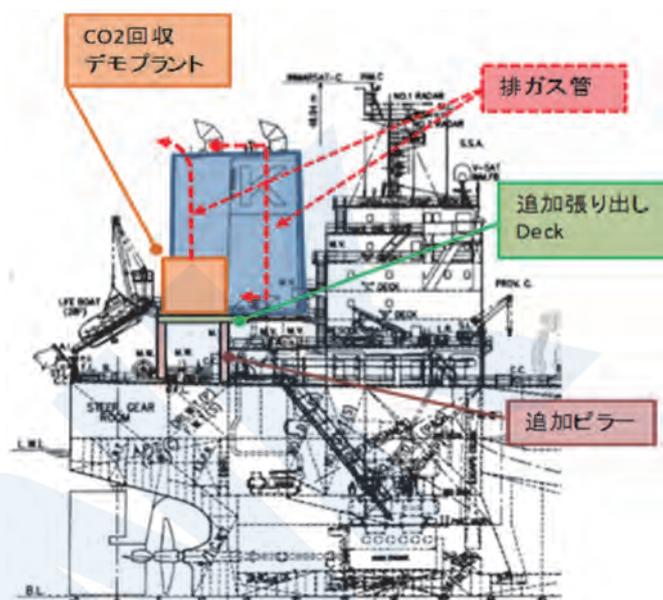


図3 搭載工事のイメージ図



図4 デモプラント室搭載中の様子



図5 デモプラント室搭載中の様子



図6 本船に搭載完了したデモプラント室

## 6. 実証試験

### 6.1 試験概要

実証試験は、日本とオーストラリア、カナダ、ロシア間の航路で実施した。デモプラントを本船に搭載後、三菱造船技師が約1カ月間乗船し、同プラントの運転、メンテナンス、乗組員への操作指導、排ガスおよび分離・回収したCO<sub>2</sub>の計測などを実施した。

三菱造船技師による試験終了後も乗組員が引き続き同プラントの運転、計測、メンテナンスなどを約5カ月間実施した。この実証試験期間中、デモプラントの運転要領書は実運転に即して乗組員によりアップデートが続けられ、現場でのノウハウが詰め込まれた貴重なマニュアルへと昇華していき確実なオペレーションのためのバイブルとなった。このようにして乗組員が商用運航中にCO<sub>2</sub>回収を行う世界初の試みは成功裏に完結した。

実証試験における各種計測はデモプラントの運転が定常状態になってから開始し、入口排ガス組成、出口排ガス組成、回収CO<sub>2</sub>ガス組成をそれぞれ計測した。船上で分析ができない項目については、サン

プリングのみ行い、陸上に持ち帰って分析した。

一方、本船上で取得した運転データは直ちに陸上に転送され三菱造船側で種々解析し、デモプラントの調整やCO<sub>2</sub>吸収液の追加補充などのアドバイスを本船に連絡することで乗組員による実証試験をサポートした。このような船陸通信の要領や運転データの確認・乗組員へのサポート体制を川崎汽船、本船と実証試験開始前に取り決めていたことも実証試験が成功した要因の一つと考えられる。

図7～10に実証試験の様子を示す。



図7 デモプラント操作中の様子



図8 本船乗組員への操作指導



図9 船用機関より排出される排ガスの計測



図10 本船乗組員によるデモプラントの運転

## 6.2 検証項目

実証試験での主要な検証項目を以下に示す。

- ①デモプラントのCO<sub>2</sub>回収性能
- ②機関負荷変動，船体動揺がCO<sub>2</sub>回収性能に及ぼす影響

## 6.3 試験結果

### 6.3.1 デモプラントのCO<sub>2</sub>回収性能

実証試験では計画通りのCO<sub>2</sub>回収量，CO<sub>2</sub>回収率，回収CO<sub>2</sub>純度を達成し，陸上で実績のあるCO<sub>2</sub>回収技術が洋上で適用可能であることを実証した。回収CO<sub>2</sub>純度に関しては99.9%以上を達成した。陸上プラントの場合，純度が99.9%以上の回収CO<sub>2</sub>は肥料・メタノール増産といった化学用途，冷却用ドライアイスなどの一般用途，原油増産を目的としたEOR（Enhanced Oil Recovery）用途など多岐にわ

たって活用されているが，今回の実証試験において，そのような高純度のCO<sub>2</sub>を回収することに成功した。

### 6.3.2 機関負荷変動，船体動揺がCO<sub>2</sub>回収性能に及ぼす影響

実証試験期間中，主機負荷は概ね40%～70%で変動していたが，デモプラント入口排ガスのCO<sub>2</sub>濃度はほとんど変化が無かったため，CO<sub>2</sub>回収性能への影響はほとんど見られなかった。また，実証試験期間中の船体動揺に対してもCO<sub>2</sub>回収性能への影響はほとんど見られなかった。

## 7. まとめと今後の展望

船舶からのCO<sub>2</sub>回収技術の取り組みとして，CC-Ocean Projectの概要，検証項目，実証試験結果について紹介した。

今後は実証試験で得られた知見と技術課題を踏まえ，未検討の液化・船上貯蔵も含めたトータルシステムの開発を進めると共に，船用化・コンパクト化・コストダウンなどを実現し製品化へ向けた取り組みを進めていく。

前述の通り，三菱重工グループはエナジートランジションの事業強化に戦略的に取り組んでおり，CO<sub>2</sub>エコシステムの構築はその中の柱の一つである。CO<sub>2</sub>を回収して貯留や転換利用するCCUSは，カーボンニュートラル社会を実現するための有効な手段となる。三菱造船では，パリ協定の発効により世界的に脱炭素化への意識が高まる中，船舶のみならず洋上設備からのGHG排出削減についても継続して取り組むことで，世界規模でのカーボンニュートラル社会の実現に貢献していく。

## 謝辞

本実証試験は，国土交通省海事局の補助事業である「海洋資源開発関連技術高度化研究開発事業」の支援を受けて実現したものであり，実証試験の機会を与えて頂いたことに御礼申し上げます。また，HAZIDを中心にご助言頂いた日本海事協会，実証試験をリードしていただいた川崎汽船，ケイラインローローバルクシップマネジメント株式会社，「CORONA UTILITY」の乗組員の方々に改めて御礼申し上げます。

# 次世代型標準EV船ROBOSHIPの普及に向けての展望

— 我々は世の中を変えることができるだろうか? —

神内 悠里\*, 土屋 岳彦\*

## 1. ROBOSHIP名前の由来

「ROBOSHIP」は、「ROBOT」と「SHIP」を組み合わせた造語である。

執筆者の一人がまだ子供であった時代（1950～1960年代）、21世紀ははるか未来であった。その未来では、人類は戦争や病気の災厄から解放され、平和を享受する世界が描かれていた。人類は、科学技術により進歩した生活の中で生き、そこには必ず「ROBOT」がいた。「ROBOT」は、仕事で人々を助けるだけでなく、家庭でも家事を担い、時には子供をしつけ、時には友人となる「心やさしい科学の子」\*1であった。

そして「SHIP」は言うまでもなく「船」を意味するが、接尾語としての「SHIP」は、例えば「FRIENDSHIP」、「PARTNERSHIP」で使われるように「あり方」、「形作るもの」を意味する言葉である。

現在、我々は21世紀に生きている。科学技術は進歩し、人類はその恩恵に浴しているが、20世紀と変わらず戦争や病気に怯え、それだけではなく気候変動、少子高齢化といった新たな問題に直面している。

そして内航海運業界は、下記「2. 内航海運を取り巻く現況」で述べる諸課題に直面している。「船員の助けとなる船」、「内航海運の本来のあり方を形作る船」という思いを込め、諸課題の解決手段となることを願い、次世代型標準EV船を「ROBOSHIP」と名付けた。

## 2. 内航海運を取り巻く現況

### 2.1 2つの高齢化（船舶・船員）

内航海運の船員数は、2020年10月時点で21,374名となっており、前年比約260名の増員となったものの船員不足はいまだに続いており、年齢構成を見ると50歳以上が5割を超え高齢化が進んでいる。（2020.10.1現在の数値、内航海運組合総連合会HP

より引用）

同様に内航船の船齢別内訳は、7年未満が隻数比16%、総トン数比29%となっている。また14年以上の老齢船は隻数比68%、総トン数比45%を占めている。船齢別平均船型を見ると、14年未満が1,000総トンを超えているのに対し、14年以上の老齢船が509総トンとなっており小型船ほど高齢化が進んでいるものと言える。

一方隻数別で見ると、500総トン未満が77.9%を占めており、2つの高齢化にどう取り組むかが喫緊の課題となっていることが分かる。（2020年度末ベース、日本内航海運組合総連合会HPより引用）

### 2.2 ノウハウ継承の限界

2017年の調査\*2では、定年退職者（1.5%）を上回る新卒者の採用（2.9%）があるにもかかわらず、船員不足が問題となるのは、離退職者の割合（14.7～17.1%）が極めて高い点にあると指摘している。

ここでの問題点は、教育に当たるべきベテランが急速にリタイアする中で、これら未熟練の船員を早急に実運航に投入できるかという点である。この指摘は、現在、種々の立場で船員教育に当たっている方々の尽力を揶揄するものではない。指摘したいのは、実運航に投入するためのソフト・ハードが、システムティックに準備されているかという点である。変化を好まず抜本的な変革を避け、改善を積み重ねるスタンスは、日本の官庁・企業の、組織及びITシステム活用のあり方の1つの特徴とも言える。かつての日本軍は、兵員練度を極限まで追求し、精神主義と混在させることで、のちに軍事技術・戦略の軽視にもつながり、それが敗戦の一因となった。テクノロジーの変革に注視せず、従来通りのビジネスモデルで難局を乗り切ろうとするなら、我々は過去の歴史から何も学ばなかったことになる。

第2次大戦においては、日本政府及び旧日本軍の希望的観測、机上の空論、こうあってほしいという発想などにしがみついたために、多数の犠牲者が出ている。根拠のない楽観は禁物である。「歴史は繰り返さぬが、韻を踏む。」これは、アメリカの小説

\* 株式会社e5ラボ

\*1 TVアニメ「鉄腕アトム」主題歌 作詞：谷川俊太郎

\*2 松尾俊彦：内航船員の採用および離退職の規模と特徴，NAVIGATION203号，2017年10月投稿

家マーク・トウェインが残した言葉である。我々は、このことを忘れてはならない。

### 2.3 デジタル化の遅れ

内航海運業界は、デジタル化が遅れていると言われている。原因は2つ、通信環境の整備の遅れとこれまでの習慣を継続する傾向が強いことであると考えられる。

内航船の場合、外航船のように何日も入港しないということは珍しく、陸地に近づけばセルラー電波を利用できることにより通信設備の導入は遅れている。また、収益率の低さが、運航船舶の設備への追加投資が難しい状況も導入の停滞を招いている。

習慣を変えるということは誰にとっても難しいことである。とりわけ、海運のように古くからある産業はビジネスモデル、商習慣が固定化されているため、日常業務もルーティン化されており、長い年月をかけて効率化されていることが多い。そこにあって新しいデジタルというツールを導入していくことは難しく、また当事者にとっても既に効率化されている業務に対してメリットを感じにくく、結果的に導入時のコストや習得にかかる時間等のデメリットがより目立ってしまう。

また、構造的に、旅客船やRORO船等のCommon Carrierを除く内航船業界（Industrial Carrier）における荷主、オペ、船主のヒエラルキー構造もデジタル化を阻害する要因になっていると考えられる。この特性（荷主、オペ、船主）に加えて、代理店、造船所、官庁等一隻の船の運航に様々な企業、組織が関わっており、その全体構造の一部をデジタル化、システム化してもその効果を得られにくいという問題もある。

一方で、コロナ禍を通してデジタル化の遅れていた内航船に新しい変化が起こっている。一例をあげれば、船と陸上との運航情報のやり取りをコロナ禍以前はFAXをメインに使い、デジタル化したくても手を付けられずにいた事業者が、在宅勤務が増えることにより、強制的に情報が電子的に送られるようになった。その結果、FAXでの情報伝達が激減している。つまりFAXでやり取りしていた情報の大部分は現状あるツールを使うことでデジタルに置き換えることが可能となった事例もある。

これによりFAXで送受信していた情報がEmailやSNSを通してコミュニケーションされるようになった。次はソフトウェア化することで、データをきれいに整理した形で保管することができるようになる。溜まったデータは解析することで、将来、安全運航や燃費節減など様々な分野で活用することが可能となる。

これらの解析により、運航管理・配乗管理といった個々の状況の把握だけではなく、基幹システムとして活用することにより経営判断にも活用できる。コロナ禍の影響により、対面での業務が制限されることによるデメリットが言われているが、これは対面のみ業務に依存してきたことの裏返しではないだろうか？むしろ、ビジネスチャットツールの導入により、今まで対面では発言しなかった、あるいは意見が言えなかった船員・社員も率直に発言・意見できるメリットがある。

従来通りの、船員・社員のスキルに頼る属人的なシステムに将来を見通すことはできない。デジタル化は、会社の将来を展望し、存続を考え直す良い機会である。

### 2.4 環境対策の遅れ（実装が進まない内航船）

2019年に政府が策定した「第6次エネルギー基本計画」では、「2050年のカーボンニュートラルを目指すとともに、2030年度の新たな温暖化ガス削減目標として2013年度から46%の削減を目指し、さらに50%の高みに向けて挑戦を続ける。」とされており、内航部門では、「LNG燃料船、水素燃料電池船、EV船を含め、革新的省エネルギー技術やデジタル技術等を活用した内航近代化・運航効率化にも資する船舶の技術開発・実証・導入促進を推進する。」とされている。

これを受けて、水素・アンモニア燃料船の技術開発や、AI・IoT等を活用したさらなる輸送効率化等に関する補助金が財政的サポートとして用意されている。しかし、水素・アンモニアといった新技術に関しては、今後の開発となるため、商業ベースの普及には長期の時間を要するものである。一方、輸送効率化等の補助金に関しては、新規性・革新性に主眼が置かれているため、Mass-produced Productsの実装は対象としていないのと、補助金一般に関して言えることだが補助申請手続きの作業自体が申請者にかかなりのロードを要求するものであるため、特に内航事業者のように小規模の事業者にとっては使い勝手の良いものではない。第6次エネルギー基本計画に定めた目標をクリアするための時間の確保は難しく、新技術の社会実装に向けての環境対策サポートが早急に必要である。

また、2.3で述べたのと同様、内航船における荷主、オペ、船主のヒエラルキー構造も環境対策を阻害する要因になってきたと考えられる。

### 2.5 企業評価低下の可能性

2022年3月1日、政府はエネルギー使用合理化改正法案を閣議決定した。改正案では、エネルギーの使用の合理化の対象に、非化石エネルギーが追加さ

れるとともに、工場等で使用するエネルギーについて、化石エネルギーから非化石エネルギーへの転換を求められている。これにより、特定事業者等に対して、非化石エネルギーへの転換に関する中長期的な計画の作成等を求めていることから、企業は、今後対策を一層加速させなければならない。

また、2022年春から東京証券取引所に上場する一部企業（プライム市場）で気候リスク情報の開示が実質義務付けられる。これは、温暖化ガスの排出等に伴う損失といった情報開示を迫るものである。これは、主要国の「気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD）」の考え方に基づくもので、「ガバナンス（社内での気候変動に関するリスクの組織的な把握等）」、「戦略（気候変動対策の需要増加等の収益拡大、例えばEV関連）」、「リスク（事業固有の定量的、定性的リスクの把握等）」、「指標と目標（サプライチェーンを含めた温暖化ガス排出量削減の指標化等）」に関し気候リスク情報の開示を求めている。TCFDは温暖化ガス排出量に関しては、企業単体のみならず取引網全体の排出量開示を推奨している。これらには上記上場企業の運輸部門も含まれることが予想されるため、この影響は当然内航業界にも波及することが予想される。したがって、温暖化ガス排出削減にどう取り組むかが今後の重要な企業評価となるため、この流れに追従できない企業は企業価値が低下するだけでなく、座礁資産の管理団体となってしまう可能性がある。

### 3. ROBOSHIPの特徴

#### 3.1 船体の特徴（2軸スケグ船型）

ROBOSHIPは、内航499GT型貨物船の標準化を狙ったものである。この船型は1軸船型が主であり、同一船型で1軸と2軸を比較した場合、一般的には効率面で2軸は1軸に劣るとされている。

しかし、内航499GT型貨物船に関しては別の側面がある。言うまでもなくプロペラに関しては大直径低回転が効率面で良いとされているが、内航船の場合は、外的要因（使用港湾等の水深）により喫水が制限されていることにより、プロペラ直径が制限される。このためプロペラ設計の最適化が制限され、プロペラ負荷が高いものとならざるを得ない。ROBOSHIPの場合は、2軸のため同一条件ではプロペラ負荷の低減が可能であり、高効率のプロペラを可能としている。

2軸船の場合、一般的にはシャフトブラケットに

よってプロペラ及び軸を支持しているが、これらが船体負荷物として抵抗の増加となるため1軸船と比較して船体効率が劣るとされている。ツインスケグ船型は、2軸船の軸の部分を船体外板によってカバーリング（スケグ）しており、通常のシャフトブラケット支持による2軸船に比べればプロペラへの水流が滑らかになり推進効率改善の利点がある。1軸船に比べると浸水表面積が増加するが、最適化を図り船体抵抗の増加を最小化した。以下、図1にGAイメージを、図2にツインスケグイメージを示す。



図1 GAイメージ



図2 ツインスケグイメージ

これら2軸スケグ船型の効果に関しては、国交省の独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構が行った調査研究「2軸型SESの船型調査」\*3において、3船型の船型開発が行われ、水槽試験の結果、軸馬力ベースで20～25%の改善が報告されている。

#### 3.2 パワープラントの特徴

ROBOSHIPのパワープラントの特徴は、発電機とバッテリーを組み合わせた最適パワーマネージメントによるエネルギー効率改善とマイクログリッド（DCグリッド+高効率水冷インバーター+PMモーター）による効率改善という2つの効率化である。

電気推進システムにおける発電機とバッテリーの組み合わせは従来からあるが、従来のシステムでは発電機、バッテリーのいずれか一方しか利用できないものであり、かつ切り替えの際にはブラックアウトを余儀なくされることから、これが運用面で乗組員の負担となっている。ROBOSHIPの場合、バッテリーと発電機の同時使用が可能であるため、

\*3 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構 共有船舶建造支援部：「2軸型SESの船型調査」報告書、2012年3月

Activeな制御を可能としている。

バッテリーと発電機のパワーマネージメントをどのように行うかによってエネルギーの変換効率が大きく変わるため、データの収集、蓄積、解析によって制御ソフトウェアを改善させ、エネルギー効率を改善可能としている。効率改善は以下の3点である。

#### 「スピニングリザーブ機能」

発電機の発停が必要となるほど大きな負荷変動がある場合、バッテリーがその負荷変動を吸収（充電、放電）し、発電機の発停を最適化することにより効率の改善を図る。

また、発電機のみで電気推進の場合、負荷変動に対応するため運転台数を変更（増加）する際、負荷変動によって投入に支障が生じる場合があるが、スピニングリザーブ機能の場合これに対応が可能である。（図3）



図3 スピニングリザーブイメージ

#### 「ピークシェイピング機能」

エネルギー（電力）需要の上下のピークをカット（上部ピークは放電，下部ピークは充電）することにより発電機の負荷を平準化させる。これによってエネルギーロスを改善する。（図4）



図4 ピークシェイピングイメージ

#### 「アクティブエンジン負荷制御機能」

発電機負荷が生じる場合、発電機用エンジンの燃費の良いレンジで運転できるようバッテリーによるパワーアシスト（放電，充電）を行い、負荷変動を緩やかなものにし、エンジン負荷を最適化することによってエネルギーロスを改善する。（図5）

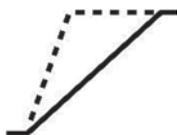


図5 アクティブエンジン負荷制御イメージ

また、マイクログリッドの採用は、パワープラントの重量、機器専有面積、容積の削減を可能としている。これに加え、可変式発電機を組み合わせることにより、さらなる効率改善が見込まれる。

### 3.3 在来船 & 従来の電気推進船と比較した優位性

在来船の推進機関は言うまでもなく、ほとんどが中・低速のディーゼル機関であり、運航モード毎に負荷変動を伴う。その操作及びメンテナンスが機関部乗組員の負担となっている。

一方、内航の電気推進船は、3タイプである。

Type1：発電機

Type2：発電機とディーゼル主機関のハイブリッド

Type3：発電機とバッテリーの選択

Type1及び2に関しては、10～30%（燃料消費量ベースまたは貨物輸送量（トンマイル）ベース）の省エネ効果を上げているとともに、在来船で負担となっている機関部乗組員の負担も軽減しているとされている。しかし、これらのタイプは負荷変動を発電機のみによって吸収しなければならないが、ROBOSHIPの場合、3.2で述べたバッテリーと組み合わせることにより負荷変動をバッテリーによって吸収させ、さらなる省エネ効果（エネルギーロスの改善）をもたらすことを可能としている。

また、Type3に関しては、3.2で述べたように発電機とバッテリーの排他的関係（発電機かバッテリーのどちらかしか使用できない）という点で、ROBOSHIPに優位性がある。

また、船内給電は全てACグリッドのため、電気変換効率の改善がポイントとなるが、ROBOSHIPの場合、DCグリッドであり（さらに推進用電動機のPMモーター及び可変式発電機を組み合わせることにより）、既存のACグリッドをベースとしたパワープラントと比較して、最大で10%の効率改善が得られている。

以下図6に既存のACグリッドの例を、図7にROBOSHIPのDCグリッドの例を示す。

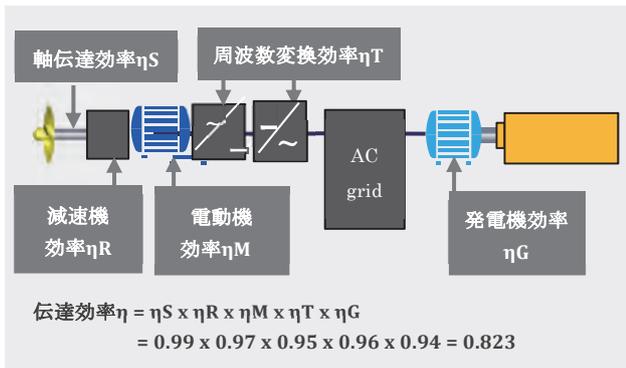


図6 既存のACグリッドの例

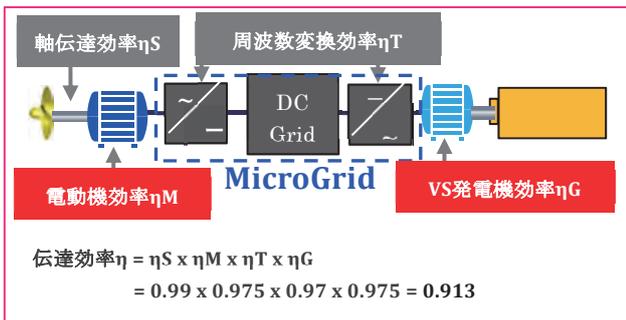


図7 ROBOSHIPのDCグリッドの例

また、徹底した標準化とモジュール化により、以下の特徴を有する。

- 最先端の技術を専門知識なしでも使用可能。
- インストレーションとメンテナンスの省力化の追求。
- 船員教育の簡素化。
- バッテリー価格の適正化。

また、バッテリーのみの運用により、例えば出入港、停船中のゼロエミッションを可能としており、これは従来の電気推進船にはない特徴となっている。航行中は、発電機からの電力供給により航行できることから、その運航条件については特に制限はなく、航続距離、航海速力も在来船と同等であることから、在来船と何ら変わることはない運航が可能である。

### 3.4 建造スキーム

ROBOSHIPの実際の建造は、内航船を建造している造船所が担うことになる。この支援のため、三菱造船株式会社が陸上給電を含めたパワープラントのトータルエンジニアリングとコンセプトデザインを担当するだけでなく、基本設計、建造、アフターサービスの各ステージで技術支援を担う。

また、パワープラントのマイクログリッド等はABB製を使用しているが、パワープラントのシステムインテグレーター及びサプライヤーとして株式会社IHI原動機が参画し、技術支援を行う。

我々、e5ラボは三菱造船株式会社、株式会社IHI原動機、内航船の建造を担う造船所と協力し、実建造の取りまとめを担うこととなる。

### 3.5 Marindows導入の目的

ROBOSHIPは、1.で述べたように人類の友である「ROBOT」と「船」を融合させるものである。そのためには、ハードウェアのみならずソフトウェアも大変重要な要素となる。Marindowsは、そのためのソフトウェアであり、業界が抱える解決困難な課題（気候変動、エネルギーの変遷、出遅れたDX、少子高齢化に伴う労働人口減少）を解決するための「海洋DX社会基盤（インフラ）」である。

ソフトウェアとは何か。それはデジタルであり、データであり、DXである。デジタルの特徴として、導入する際の条件が柔軟であること、そして導入にかかる時間の短さがある。デジタルツール、特にモバイルアプリケーション（以下、アプリという）であれば、新造船はもちろんのこと既存船に導入することにおいても技術的なハードルは低い。アプリを動かすためのデジタルデバイス（PCやスマホ、タブレット端末等）、それを充電するための電力、通信環境があれば、あとはアプリをインストールするだけで利用を開始できる。端末、アプリの設定によっては、通信が常時接続されていない状況でも使用可能である。

Marindowsは、そのデジタルの特徴を最大限に活かした船舶向けのデジタル化ツールである。これの導入により、内航船のデジタル化を促進し、より安全でより効率化された船の運航を実現し、船員の業務負荷軽減、船上生活の品質向上を目指す。

### 3.6 Marindowsの機能と優位性

今後提供を予定している初期のMarindowsの機能は、今年（2022年）の法改正に準拠したうえでデジタル化による徹底的な効率化を追求した船員の労務管理、そしてヘルスケアである。それらのアプリをMarindows専用端末にインストールした状態で提供する。船員はその端末から各自のデータを入力し、集約された情報を船長や陸上の管理者、アプリの連携先企業が受け取ることで、これまでアナログでやり取りされていたこと、管理されていなかった情報をデジタルで簡単に取り扱うことが可能になる。

そしてMarindowsの優位性は、アップデートされていくことである。機能は次々に拡張されていく。携帯電話のOSをイメージすると分かりやすいだろう。OSは日々最新のもが研究開発され、アップデートを繰り返すことで、機能が追加され、利便性が上がり、セキュリティが強化される。Marindows

も同様に進化を続ける。労務管理、ヘルスケアだけでなく、運航サポートや船員のためのエンタメコンテンツ等現場のニーズに合わせた新しいサービスを専用端末を介して簡単に導入し、利用開始できる。

また、海上での不安定な通信状況を配慮し、航海中に業務上必要であったり、利用時間が変則的になったりしているアプリについては、一部の機能をオフラインでも使用可能な仕様とする。

## 4. ROBOSHIPの拡張性

### 4.1 内航海運に占める499GT標準船の位置づけと他の船型への拡張性

ROBOSHIPの対象となる499GT型貨物船は、内航海運において20.6%（400～499GT、隻数ベース、2021.3.31現在、日本内航海運組合総連合会HPより）を占め、これらをROBOSHIPで代替することによる波及効果は大きいと言える。

また、発電機の容量、台数、バッテリーの容量を見直すことにより他の船型、船種への応用が可能であることから汎用性が高いシステムと言える。

### 4.2 現実的な解としての拡張性

2020年10月の内閣総理大臣の所信表明演説において「2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」旨が表明された。これにより、運輸部門のCO<sub>2</sub>排出削減の中期目標についても、2030年度に2013年度比で27%削減から35%削減へと加速されている。これに伴い、運輸部門における内航海運の2030年度のCO<sub>2</sub>排出削減目標も、2013年度比で157万t・CO<sub>2</sub>（約15%削減）から約181万t・CO<sub>2</sub>削減（約17%削減）となった。

また、2050年カーボンニュートラルへの対応として、燃料としての水素、アンモニアといった非石化燃料への転換が有効な手段として求められ、産官学ともにこれに関する技術開発、供給体制の整備へと舵を切っている。

しかし、中間目標となる2030年時点では、まだ石化燃料が主とならざるを得ず、これらを前提とした場合、当面は既存の技術を用いた温暖化ガス排出削減を進めなければならない。その意味では、ROBOSHIPの導入が現時点での現実的な判断と言える。

### 4.3 将来の拡張性

現在のROBOSHIPのパワープラントはリチウムイオンバッテリーとディーゼル発電機（燃料：重油）の組み合わせであり、3.3で述べたようにそのゼロ

エミッションは限定的とならざるを得ない。しかし、バッテリーの大容量化、ディーゼル発電機燃料のLNG化、水素燃料電池との併用により、ゼロエミッション範囲の拡大を図ることが可能である。さらに、全固体電池の商業ベースでの実用化、4.2で述べた非石化燃料（水素、アンモニア）導入の技術開発、供給体制整備が進めば、ディーゼル発電機燃料をこれらに置き換えることも可能であり、その場合完全なゼロエミッションが可能となる。今後の時代の流れに合わせたバージョンアップが可能な拡張性を持ったシステムと言える。

## 5. まとめ

2.1で内航海運の労働環境に関して述べたが、国内全体の労働環境は、総務省が昨年発表した2020年国勢調査によると、経済活動の担い手である生産年齢人口（15～64歳）は、ピークであった1995年から13.9%減少している。これに加えて、日本は生産性が低く、2020年時点での1時間当たりの付加価値は48.1ドルとG7の中で最も低く、各国平均（54.0ドル）をも下回っている。各企業では高齢者や女性の就労拡大に取り組んでいるものの、これだけでは限界があり生産性を向上させなければ、生産年齢人口の減少を補うことはできない。

また世界に目を転じれば、我々は現在コロナ禍と気候変動という2つの危機に直面している。しかし、この2つの違いは、気候変動は既に「今ここにある危機」であると同時に、将来に関しても科学的予測が可能ということである。

2022年2月8日にUNDP（国連開発計画）が発表した報告書では、2020年時点で約24億人が食糧難に直面し、8,240万人が強制移住を余儀なくされたとしており、2100年までに途上国を中心に累計4,000万人が死亡するとの予測を明らかにしている。

また、2022年2月28日にIPCC（国連の気候変動に関する政府間パネル）が発表した第6次評価報告書では、「約33～36億人が気候変動に対して非常に脆弱な状況下で生活している」、そして、現在の適応とその効果に関しては、「多くの取り組みでは即時、短期的な気候リスクの低減を優先しており、そのための変革的な適応の機会を減らしている。今後10年間で長期的な計画と迅速な実施が必要だ。」とされている。

これらの状況にもかかわらず対策を講じないというのは、根拠なき楽観主義であり、将来の世代への裏切りであり、怠慢に他ならない。Z世代の怒りが、我々大人に向けられていることを忘れてはならない

のである。

我々の推進するROBOSHIPが、これら諸問題解決の一助となることを願ってやまない。

ClassNK

# 船舶からのGHG排出削減に向けた本会の取り組み

企画本部 ゼロエミトランジションセンター，技術本部 GHG部

## 1. はじめに

国際海事機関（IMO）では2018年，国際海運からのGHG排出削減に関する初期戦略が採択された。このIMO戦略では，GHG排出削減の最終的な努力目標として今世紀中できる限り早期のGHG排出ゼロを掲げると共に，単位輸送当りのCO<sub>2</sub>排出を2030年までに最低40%改善，2050年までに最低70%改善（いずれも2008年比）とし，GHG総排出量についても2050年までに2008年比で最低50%削減する目標が掲げられている。

同戦略に基づき，IMOでは，2021年6月に開催された第76回海洋環境保護委員会（MEPC 76）において，2030年までに2008年比で単位輸送当りのCO<sub>2</sub>排出を最低40%改善するという目標（2030年目標）を国際海運全体として達成するため，就航船のCO<sub>2</sub>排出削減のための「EEXI規制」及び「CII燃費実績格付け制度」を導入するためのMARPOL条約附属書VIの改正が採択された<sup>1)</sup>。これらの規制は，2023年から導入される。

一方，国際海運から世界全体に目を向けると，現在，日本も含めた120以上の国，地域が「2050年のカーボンニュートラル」を表明するに至っており，各国のGHG削減への取り組みの強化が見込まれている。海上輸送ビジネスにおいても，民間主導の動きもあり，規制と共にゼロエミッションに向けた動きが加速していくこととなる。

本稿では，2023年から導入される「EEXI規制」及び「CII燃費実績格付け制度」の概要及び本会の対応，ならびに本会が展開している「ClassNKゼロエミッション・サポート・サービス」の概要について紹介する。

## 2. EEXI規制の概要及び本会の対応

### 2.1 EEXI規制の概要

EEXI規制は，就航船の燃費性能に一定の基準を設けることで，就航船から排出されるCO<sub>2</sub>排出量を削減する枠組みである。この燃費性能は，Energy Efficiency Design Index（EEDI）と同様の指標であるEnergy Efficiency Existing Ship Index（EEXI）で評価され，個船のEEXI値（Attained EEXI）が，

EEXI規制値（Required EEXI）を満足することを要求するものである（図1）。個船のEEXI値がEEXI規制値を満足できない場合，本船のエンジン出力の制限や省エネ装置の追設といった対策が必要となる。

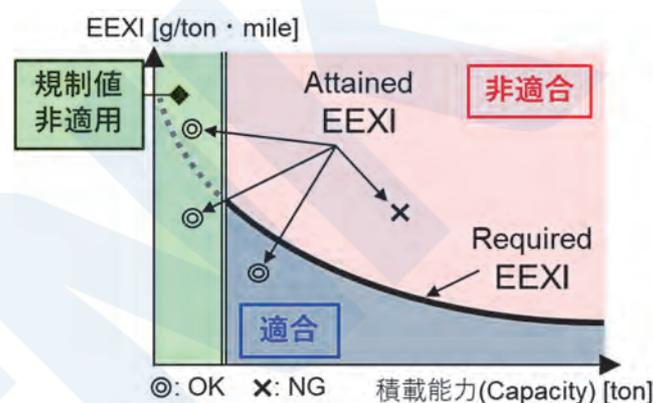


図1 EEXI値とEEXI規制値の関係

#### 2.1.1 EEXI規制の適用船舶

EEXI規制は船舶の完工日を問わず400 GT以上の国際航海に従事する全ての船舶に適用される。ただし，EEDI規制と同様，推進機関を持たない船舶等には適用されない。

#### 2.1.2 EEXI値及びEEXI規制値

EEXIは，EEDIと同様の算式により計算される<sup>2)</sup>。基本概念として，「機関出力」に「燃料消費率」及び「CO<sub>2</sub>換算係数」を乗じたものを「積載能力」及び「船速」で除することにより計算され，1トンの貨物を1マイル輸送した際に見込まれるCO<sub>2</sub>の排出量を表している。

EEDI適用船のEEXI計算においては，EEDI認証時に使用したパワーカーブから船速を求めて同船舶のEEXI値を計算する。一方，EEDI非適用船のEEXI計算においては，水槽試験，CFD等の数値計算，満載状態における海上速力試験のいずれかを実施している場合は，これらの結果より船速を決定し，これらを実施していない場合は簡易算式により船速を算出する。

EEXI規制は400 GT以上の国際航海に従事する船舶に適用されるが，EEXI規制値を満足することが要求される船舶は，船種とサイズに応じて異なる。例えば，バルクキャリアについては，400 GT以上の

場合はEEXIの計算が要求され、10,000 DWT以上の場合にEEXI規制値への適合が要求される。また、タンカーについては、400 GT以上の場合はEEXIの計算が要求され、4,000 DWT以上の場合にEEXI規制値への適合が要求される。なお、EEXI規制値はEEDIの基準線である「EEDIリファレンスライン」と「削減率 (X)」により決定される (図2)。

$$\text{Required EEXI} = \left(1 - \frac{X}{100}\right) \times \text{EEDI Reference Line}$$

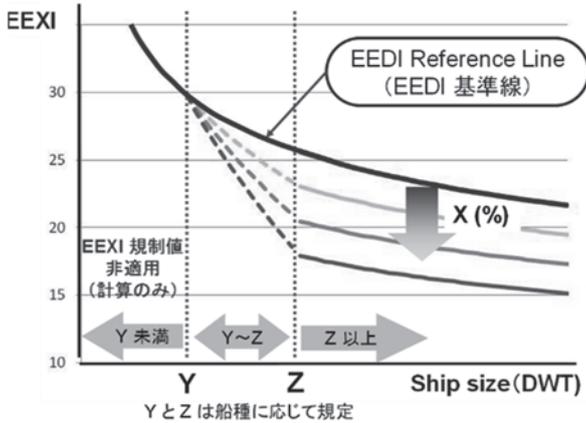


図2 EEXI規制値、EEDIリファレンスライン及び削減率の関係

EEDI規制の場合、規制値は、本船の「建造契約日」と「完工日」に応じて、Phase 0から開始され、Phase 1, Phase 2, Phase 3と段階的に厳しくなるよう設定されている。一方、EEXI規制については、規制値の段階的な強化はなく一定の値となる。この規制値は、基本的には、2023年時点（規制開始時点）でのEEDI規制値と同レベルとして設定されている。バルクキャリアやタンカー、自動車運搬船などでは、EEDIのPhase 2相当の規制値が要求される一方、コンテナ船、一般貨物船、LNG運搬船、ガス運搬船などでは、EEDIのPhase 3相当の規制値が要求される (図3)。ただし、20万DWT以上のバルクキャリア、20万DWT以上のタンカー、12万DWT未満のコンテナ船、Ro-ro貨物船、Ro-ro旅客船については、就航船の大幅な燃費性能の改善が技術的に困難であるとして、規制値が若干緩和されている。

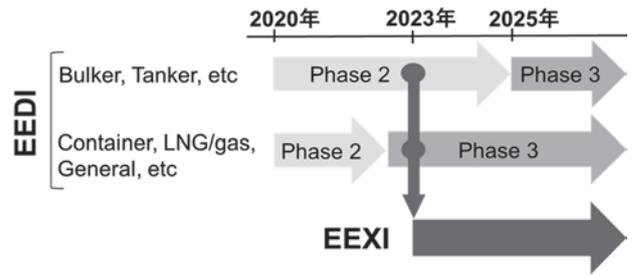


図3 EEDI規制値とEEXI規制値の関係

### 2.1.3 EEXI規制の適用時期

EEXI規制は2023年1月1日より適用が開始される。2023年1月1日より前に完工する船舶については、2023年1月1日以降の最初のIAPP証書に関する年次、中間又は更新検査までにEEXI規制に適合する必要がある。また、2023年1月1日以降に完工する船舶については、IEE証書に関する初回検査、つまり完工時までEEXI規制への適合が要求される。

## 2.2 EEXI規制への適合状況と対応

### 2.2.1 EEXI規制への適合状況

本会登録船でEEXI規制の対象となる船舶は約7,200隻あり、そのうちEEDI非適用船が約5,300隻、EEDI適用船でEEXI規制値に適合していない船舶が約750隻、既にEEXI規制値に適合している船舶が約1,150隻ある。EEXI規制への対応が必要となる船舶は約6,050隻あり、これはEEXI規制の対象となる船舶の約84%に相当する (表1)。また、EEXI規制への対応が必要となる船舶は、バルクキャリアで約86%、タンカーで約73%、コンテナ船で約80%、ガス運搬船で約90%となっており、非常に多くの船舶がEEXI規制への対応が必要な状況となっている (図4)。

表1 本会登録船のEEXI規制適合状況

EEXI規制対象船	約7,200隻	
EEDI非適用船	約5,300隻	対応要 約6,050隻 (約84%)
EEDI適用船 (EEXI規制非適合)	約750隻	
EEDI適用船 (EEXI規制適合)	約1,150隻	対応不要 約1,150隻 (約16%)

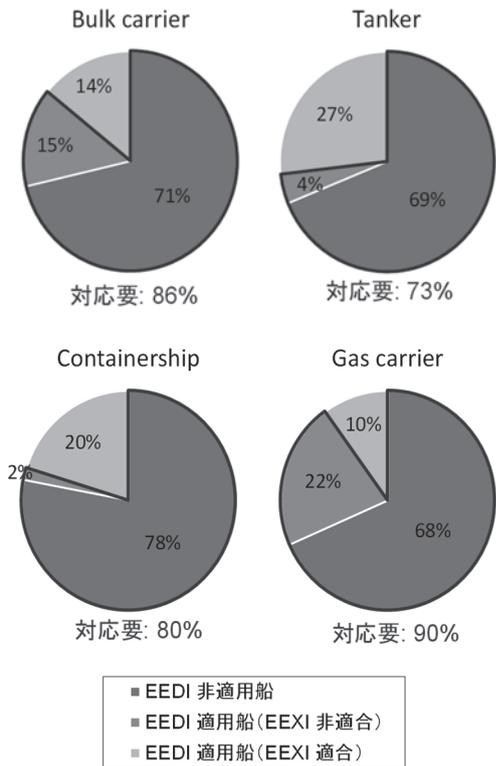


図4 本会登録船の船種別EEDI規制適合状況

### 2.2.2 EEDI規制への対応

船社が所有／管理している船舶について、EEXI規制への対応が必要かどうかを判断するための流れを図5に示す。

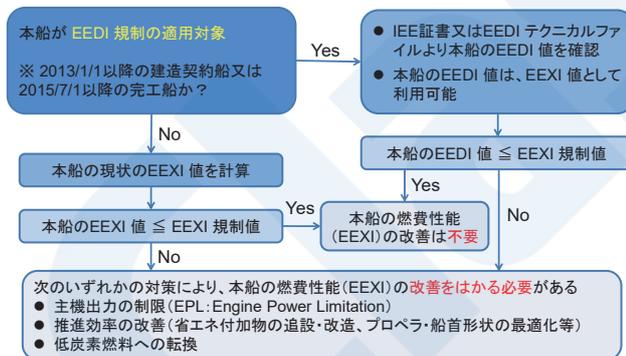


図5 EEDI規制対応フローチャート

本船がEEDI規制の適用対象船の場合は、本船のIEE証書又はEEDIテクニカルファイルに記載されているEEDI値 (Attained EEDI) の値を確認し、その値がEEXI規制値 (Required EEXI) を満足しているかどうかを確認する。規制値を満足している場合は、Attained EEDIの値をAttained EEXIの値として使用できる。

本船のEEDI値がEEXI規制値以下である場合は、本船はEEXI規制を既に満足していると判断でき、燃費性能の改善に関する特段の措置は不要となる。

一方、EEDI値がEEXI規制値より大きい場合は、主機出力の制限<sup>3)</sup>、省エネ装置の追設・改造、プロペラ・船首形状の最適化等の推進効率の改善、低炭素燃料への転換等で本船の燃費性能の改善を図る必要がある。

また、EEDI規制が適用となっていない船舶の場合は、まず本船の現時点のEEXI値を計算し、EEXI規制値を満足しているかどうか確認する。規制値を満足している場合は燃費性能の改善に関する特段の措置は不要だが、満足していない場合は燃費性能の改善に資する何らかの措置が必要となる。

### 2.3 EEXI規制に関連する本会の対応

本会は、船社自身の保有船がEEXI規制に適合しているかどうかを簡易的に判定できるよう、EEXI簡易評価ツール「EEXI Simplified Planner」を作成し、本会ホームページで公開している (図6)。

この評価ツールでは、EEXIに適合するための主機出力の制限値の推定や、主機出力を制限した場合の船速の低下量の推定を行うことが可能となっている。なお、この評価ツールは、あくまでも簡易的な計算を行うものであり、実際の認証とは異なるものである。

Bulk carrier		V <sub>ref</sub>		MCR <sub>ref</sub>		LWT		Cargo capacity (m <sup>3</sup> )	
	Before EPL	After EPL	Iteration 1	Iteration 2	Iteration 3	Iteration 4	Iteration 5	Iteration 6	Iteration 7
Dwt	185,000	185,000	185,000	185,000	185,000	185,000	185,000	185,000	185,000
MCR <sub>ref</sub>	18,500	18,500	18,500	18,500	18,500	18,500	18,500	18,500	18,500
SW	15,472	9,978	9,978	9,978	9,978	9,978	9,978	9,978	9,978
EEDI	14.79	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26
Iteration 1	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26
Iteration 2	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26
Iteration 3	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26
Iteration 4	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26
Iteration 5	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26
Iteration 6	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26
Iteration 7	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26
Reference line	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26
Attained EEDI	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26
Required EEXI	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26	13.26
Compliance	Comply	Comply	Comply	Comply	Comply	Comply	Comply	Comply	Comply
Improvement	Not Comply	Not Comply	Comply	Comply	Comply	Comply	Comply	Comply	Comply
Improvement (%)	-	-31.1	-31.1	-31.1	-31.1	-31.1	-31.1	-31.1	-31.1

図6 EEXI簡易評価ツール「EEXI Simplified Planner」

## 3. CII燃費実績格付け制度の概要及び本会の対応

### 3.1 CII燃費実績格付け制度の概要

CII燃費実績格付け制度は、年間の燃費実績を確認し、その結果に応じて格付けすることで、国際海運全体の燃費改善を促進する枠組みである。具体的には、2019年から実施されているIMOの燃料消費量報告制度 (IMO-DCS: Data Collection System) のデータを基に、個船の燃費実績 (CII: Carbon Intensity Indicator) を毎年計算し、船種毎に設定

される基準値からの乖離量を基に、A/B/C/D/Eの5段階格付けを行う(図7)。この格付け結果が、E又は3年連続でDとなった低評価船は、減速運航、最適ルート選定、適切なメンテナンス等を含む燃費改善計画を策定し、船舶エネルギー効率管理計画(SEEMP)への記入を行った上で、船籍国主管庁や船級協会から承認を得る必要がある。なお、A又はBの高評価を受けた船舶については、船籍国主管庁や港湾当局がインセンティブを与えることが推奨されている。

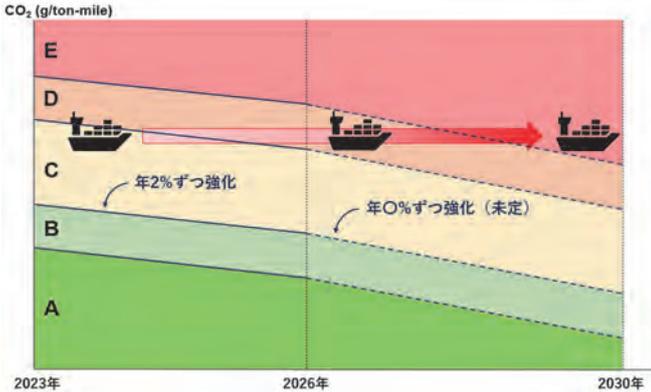


図7 CII燃費実績格付け制度

### 3.1.1 CII燃費実績格付け制度の適用船舶

CII燃費実績格付け制度は、IMO-DCSと同様に5,000 GT以上の国際航海に従事する全ての船舶(バルクキャリア、ガス運搬船、タンカー、コンテナ船、一般貨物船、冷凍運搬船、兼用船、自動車運搬船、Ro-ro貨物船、Ro-ro旅客船、LNG運搬船、クルーズ客船)に適用される。

### 3.1.2 CII計算値及びCII基準値

各船のCII計算値は、過去1年間の燃費実績から、載貨重量トン数・マイル当たり(ただし、自動車運搬船、Ro-ro旅客船及びクルーズ客船にあっては、総トン数・マイル当たり)のCO<sub>2</sub>排出量を算出する<sup>4)</sup>。計算式は次の通りで、CO<sub>2</sub>排出量は燃料消費量にCO<sub>2</sub>換算係数を乗じて算出する。なお、IMO-DCS制度の下で収集されたデータのみで計算可能なため、追加のデータ収集は不要である。

$$CII \text{ 計算値} = \frac{CO_2 \text{ 排出量}}{(DWT \text{ 又は } GT) \times \text{航行距離}}$$

また、CII基準値は2019年における船種毎に算出されたCII平均値(CIIリファレンスライン)<sup>5)</sup>を基に、毎年強化されていく。制度の始まる2023年のCII基準値は2019年比で5%の削減値となり、その

後2026年まで毎年2%ずつ削減率が強化される<sup>6)</sup>。なお、2027年から2030年の毎年の削減率は、今後のGHG削減状況を踏まえて2025年までに決定される予定である(表2)。

$$CII \text{ 基準値} = \frac{100 - Z}{100} \times CII \text{ 平均値}$$

表2 毎年のCII基準値削減値(Z)(2019年比)

年	削減値(Z)
2023	5%
2024	7%
2025	9%
2026	11%
2027	(未定)
2028	(未定)
2029	(未定)
2030	(未定)

なお、CII計算時における船種等に対する修正係数や航海の除外要件に関しては、IMOにおいて継続審議されている。

### 3.1.3 CII燃費実績格付け制度の適用時期

CII燃費実績格付け制度は2023年1月1日から開始され、2023年の燃料消費量等のデータから格付けの対象となる。なお、2023年分の格付け自体は2024年に実施される。

また、本格付け制度の対象となる船舶は2023年1月1日までに本船のSEEMPに「CIIの計算方法」、「今後3年間のCII基準値」、「CII基準値を達成するための実施計画」及び「自己評価及び改善に関する手順」を記載し、船籍国主管庁や船級協会の承認を受ける必要がある。

### 3.1.4 CII燃費実績格付けの評価方法

CIIの格付けは、各船のCII計算値を算出しその年のCII基準値との乖離度合いによってA/B/C/D/Eの5段階で評価される<sup>7)</sup>。なお、この格付けは相対評価ではなく、毎年強化されるCII基準値に対する絶対評価となる(図8)。そのため、毎年の燃費実績が同様の場合には、格付け結果はいずれかの時点で悪化していくこととなる。

このCII格付け制度は、本船の格付け結果が低評価となった場合であっても、運航停止等の罰則が科せられるものではない。ただし、格付け結果がE、又は3年連続Dとなった場合は、次年度以降の燃費改善計画を作成し、SEEMPに記載した上で船籍国主管庁や船級協会から承認を受ける必要がある。なお、この改善計画をSEEMPに記載する具体的な方法等については、2022年6月に開催されるMEPC

78においてIMOガイドラインが最終化される予定である。

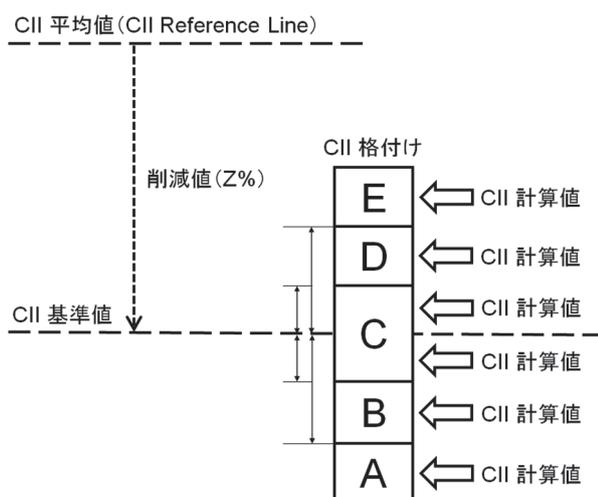


図8 CII基準値とCII格付け

### 3.2 CII燃費実績格付け制度に関連する本会の対応

CII燃費実績格付け制度に関連する本会の対応として、ClassNK MRV Portalの改修及びCII簡易評価ツールについて紹介する。

#### 3.2.1 ClassNK MRV Portal

本会は、船社がIMO-DCS及びEU-MRV規則に効率的に対応できるよう、2017年からClassNK MRV Portalを提供している。このデータ収集管理システムは、本船や第三者ソフトから燃料使用量等のデータを受信し、Web上で管理した上で年間レポート（EU MRV Emission report及びIMO DCS Annual report）の作成提出、及び本会による認証取得が可能なものである。

本会は、CII燃費実績格付け制度の開始に向けて、次に示す機能を追加するClassNK MRV Portalの改修作業を実施している。

##### 3.2.1.1 年間報告書作成及び改善計画の作成

CII燃費実績格付けに伴うデータ報告や認証に関する船社の追加作業を軽減するため、ClassNK MRV Portalで自動作成されるIMO DCSの年間報告書にCIIの関連情報を追加する。また、E評価又は3年連続D評価の場合、次年度以降の燃費改善計画を作成する必要があることから、同Portal上で最適航路、Just in time、プロペラクリーニングなどの一覧から次年度以降に実施予定の改善措置を選択することで、改善計画の書類の作成を支援する機能を追加する。

##### 3.2.2 CII簡易評価ツール

本会は、CII簡易評価ツールを作成し、本会ホー

ムページで公開している（図9）。この評価ツールは、船舶の種類、DWT、燃料消費量及び航海距離の年間値を入力することで、本船のCII格付け結果を自動で計算することが可能である。なお、この評価ツールは、あくまでも船社が自主的に計算を行うためのものであり、実際の認証とは異なるものである。

CII Calculation		ClassNK
Please input blue cells		Version 0.2 June 2021
IMO Number	1111111	
Ship Name	NK bulker	
Ship Particular:	Ship Type	Bulk carrier
	Deadweight	61338
	Gross Tonnage	
	Diesel/Gas Oil	563
	LFO	
	HFO	3580
Fuel Consumption (ton)	LPG(Propane)	
	LPG(Butane)	
	LNG	
	Methanol	
	Ethanol	
Distance Travelled (nm)	54269	
CO2 Emission	12953	
Attained CII	3.89	
CII ref	4.99	
Rating Year	2023	
Required CII	4.74	
Attained CII / Required CII	0.820	
CII Rating	A	

図9 CII簡易評価ツール

## 4. ClassNKゼロエミッション・サポート・サービス

本会は、海上輸送ビジネスに関わる関係者が、日々の事業運営においてGHG排出量の計画・管理を行いながらゼロエミッションを追求していけるよう、「ClassNKゼロエミッション・サポート・サービス」を展開している。

具体的なサービスメニューとして、GHG排出マネジメントシステムの構築・認証、GHG排出マネジメントツールの提供、GHG排出量の検証・評価、GHG排出量削減対策へのサポート、といったサービスメニューを総合的に揃え、提供している（図10）。

本章では、本サポートサービスの概要について紹介する。



図10 ClassNKゼロエミッション・サポート・サービス

#### 4.1 GHG排出マネジメントシステムの構築・認証

本会は、船舶からのGHG排出量削減に関する明確な目標を設定し、その目標達成に向けて適切なマネジメントシステムを構築し、運用を行う関係者の積極的な取り組みの認証を行っていく。

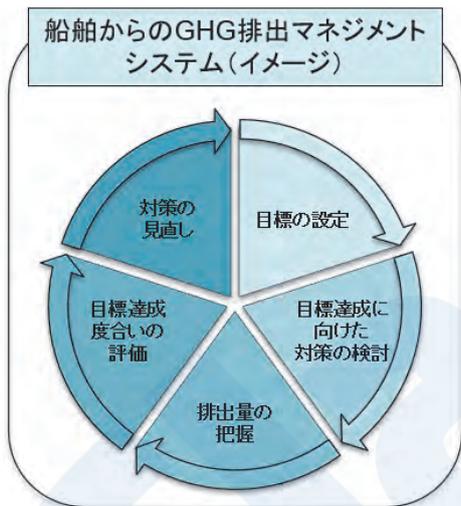


図11 船舶からのGHG排出マネジメントシステム(イメージ)

船舶からのGHG排出を計画的にマネジメントしていくためには、船舶からのGHG排出削減に関する明確な目標を設定し、その目標の達成に向けた対策の検討を行い、実際のGHG排出量を把握した上で、目標の達成度合いを評価し、対策を見直していくサイクルを継続していくことが必要になると考えられる(図11)。

本認証の取得により、関係者の今後の海上輸送ビジネスに、さらなる価値が付加されることを期待している。

なお、この認証は、本会が関係者の革新的な取り組みをサポートする認証サービスとして2020年か

ら運用しているイノベーションエンドースメントの枠組みにおいて実施していく。

#### 4.2 GHG排出マネジメントツールの提供

前述の通り、本会は、船社がIMO-DCS及びEU-MRV規則に効率的に対応できるよう、ClassNK MRV Portalを提供している。このClassNK MRV Portalと連動したGHG排出マネジメントツールとして、2022年4月にClassNK ZETA (Zero Emission Transition Accelerator)をリリースした(図12)。このツールは、個船やフリート全体のCO<sub>2</sub>排出量、及び2023年から導入されるCII燃費実績格付けのモニタリング機能を搭載した、総合的なデータ管理プラットフォームである。また、IoS-OPの仕組みを活用し、データ所有者、即ち、CO<sub>2</sub>排出量データを提出している船舶管理会社の利用許諾の下、船主及び備船者も安全にデータを利用できる枠組みを構築している。

ClassNK ZETAは、まずは船舶管理会社、船主、備船者向けとして、以下に示す4つの機能を搭載している。

- 個船のCO<sub>2</sub>排出量や、CII燃費実績格付け結果等をリアルタイムで表示する、Vessel monitoring機能
- フリート全体のCO<sub>2</sub>排出量や、CII燃費実績格付け結果等をリアルタイムで表示する、Fleet monitoring機能
- 減速運航などを実施した場合に、CO<sub>2</sub>排出量やCII燃費実績格付けがどのように変化するかシミュレーションできる、Simulation機能
- CO<sub>2</sub>排出量を、航海毎、船舶毎、フリート毎等で出力できる、Periodical Report機能

また、ポセイデン原則や海上貨物憲章等の枠組みへの対応のために、船社と金融機関や荷主の間でのCO<sub>2</sub>排出量の報告等にも対応するよう開発を進めており、各ステークホルダーが必要な船舶のCO<sub>2</sub>排出量を、ステークホルダー間の適切な合意の下、必要なタイミングで確認・把握できるようなプラットフォームとなることを目指している。



図12 ClassNK ZETAのイメージ図

### 4.3 GHG排出量の検証・評価

#### 4.3.1 IMO及びEU規制への対応

本会は、船級協会として、2011年から開始されたEEDI及びSEEMP等のIMOによる規制への適合確認を実施している。また、第2章及び第3章で述べた通り、EEXI規制への適合及びCII燃費実績格付け制度に関する検証を実施すると共に、それらに関連するサポートも強化していく。

また、EUにおいては、EU管轄内の港湾を発着する航海について、燃料消費量等のデータを収集し報告するEU-MRV規制が2018年から開始されており、本会はその認証機関として、これまで約3,500件の認証を実施している。

なお、EU-MRV規制に関連し、英国がEUから離脱したことから、2022年1月以降、英国発着の航海について、EU-MRVと同様の規制がUK-MRVとして別途導入されている。本会は現在、UK-MRVの認証機関としての認定取得の作業中である。また、UK-MRVとして収集が必要となるデータは、現在EU-MRVとして収集しているデータから抽出できるため、それに対応するClassNK MRV Portalの改修作業を実施中である。

#### 4.3.2 民間主導の枠組みへの対応

IMOや欧州による規制に加え、民間レベルでも船舶からのGHG排出削減を加速させていく動きが広がっている。

2019年6月には、金融機関の立場から国際海運のCO<sub>2</sub>排出削減を促進する枠組みとして、金融機関版ポセイドン原則（Poseidon Principles）が発足した。ポセイドン原則に署名した金融機関は、自社の船舶融資ポートフォリオのCO<sub>2</sub>排出量がどの程度IMO目標（2050年までに国際海運からのGHG総排出量を2008年比で最低50%削減）に整合しているかを定量的に評価し、その結果を毎年公表することが要求されている。

また、2020年10月には、荷主の立場から国際海運のCO<sub>2</sub>排出削減を促進する枠組みとして、海上貨物憲章（Sea Cargo Charter）が発足した。海上貨物憲章に署名した荷主や海運会社は、自身の海上貨物輸送に起因した船舶からのCO<sub>2</sub>排出量がどの程度IMO目標（2050年までに国際海運からのGHG総排出量を2008年比で最低50%削減）に整合しているかを定量的に評価し、その結果を毎年公表することが要求されている。

2021年12月には、船舶保険の立場から国際海運のCO<sub>2</sub>排出削減を促進する枠組みとして、船舶保険版ポセイドン原則（Poseidon Principles for Marine Insurance）が発足した。同原則に署名し

た保険会社は、保険を引き受けている船舶からのCO<sub>2</sub>排出量がどの程度IMO目標（2050年までに国際海運からのGHG総排出量を2008年比で最低50%削減）及び2050年排出量ゼロ目標に整合しているかを定量的に評価し、その結果を毎年公表することが要求されている。前述の金融機関版ポセイドン原則及び海上貨物憲章では、現在のIMO目標との整合性のみを評価するものだが、船舶保険版ポセイドン原則では、2050年排出量ゼロ目標との整合性も評価する点が特徴である。

本会は、これらの枠組みに基づいた評価サービスを提供している。

#### 4.3.3 カーボンニュートラル達成度の評価

気候変動対策への世界的な関心の高まりにより、2050年のカーボンニュートラルを目標とする企業が増加している。

本会は、船舶からのCO<sub>2</sub>排出量削減に関する目標、例えば2050年のカーボンニュートラル等を目標に設定している船社に対し、そのフリートからのCO<sub>2</sub>排出量が設定した目標に対してどの程度整合しているか、評価を実施していく。

なおこの評価は、目標とするCO<sub>2</sub>排出量やその達成する年を船社の要望によってオーダーメイドすることが可能であり、燃料のライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量やカーボンオフセットの利用にも対応する予定である。

### 4.4 GHG排出量削減対策へのサポート

船舶からのGHG排出量削減対策に関する本会のサポートについては第2章及び第3章でも述べたが、この他にも、代替燃料の導入に関するサポートも積極的に実施している。

船舶の脱炭素化に向けては、現在トランジションの段階にあり、今後ゼロエミッション燃料の採用が増加していくものと考えている。本会は、代替燃料の導入が円滑に進むよう、2021年9月、「代替燃料船ガイドライン（第1.1版）」を発行した。同ガイドラインは、LPG、メタノール、エタノール燃料船に関する従来の「低引火点燃料船ガイドライン」に、アンモニア燃料船についての規定を新たに加え、これらの安全要件などを網羅した内容となっている。さらに、従来の「LNG Ready」のノーテーションを改定し、これらの代替燃料の将来的な使用に備えた設計、及び部分的な設備の搭載を行う船舶へのノーテーションとして「Alternative Fuel Ready」についての規定も追加している。

また、バイオ燃料の使用に関するサポートも実施している。バイオ燃料は、植物油を主とするバイオマス原料として製造される再生可能な燃料であり、

燃料の燃焼時に排出されるCO<sub>2</sub>については、原料となる植物が成長過程で大気中のCO<sub>2</sub>を吸収することから、「カーボンニュートラル」な燃料とされている。バイオ燃料の種類によっては、既存のディーゼルエンジンの仕様を変更せずに船舶用燃料としての使用が可能である「ドロップイン燃料」となるメリットがあり、トライアルとして船舶で使用されるケースも増加している。本会は、バイオ燃料の使用に関する理解の一助となるべく、様々な問い合わせに対応すると共に、船舶におけるバイオ燃料についての説明資料などを本会ホームページで提供している。

## 5. まとめ

2015年12月のパリ協定採択後、IMOでは2018年4月にGHG排出削減に関する初期戦略が採択され、2050年における国際海運からのGHG総排出量を2008年比で最低50%削減することが目標として掲げられた。同戦略は5年毎に見直しが行われることとなっており、次の改定は2023年とされているが、IMOにおいては、この改定に向けた検討が2021年秋から開始されている。世界全体のGHG排出削減については、現在、120以上の国、地域が、2050年のカーボンニュートラル実現を表明していることに鑑みると、国際海運からのGHG排出削減についてもその目標を「2050年カーボンニュートラル」に引き上げるべきである、という意見を軸に検討が進められる可能性もある。

本稿では、2023年から導入される「EEXI規制」及び「CII燃費実績格付け制度」の概要及び本会の対応、ならびに本会が展開している「ClassNKゼロエミッション・サポート・サービス」の概要について紹介した。

本稿が、海運業界におけるGHG排出削減へ向けた更なる取り組みを考える上での一助となれば幸いである。

## 参考文献

- 1) Resolution MEPC.328(76), 2021 Revised MARPOL Annex VI
- 2) Resolution MEPC.333(76), 2021 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI)
- 3) Resolution MEPC.335(76), 2021 Guidelines on the shaft / engine power limitation system to comply with the EEXI requirements and

use of a power reserve

- 4) Resolution MEPC.336(76), 2021 Guidelines on operational carbon intensity indicator and the calculation methods (CII Guidelines, G1)
- 5) Resolution MEPC.337(76), 2021 Guidelines on the reference lines for use with operational carbon intensity indicators (CII reference line guidelines, G2)
- 6) Resolution MEPC.338(76), 2021 Guidelines on the operational carbon intensity reduction factors relative to reference lines (CII reduction factors guidelines, G3)
- 7) Resolution MEPC.339(76), 2021 Guidelines on the operational carbon intensity rating of ships (CII rating guidelines, G4)

# ものづくりをめぐる今後の流体工学解析とAIサロゲートモデル

— スーパーシミュレーションは風力連成構造解析をリアルタイム化できるか? —

松岡 浩\*

## 1. はじめに

日本も含め世界120か国以上の国々が「2050年までのカーボンニュートラル実現」を宣言している。こうした中、風力エネルギーの利用拡大にも大きな期待が寄せられ、大規模な風力発電ファームの設置などが進められている。しかし、施設の規模と投資額が巨大になるほど、事故停止の防止と運転性能の向上が厳しく求められる。このため、設計段階では、構造的な安全設計や性能推定をより高精度に行う“マルチスケールでかつマルチフィジクスな数値解析”，すなわち“スーパーシミュレーション”が必要になる。また、運転段階では、より長期間にわたり安定した操作を行うため、疲労損傷の蓄積を少なくするシステム制御を時々刻々行う必要がある。従って、理想的には、スーパーシミュレーションのリアルタイム化の考慮も必要になり、流体工学解析における数値計算の速度向上への要求は極めて強い。

流体工学解析では、従来から、ナビエ・ストークス方程式等の微分方程式を数値的に解く方法が王道である。しかし、計算速度を飛躍的に向上させるには、何か基本的に別の発想が必要だと思われる。

本稿では、そのひとつの可能性として“格子ガス法AIサロゲートモデル”を紹介する。これは、流体挙動を導く「微分方程式」の代わりに、その代替（サロゲートモデル：Surrogate Model）として「格子ガス法」と呼ばれる流体解析法の仮想粒子モデル<sup>1)</sup>を用いる。このモデルの粒子イメージを介して、物理挙動のファジィ推論が可能になる。また、ニューラルネットの計算構造に対応させることで実測データの学習アルゴリズムを得る。

なお、本モデルは、開発途上であり、現時点で有効性を検証するシミュレーションや実験等との比較を完了していない。このため、本稿では、散文的になるが、この概念に至る考え方を中心に整理した。

## 2. 今後の風力エネルギー利用拡大と流体解析

### 2.1 風力等の流体工学で高解像予測が必要

カーボンニュートラルの実現を目指して、再生可

能エネルギーの利用をめぐる大型プロジェクトが多数進行している。特に、風力エネルギーについては、巨大なウインドファームの設置が次々と進められつつある。また、次世代に向けて、風力支援運航船（例：ウインドチャレンジャー<sup>1)</sup>）や帆走型洋上風力発電船（例：ウインドハンター<sup>1)</sup>）の開発なども始まっている。

このようなプロジェクトでは、規模が大型になり投資額が巨大になるほど、設計段階では、システムが安全にかつ高い性能を発揮するのに適した設置場所や運航場所の選定が重要である。このため、できるだけ高精度な数値シミュレーションによる事前評価が要求される。しかし、一般論としては、構造物周辺を通過する流体の挙動を精度よく予測するには、構造物周辺で生じる様々な大きさの流体渦をすべて解像する必要がある。ある時刻において実際に存在する渦を解像できなければ、次の時刻のその周辺における流体挙動の予測は誤ったものになる。このため、流速を計算する位置である“格子点”は、最小渦の直径と同程度の細かい間隔で配置することが望まれる。最小渦の大きさが、構造物の大きさに対して非常に小さい場合には、構造物周辺に配置すべき格子点の数が膨大になる。3.1に後述するが、ウインドファームの場合、「解像すべき最小渦の大きさ」から「構造物全体の大きさ」までの長さスケールの幅が数桁以上に及ぶので、非常に高解像度の“マルチスケール流体解析”が必要になる。

### 2.2 マルチスケール流体解析の困難性

「一般に、“構造物の大きさ（代表長さ）”と“最小渦の直径”の比の値は、レイノルズ数の $3/4$ 乗に比例すること<sup>2)</sup>（ただし、レイノルズ数 $\equiv$ 代表流速 $\times$ 代表長さ $/$ 動粘性係数）」が流体力学の次元解析によって知られている。また、この比の値は、「最小渦まで解像する場合に、1次元方向に配置すべき格子点の個数の目安」になる。従って、流体挙動を正確に予測しようとする場合、レイノルズ数がある大きさを超えると、配置すべき格子点の個数が3次元方向の積に比例して急増するので、実用的に許容できる時間では数値計算を完了できなくなる。すなわち、マルチスケール流体解析は、レイノルズ

\* 事業開発本部 環境・再生可能エネルギー部

数が大きいほど計算時間の点で実現が困難になる。

## 2.3 現在の数値流体力学による高解像予測

ここで、ものづくりのための流体工学解析において、高解像度なシミュレーションを実現するための一般論を筆者なりに整理しておく。

スーパーコンピュータの著しい性能向上の結果、かなり高解像度な格子点配置であっても、実用的な時間で必要な時間発展計算を完了できるようになってきた。とは言え、許容できる時間で計算を完了できる最高の格子点個数というものがある。従って、高解像度なシミュレーションを実現するには、まずは、そのぎりぎりの格子点の個数を配置してみる。実験・試作規模の流体解析の場合は、レイノルズ数がそれほど過大にならないため、その格子点配置の細かさで最小渦まで解像できているかもしれない。この場合、「格子点間のさらなる細部の流体状態を考慮する」という余計な手間は必要ない。すなわち、この手間が不要な“直接流体シミュレーション (DNS)” が可能であり、正確なシミュレーション結果を得ることができる。他方、実機規模の流体解析の場合、レイノルズ数が過大になる。このため、最小渦まで解像できるシミュレーション計算をDNSだけで実行することは、現在のスーパーコンピュータでもまだ困難である。そこで、各格子点における流速等の物理量を求めた後、格子点間隔よりも細かい部分については、「ある仮定 (モデル) を設定して内挿補間的な推測を行う」という“乱流モデル”の方法が採用されている。シミュレーションの目的によるが、この方法で十分な精度を確保できる場合もある。しかし、このモデルの仮定は、物理的に一般性をもたない場合が多いので、このことに起因する不正確性が、シミュレーション結果に許容できない影響を及ぼす場合もある。

## 3. 夢の目標設定とバックキャスト思考の試み

### 3.1 1次元あたり5～6桁幅が理想の解像度

昨年末であるが、電気新聞に「2021年11月24日、スペインのシーメンス・ガメサ・リニューアブル・エナジーが、フィンランド最大の陸上風力発電所向けに、風車69基を受注した。」との記事があった。これは、ローターの直径が約170m、タワーの高さはおよそ150mということである。風車のブレード各部における空力計算に必要な解像度について、ここでは、実際の最小渦 (コルモゴロフ・スケール) よりも大きめに見積もって、仮に約5mmであると仮定してみる。これは、実質的な乱れの最小スケールは、コルモゴロフ・スケールの約5倍程度で担わ

れていること<sup>3)</sup>などを考慮した結果であるが、目標解像度の達成を容易にする方向の仮定になっている。この場合でも、ブレード長さとの比較において、“長さスケール”の違いは4桁もある。

また、ウインドファームにおいては、ある風車の後流は、下流側の風車の存在やその風車の後流との重なりの影響を受けて、さらに下流の風車に対して複雑な後流となって到達する。精度の高い発電量の予測には、地形を考慮した風況予測に加えて、このような後流の状況をウインドファーム全体について解析する必要がある。このため、水平方向には数km～10km、鉛直方向には500m以上の広大な空間領域について、各部における流体渦の大きさを考慮しながら格子点の疎密配置を調整する。特に、すべての風車のローター近傍では5mm間隔程度の高解像度な格子点配置を行うとすれば、ウインドファーム全体では、巨大な個数の格子点配置が必要になる。水平方向を考えると、 $5\text{km} \div 5\text{mm} = 10^6$ であるが、すべての長さにわたって5mm間隔程度の超高解像度な格子点配置が必要なわけではないので、1次元あたり $10^{5\sim6}$ 個の格子点配置が“夢の目標”の目安になる。

この目安は、他の流体工学解析の分野でも案外妥当である。例えば、走行中の自動車の空気抵抗については、自動車と大気が触れ合う境界近傍の解像度を0.1mmのオーダーまで細かくした数値解析 (LES) を行うと、実車フルスケールモデルによる風洞実験値に対して1～2%の誤差で予測可能という研究結果が坪倉によって発表<sup>4)</sup>されている。また、船舶の全抵抗係数については、模型船 (約5.5m) を曳航する水槽試験の状態を、約320億個の格子点配置により約0.05mmの解像度で数値解析 (DNS) を行った結果、水槽試験の計測誤差である1%以内の精度で予測できたことが西川によって発表<sup>5)</sup>されている。

以上のことから、定量的には、「1次元あたり $10^{5\sim6}$ 個の格子点を並べる高解像度なマルチスケール解析の実現」が、ものづくりをめぐる今後の流体工学解析における野心的な目標になると考える。

### 3.2 目標達成を阻むマルチフィジクスの要求

2.1に述べた“ウインドファーム”、“風力支援運航船”、“帆走型洋上風力発電船”という3つの事例では、いずれも、流体 (大気や海水) は、弾性変形可能な構造物 (風車のブレードや船体の帆等) と相互作用をする。特に、ウインドファームの場合、前述したように、風車は、極めて複雑な後流の中に置かれる。他方、その構造解析では、弾性変形を伴う強度解析や、寿命の長い安定した運転を実現するた

めの疲労解析をできるだけ高精度に行いたい。また、“風力支援運航船”や“帆走型洋上風力発電船”の場合は、流体部分に気相（大気）と液相（海水）が共存し、両者の界面で構造物がダイナミックに揺れ動く状況にある。このような複雑な運動が継続する状況下で構造物の健全性を評価するためには、流体と構造物に関する異なる物理方程式を時々刻々連成させて計算する“マルチフィジクス連成解析”が不可欠になる。この連成解析では、マルチスケール解析に要求される高解像度な格子点配置を維持したまま、その時間発展計算にマルチフィジクスの計算を組み込むので、計算時間のかなりの増大が通常は避けられない。その分、3.1に掲げたマルチスケール流体解析の数値目標の達成も遠のくことになる。

### 3.3 目標達成を阻むリアルワールドの要求

現実世界（リアルワールド）の自然環境では、風況等の予期せぬ急変が多発する。従って、運用段階では、風況急変に伴う異常が生じてもそれを事故に発展させないこと、また、このような場合にも、疲労損傷の過度な蓄積を防止してシステムの長寿命化を図ることが大切である。このためには、外部環境の急変に即応できるフィードバック制御が必要になる。この制御を高精度に実行しようとするれば、現地における計測情報を迅速にシミュレーションに反映させる“リアルタイムデータ同化（実時間計測融合シミュレーション）”の技術が求められる。従って、フィードバック制御にシミュレーション計算の結果をどのように反映させるか？という手法の選択によるが、データ同化の計算に要する時間が全体の計算時間の増加につながることは通常は避けられない。

### 3.4 スーパーシミュレーション高速化の夢

3.1に掲げたマルチスケール流体解析の数値目標は、超高速計算機の構成技術から見ると、超大規模メモリー間で超並列な超高速データ転送を実現するという課題である。すなわち、それ自体が非常に達成困難な目標である。この目標を、3.2に述べた“マルチフィジクスの要求”や3.3に述べた“リアルワールドの要求”も満足させつつ実現することは、“夢のまた夢”であるように思われる。

現在、マルチスケール流体解析に構造物との相互作用に関する連成解析を組み合わせた“スーパーシミュレーション”については、流体部分の挙動をナビエ・ストークス方程式等の差分法で、構造物部分の挙動を有限要素法で計算し、時々刻々、両者の状態量に関する情報をやりとりして時間発展計算を進めるという方法が王道的なアプローチになっている。実際、このようなアプローチは、有意義な成果を挙げており<sup>6)</sup>、足元から技術を固めるという意味

で、極めて合理的なアプローチであると言える。

しかしながら、本稿では、“スーパーシミュレーション”のリアルタイム化の夢を追求し、3.1に掲げたマルチスケールの数値目標からバックキャスト思考で検討を行う。少しでも夢の実現可能性を見出すことが目的である。この観点から、まずは、高解像度なマルチスケール解析を計算機で実行する際に、計算機負荷を桁違いに低減する方法を探求する。

## 【俯瞰的視点】仮想世界から現実収束する方法

“ものづくりをめぐる流体工学解析”に利用される計算機シミュレーションのアプローチを大雑把に整理してみる。

一般に、現実世界の現象は、多くの現象が相互に影響しあい、幅広い空間的・時間的なスケールにわたって変動している。従って、現実の挙動を数値シミュレーションで忠実に再現しようとする、より多くの物理現象を連成させる“マルチフィジクス性”と、より幅広い空間・時間範囲で変動をとらえる“マルチスケール性”を備えた複雑かつ精緻なシミュレーションモデルが必要になる。

例えば、以前、スーパーコンピュータ“地球シミュレータ（初代）”の開発プロジェクトチームにいたことがあり、当時、次のようなことが言われていた。

「地球温暖化の予測において重要な現象のひとつに“海水の地球規模での大循環（海洋大循環）”がある。この挙動のシミュレーションでは、物理法則に立脚した近似方程式を解くことによって海水のみの循環を模擬する物理モデルが中核にある。それを現実世界の現象に近づけるためには、海面上の空気による海水の駆動力や降雨・蒸発等による海面高度の変化を考慮できるよう“大気大循環”と連成させたモデルに進化させる必要がある。さらに、『氷山による下降海水流』や『生態系による空気組成の変化が温室効果を通じて大気や海水に与える影響』などを計算できるモデルとの連成を行えば、現実世界をより忠実に模擬できるであろう。」

このような“近似方程式の数値解法とモデルの精緻化”によるアプローチは、従来からの数値シミュレーションにおける第1の王道である（cf. 図1）。しかし、精緻化を進めるほどモデルの計算が複雑になり実用的な時間で計算を完了できなくなってしまう。これに対して、第2のアプローチとして、“より根源的な基礎方程式からの出発”という方法がある。例えば、分子動力学で流体工学規模の現象をシミュレーションする試みがこれにあたる。この場合、我々が注目している現実の世界は、アボガドロ数のオーダー（10の24乗）以上の分子集団にな

る。従って、分子の大きさの世界から計算を積み上げていくと、マルチスケールの桁の広がり1次元あたり8桁以上になってしまう。進歩が著しい現在の高性能計算機でも、この計算を実用的な時間で完了させるには、まだまだ演算速度や記憶容量が追いつかない。

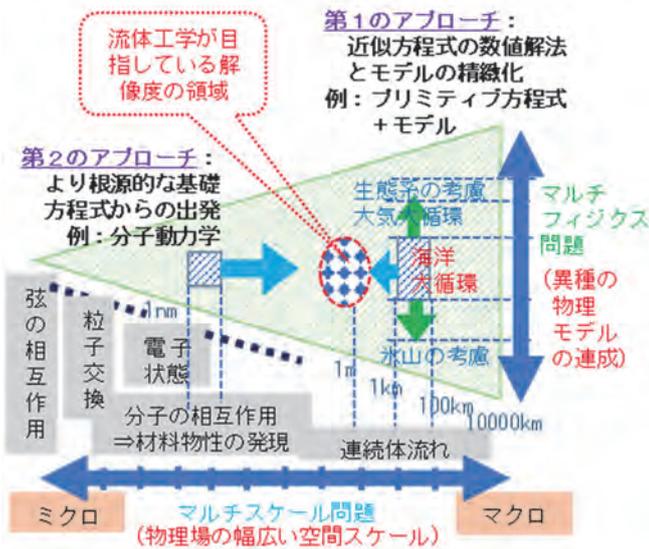


図1 マルチスケールとマルチフィジクス<sup>7)</sup>

こうした中、第3のアプローチ (cf.図2) として、「解析したい現象の空間・時間スケールよりも一段階だけ細かいスケールで仮想的な世界を想像し、その世界の時間発展を支配する単純な規則を設定して、これを計算機で高速に解き、得られた仮想世界の挙動をある適切な空間及び時間の範囲で平均化して現実世界の現象を導く方法」がある。このような“仮想世界からの現実収束”というアプローチは、計算時間を大幅に短縮でき、リアルタイム化の観点からは明らかに有利である。具体的な手法としては、格子ガス法、格子ボルツマン法などが挙げられる。

これらの手法では、連続的な流体の挙動を“サブマクロスケールの仮想粒子の集団挙動”で模擬することに特徴がある。ここで言う“サブマクロスケール”とは、解析したい現象の時空間スケールよりも一段階だけ細かいスケールのことである。この“サブマクロのスケール”においては、現実の世界を忠実に模擬しようとはしない。実際、サブマクロスケールで現実の流体を眺めても“連続体”のままであり、“粒子”のような存在は見えてこない。すなわち、現実とは明らかに異なることを知りながら、“サブマクロスケールの大きさをもつ仮想的な粒子”を想定し、その挙動を支配するメカニズムを考える。この“サブマクロ粒子モデル”が、“連続体に見える現実の大分子集団”の妥当な“代理モデル (サロ

ゲートモデル)”になっているか否か?は、それをある適切な時空間の範囲で平均化した際に、現実の挙動に合うようにパラメータを調整できるか否か?によって判定される。

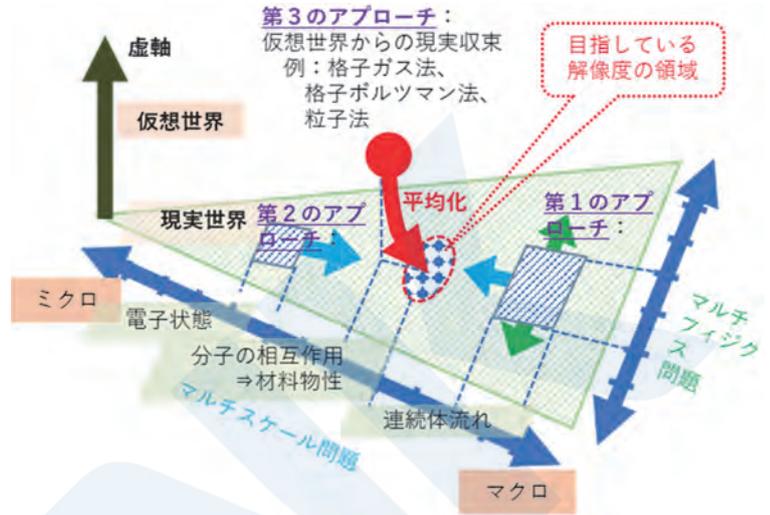


図2 “仮想世界からの現実収束”アプローチ<sup>7)</sup>

なお、様々なマルチフィジクスシミュレーションに適用可能な“粒子法”<sup>8)</sup>という強力なシミュレーション手法がある。粒子法における“仮想粒子”は、マクロスケールにおける流体塊等を、そのままのスケールで“粒子モデル”に置き換えたものである。このため、平均化(疎視化)の操作は不要である。しかし、その計算結果を人間が見て現実の物理挙動を理解する段階では、頭の中で“個々の粒子の動き”をある時空間の範囲で平均して、粒子の集団行動を概観していると考えられる。そこで、筆者は、粒子法も、格子ガス法や格子ボルツマン法と同じ“仮想世界からの現実収束”のアプローチに分類している。

#### 4. マルチスケール高速計算の実現を目指して (実数表現を全廃する簡易モデルの提案)

##### 4.1 疎密格子に1格子点1ビット幅の演算

##### 4.1.1 “格子ガス法”を基本手法として選択

“格子ガス法”, “格子ボルツマン法”, “粒子法”は、いずれも“仮想粒子”の挙動計算を行うが、計算効率の観点からは、それぞれ一長一短がある。ここでは、時間発展計算を行うときに取り扱う“物理量の表現”の違いに注目する。粒子法では、仮想粒子の位置を拘束する格子が存在しない(メッシュレス)。このため、仮想粒子の位置は自由な実数値をとり得る。また、仮想粒子の速度も時々刻々変化する実数で表現される。格子ボルツマン法では、仮想粒子の位置は格子点上に拘束され、その速度もある

決まった離散的な有限個の値しかとり得ない。しかし、仮想粒子がそれぞれの速度をとる確率分布が実数で表現され、これが時間発展計算の際に使用される。これに対し、格子ガス法では、格子ボルツマン法と同様に、仮想粒子の位置は格子点上に拘束され、その速度はある決まった離散的な有限個の値しかとり得ない。違いは、時間発展計算の際に、確率分布の計算は行わずに、その確率分布に従って生じ得る結果のいずれかを実際に生じさせる点にある。従って、実数値による表現はまったく不要である。

理由は、4.2に後述するが、マルチスケール流体解析における記憶容量の節約と計算時間の短縮を桁違いに向上させるひとつの方法として、実数値の表現をなくすことが非常に効果的である。そこで、「**記憶容量を節約し時間発展計算を高速化できる実数表現全廃モデルであること**」を、マルチスケール流体解析を大幅に高速化するための指導原理と考える。そして、この条件を満たす“格子ガス法<sup>9) 10)</sup>の“仮想粒子モデル”を考察の出発点にした。

なお、記憶容量の節約と計算時間の短縮を桁違いに向上させる方法がもうひとつある。それは、構造物の周辺など最小渦の直径が小さい領域では格子点を細かく配置し、構造物から遠く離れ、最小渦の直径が大きい領域では格子点を粗く配置することである。これにより、格子点の総数を減らすことができる。しかし、格子点配置の疎密が変化する部分で、格子点配列が不規則になる非構造格子では、一般に、計算上の手間が増えるという欠点がある。そこで、規則正しい構造で、疎密度だけが異なる格子を階層的に配置する方法がとられる。通常の数値流体力学(CFD)で利用される典型的な手法としては、“直交格子積み上げ法(階層直交格子法, Building-Cube Method, BCM)”が知られている。

格子ガス法においても、これに似た手法が、1993年にボッシュ(Robert P. Bosch, Jr.)によって既に考案されている。ボッシュの論文題目は、「格子ガス用マルチグリッドアルゴリズム<sup>11)</sup>」である。この格子点配置法では、粗い格子点網と細かい格子点網がつながる接続領域に位置する格子点上において、“粗い格子点網だけを移動できる重い仮想粒子”と“細かい格子点網だけを移動できる軽い仮想粒子”を相互に変換する操作を行う。このとき、“重い仮想粒子”がもつ質量と運動量は、これと変換される複数の“軽い仮想粒子”がもつ質量と運動量の和に等しくなければならない。しかし、この条件を満たす“重い仮想粒子”と複数の“軽い仮想粒子”が同じ位置に同時にやってくる確率は極めて低

い。そこで、“重い仮想粒子”と“軽い仮想粒子の”変換過程に、負の質量をもつ仮想粒子の生成消滅過程を導入して、質量と運動量の局所的な保存則を常に満足させている。本稿では、この「マルチグリッドアルゴリズム」を利用することを前提としている。

#### 4.1.2 格子ガス法4次元FCHCモデルの概要

ここで、筆者が利用している格子ガス法の具体的なモデルを説明する。

格子ガス法流体解析では、流体が存在する空間中に規則正しく格子点を配置し、特定の質量と運動量を担う多数の仮想粒子が、①格子点上での“衝突散乱”と②格子点間の“並進移動”を繰り返しながら移動していく。この様子を平均して、マクロな流体物理量(密度、運動量、速度等)の挙動を得る(cf. 図3)。このとき、仮想粒子がもつ質量や運動量が衝突散乱の前後で保存されるような粒子衝突を想定する限り、その挙動は、自然界におけるある条件下の流体挙動とかなり似たものになる。しかしながら、仮想粒子の速度が、自然界の流体分子のように連続的な値をとれないため、格子ガス法が導くマクロな挙動は、連続流体を仮定している一般的な数値流体力学(CFD)が導く流体挙動とは多少異なったものになる。この“多少の差異”を解消する計算法は、1993年にテシャラ(Christopher M. Teixeira)が考案<sup>12)</sup>しており、格子ガス法は、現在、理論的にもCFDと同等な精度をもった流体解析手法となっている<sup>13)</sup>。

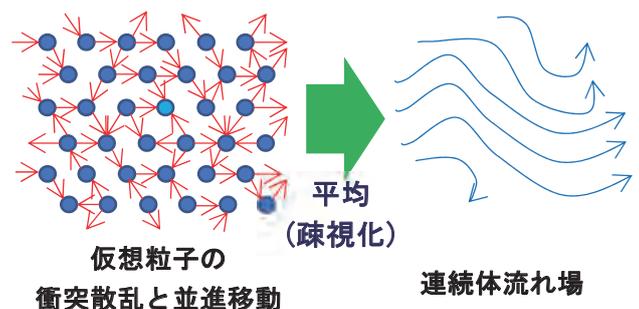


図3 仮想粒子の挙動を平均して連続体流れ場へ

特に、テシャラの「格子ガス法FCHC54速度モデル<sup>12)</sup>については、その計算結果を、非圧縮性流体に関するCFDの計算結果と比較した場合、マッハ数に関する3次の精度まで理論的に一致することがテシャラの論文で示されている。このモデルでは、ひとつの格子点に「静止粒子が最大6個、遅い速さの粒子が24の異なる向きにそれぞれ1個までで合計最大24個、速い速さの粒子も24の異なる向きにそれぞれ1個までで合計最大24個、総合計では、最大54(=6+24+24)個」の仮想粒子が存在し得

る。なお、仮想粒子が存在できる格子点配置は、応力テンソルの等方性を保つため、テシャラは“4次元面心超立方体格子（FCHC格子）”を採用している。モデルの要点とシミュレーション事例（cf.図4, 5, 6）を次に示す。

**【参考】テシャラの格子ガス法54速度モデルの要点**

(1) 仮想粒子は、すべて同じ質量： $m[\text{kg}]$ をもつ。  
 (2) 仮想粒子は、4次元空間中に存在する最小格子点間隔が $\Delta L[\text{m}]$ の“FCHC格子”の格子点上を、一定の時刻ステップ間隔( $\Delta\tau[\text{sec}]$ )ごとに同期して並進移動し、その移動を実現するのに必要な4次元速度： $\vec{C}_{ji}[\text{m/sec}]$ （エネルギーが $\varepsilon_{ji} \equiv (1/2)m(\vec{C}_{ji} \cdot \vec{C}_{ji})[\text{J}]$ で、速度の向きが  $i$ ）をもつ。

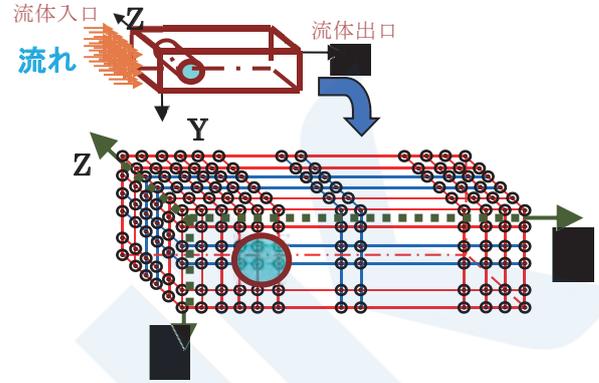
仮想粒子がもち得る速度は、以下のとおり。

- ①エネルギー0の粒子：存在可能粒子数  $d_0=6$   
 $\vec{C}_{ji}=(0,0,0,0) [\text{m/sec}]$  （←静止粒子）
  - ②エネルギー $mc^2[\text{J}]$ の粒子：可能な速度  $d_1=24$ 通り  
 $\vec{C}_{ji}=(\pm c, \pm c, 0, 0), (\pm c, 0, \pm c, 0), (\pm c, 0, 0, \pm c), (0, \pm c, \pm c, 0), (0, \pm c, 0, \pm c), (0, 0, \pm c, \pm c) [\text{m/sec}]$   
 ここで、 $c \equiv \Delta L / \Delta\tau [\text{m/sec}]$
  - ③エネルギー $2mc^2[\text{J}]$ の粒子：可能な速度 $d_2=24$ 通り  
 $\vec{C}_{ji}=(\pm 2c, 0, 0, 0), (0, \pm 2c, 0, 0), (0, 0, \pm 2c, 0), (0, 0, 0, \pm 2c), (\pm c, \pm c, \pm c, \pm c) [\text{m/sec}]$
- (3) 同一の速度をもつ仮想粒子は、同じ格子点に同時に2つ以上存在できない。  
 (4) 仮想粒子どうしの相互作用（衝突散乱）は、格子点上のみで生じ、その前後で、仮想粒子の質量、運動量、エネルギーの総和が保存される衝突規則を確率的に適用する。  
 (5) 衝突散乱によって相互に移りかわれる仮想粒子の存在状態間の遷移確率はどちらの向きも等しい。

**【格子ガス法54速度モデルを適用した格子点構成の例】**

3次元空間中に多数の格子点をXYZの各方向に並べ、直方体形状の格子点配列を作る。各格子点は、その内部に4次元目の座標として $R=0, 1, 2, 3$ の位置を識別できる

自由度をもつとする。これが下図であり、4次元面心超立方体格子を3次元空間へ投影した姿である。数値シミュレーションでは、3次元縮退格子として、例えば、X方向に1,024個、Y方向に192個、Z方向に384個の格子点を配置した。



**【過渡変化シミュレーションの条件設定の例】**

シミュレーション計算を開始する時刻ステップ0の時点で、各格子点には、そこに存在できる仮想粒子の最大数の20%の数の仮想粒子をランダムな向きに配置する。この結果、疎視化して得られるマクロな流速はゼロであり、流体は、直方体形状の中で静止している。次に、時刻ステップ1の時点から、+X向きの速度をもつ仮想粒子を $X=0$ の位置から注入していく。すると、時刻ステップが進むにつれて、流体全体が+X向きのマクロな速度をもつようになる。このとき、+X側の先にある直方体出口においては、出口直前に存在する格子点上の仮想粒子配置を、出口直後に存在する格子点の仮想粒子配置にコピーして、出口におけるマクロな流速の勾配がゼロになるという境界条件を近似的に実現した。また、 $\pm Y$ 方向と $\pm Z$ 方向には、周期的境界条件を適用した。この流れの中の入り口に近い位置に、“Z方向の中心軸をもつ無限大の長さの円柱”を置き、その後流に生じる流体挙動を計算した。ある断面上の疎視化された運動量分布の過渡変化動画の中からスナップショット画像を抜粋して表示する。

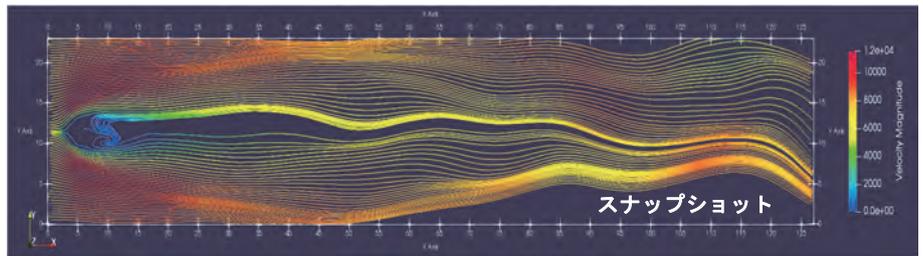
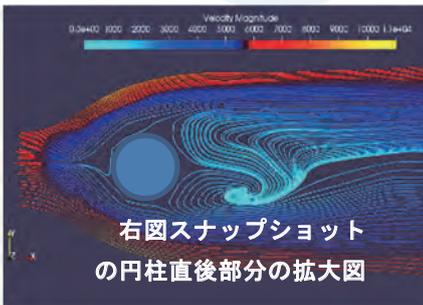
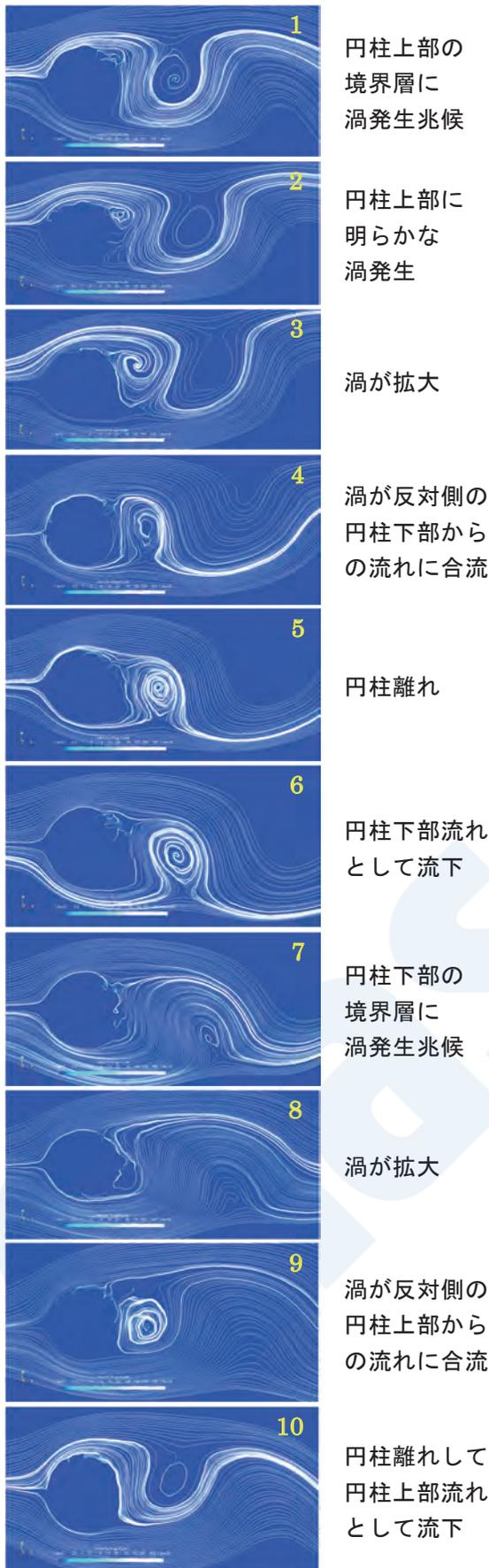
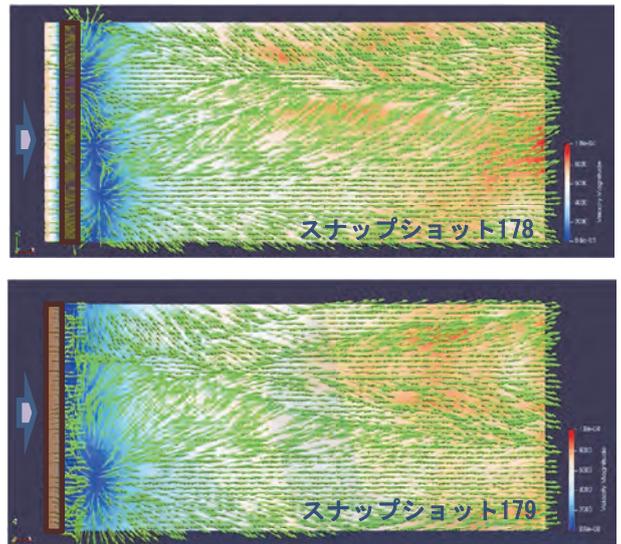


図4 円柱後流の過渡変化シミュレーション<sup>14)</sup>

図5 円柱境界層から交互に生じる渦放出<sup>15)</sup>

上図は、流下方向と円柱軸がなす平面上における流速について、流速の大きさを背景の色で、流速の向きを緑の矢印で示している。左端の円柱（茶色の長方形で表示）のすぐ後ろ（上図では円柱右側）に死水域がある。

動画を観察すると、流れがカルマン渦になって十分時間が経った時点では、死水域の後ろに低速流体（青色部分）と中速流体（薄青色部分）の領域が円柱軸方向に交互に出現してかなり激しく円柱軸方向に揺らぐのがわかる。また、さらに下流では、「流下方向の流れが集まり流速が速くなる部分」と「流れが広がり流速が遅くなる部分」が円柱軸方向に交互に並び、流れの方向を揺るがせながら時間的に波打つ状況が観察された。これは、高速ストリーク及び低速ストリークと呼ばれる流れが、“流下方向に回転軸をもつ縦渦”の効果と相まって生じた流体挙動であると考えられる。

図6 円柱後流に発生する縦渦<sup>14)</sup>

#### 4.2 ベクトルコアで16384格子点一括計算

仮想粒子の状態を表現する状態量のすべてを有限個に離散化し実数表現を全廃することができれば、時間発展計算における実数計算は不要になる。実際の計算機では、ひとつの実数を記憶する場合、浮動小数点表示で、精度に応じ32, 64, 128ビットのメモリーを必要とする。従って、ひとつの実数の時間変化を計算するには、演算回路において、32, 64, 128ビット幅を占有することが必須になる。これに対し、仮想粒子の状態量を有限個に離散化して表現できれば、例えば、その状態量の値が小さい順にA, B, C, …などの符号を割り振り、状態量の値が例えばBであるときには、Bの実数値そのものを記憶するのではなく、B=1という1ビット値を記憶すればよい。状態量の値がBでないときは、B=0を記憶する。

これにより、大幅な記憶容量の節約を実現できる。

また、ある格子点において、速度Dと速度Eをもつ2つの到着粒子が、衝突散乱によって速度Fと速度Gをもつ2つの出発粒子になった場合 ( $D+E \Rightarrow F+G$ )、速度Dと速度Eをもつ2つの到着粒子は、衝突散乱によって消滅し、その速度をもつことはなくなったので、 $D=1 \Rightarrow D=0$ 、 $E=1 \Rightarrow E=0$ という計算処理を行う。同様に、速度Fと速度Gをもつ2つの出発粒子が衝突散乱によって生成したので、 $F=0 \Rightarrow F=1$ 、 $G=0 \Rightarrow G=1$ という計算処理も行う。いずれの計算処理の場合も、D、E、F、Gという変数は、1か0の値しかとり得ない。従って、演算回路においては、常に1ビット幅しか占有しなくて済む。そこで、演算回路のあるビットでは、常にそのビットに対応したあるひとつの格子点におけるD、E、F、G、…の変化の計算を順番に行うことにする。こうすれば、1回の演算命令で一括して処理できるビットの個数と同じ個数の格子点について、その時間発展演算を一括して並列的に行うことが可能になる。

筆者が利用している東北大学サイバーサイエンスセンターのベクトル計算機AOBA-A (NEC製のSX-Aurora-TSUBASA) の場合、1回のベクトル命令の発行で、1個のベクトルプロセッサコアあたり、  
 $64 \text{ビット} / \text{ワード} \times 256 \text{ワード} / \text{命令}$   
 $= 16,384 \text{ビット} / \text{命令}$   
 のデータ処理ができる。従って、1個のベクトルプロセッサコアだけで16,384個の格子点に関する一括計算を実行できる (1CPUなら8コアでさらに8倍)。

なお、この一括計算方法については、2013年の時点で、地球シミュレータ (ES2=SX-9) の64ノード (512CPU, 主記憶合計約8TB) を用い、1,000億格子点の時間発展計算を進められることを確認している<sup>16)</sup>。

また、この計算方法で、リアルタイム計算を実現できる場合もある。筆者は、以前、スーパーコンピュータ“京”の運用立ち上げを担当しており、約50m×約60mの広さをもつ計算機室内に配置されたスパコンラックの空気冷却風速場の解析評価を実施した<sup>17)</sup>。その当時の結論は、「 $1024 \times 1024 \times 256 \approx 2.6$ 億個程度の格子点分割であれば、大規模計算機空気冷却風速場の実時間シミュレーションを10テラフロップス程度 (京コンピュータの1ラック程度) の計算機で実現可能」というものである。ある程度の解像度でよければ、1格子点1ビット幅演算の効果だけでも、実時間シミュレーション可能な事例もある。

### 4.3 実数全廃計算でどんな乱流も値を算出

乱流のように激しく変化する流れを計算機で安定

的に計算していく観点からは、格子ガス法には重要なメリットがある。前述のとおり、格子ガス法の時間発展計算では、実数表現を全廃できる。この場合、浮動小数点演算に起因する打ち切り誤差の発生はない。従って、どんなに激しい流れについても、途中で計算不能になることはなく、必ず、何かの計算結果を安定的に求め続けることができる。

また、乱流状態は、一般に大きなレイノルズ数条件下で生じる。他方、5.3に後述するが、本手法は、正の流体粘性はもちろんのこと、負の流体粘性も発現できることを確認している。これらの粘性発現機構をうまく調整すれば、値がゼロに極めて近い正の流体粘性を発現させることで、非常に大きなレイノルズ数状態も模擬できるであろう。この点でも、乱流解析への適用上、非常に有利であると思われる。なお、格子ガス法による“負の粘性発現”を乱流解析に利用するアイデアについては、Rothmanの論文<sup>18)</sup>を参照されたい。

### 4.4 量子計算機なら多世界確率ビット演算

格子ガス法における衝突散乱計算は、4.2に述べたように、各速度をもつ到着粒子の存否を表すビット列を、出発粒子の存否を表すビット列に変換する計算である。このとき、衝突散乱計算の出力となる出発粒子のビット列は、質量と運動量の合計が衝突散乱の前後で保存する限り、物理的にはどのようなビット列でも生じ得る。従って、一般的には、ひとつの到着粒子ビット列に対して、複数の出発粒子ビット列が出力可能である。個々の計算では、ある確率に従って、複数の可能性のうち、ただひとつの出発粒子ビット列を確定すればよい。このような計算上の特徴は、量子ビットを利用した“ゲート型量子計算機”の計算特性<sup>19)</sup>そのものである。すなわち、量子力学が適用される世界では、状態変化は、多世界において同時並行的に進行し、観測した瞬間に、確率的にどれかひとつの世界の変化結果を得る。

量子計算機については、現在、世界各地の各種大手企業や大学等で、実用化に向けた開発研究が進められており、公開利用も始まっている。筆者が利用を期待している“ゲート型量子計算機”については、“量子もつれ現象”によって相互連携できる量子ビットの数がまだ小さい。しかし、Googleが2019年に「最速のスーパーコンピュータが1万年かかるある問題を量子コンピュータがわずか200秒で解ける」ことを示して有名になったIBMのQシステム<sup>19)</sup>では、53量子ビットでもこの性能を出せた。また、「格子ガス法のビット演算は量子ビット計算に直接移行しやすい (cf.図7)」、 「物理量を統計平均的な計算で求める格子ガス法では、量子計算機のエラー率がゼ

ロでなくても、それなりの信頼性を確保できる」など格子ガス法特有の量子ビット計算との相性の良さがある。将来の低消費電力超並列計算の実現に向けた量子計算機利用の可能性が大いに期待できる。

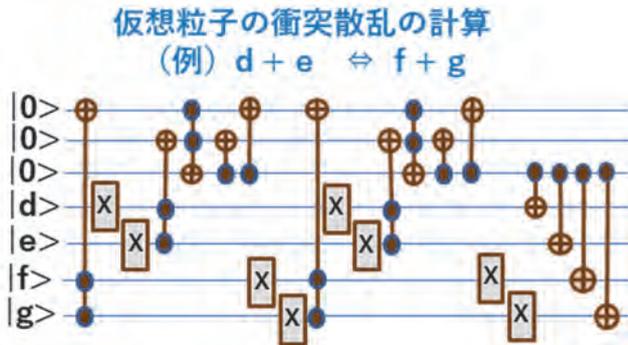


図7 ゲート型量子計算機の計算イメージ

## [俯瞰的視点] 脳型コンピューティングに注目

2.1に述べた3つの事例のうち、システム自体が自然環境の影響を受けて最もダイナミックな運動をするのは、“帆走型洋上風力発電船”であろう。このような状況下でも、人間（ヨット等の達人）は、適切な操船をリアルタイムでやってのけてしまう。そこで、人間の脳が行うような“脳型コンピューティング”にヒントを求めることとした。

現在は、人工知能（AI）に関する第3回目のブーム到来時期である。そのきっかけは“深層学習”の成功であったが、AIについては、ずっと以前より、いろいろな角度から様々な研究がなされてきた。しかし、脳の機能の本質的な発現機構の解明にはまだまだ到達してはいない。

他方、実際の脳における機能の発現機構とは異なっていたとしても、その機能に似た特性を発現できるようなシステムが開発され、工学的応用規模まで発展し、さらに社会で広く普及した技術もある。その代表的な事例として、ここでは、「ファジィ推論」と「多層パーセプトロン学習」に注目する。

## 5. マルチフィジクスな連成の実現を目指して（物理挙動を直感する簡易モデルの提案）

### 5.1 仮想粒子描像で異なる物理も同じ計算

ファジィ推論の本質は、ファジィ推論規則そのものにあるのではなく、その規則を人間が導くにあたって、その分野の専門家等が、頭の中で大雑把に描く“イメージモデル”にある。この“イメージモデル”は、考察の対象となる現実の複雑なシステムそのものではない。簡単で、多くの場合ビジュアルなイメージモデルである。ただし、その分野の専門家

等であれば、このイメージモデルの挙動を想像することによって、実際のシステム挙動を直感的かつ半定量的に導出することが可能である。すなわち、時間発展計算を駆動する微分方程式等の“代理”の役割を果たす“サロゲートモデル”になり得る。そこで、AIサロゲートモデルの第1条件を「物理挙動の因果関係を半定量的に推測できる簡単なイメージモデルであること」と考えた。

ここでは、「簡単なイメージモデル」の具体例として、“仮想粒子描像”を採用する。格子ガス法に基づく仮想粒子の“衝突散乱”と“並進移動”というイメージモデルは、それ自体、汎用的な“仮想粒子描像”であり、いろいろな物理現象に対応させることができる。例えば、ある領域の格子点群に対して、「どんな向きから到着粒子がやって来ても、その粒子が来た向きに戻るよう反転させる」という衝突散乱規則を適用したとする。この場合、その領域内に存在する仮想粒子は、時間平均で静止するので、マクロ的には、固定された固体領域を表現していると解釈できる。流体の挙動も固体の挙動も同じ計算で模擬できる一番簡単な例である。

### 5.2 流固体連成解析で連成起因の遅延ゼロ

さて、上記のような固体の特性を発現する衝突散乱規則を適用する格子点の位置を、「周辺から到着する仮想粒子が衝突散乱過程でその格子点に与える“力積”の大きさと向き」に応じて移動させることを考える。うまく調整すれば、弾性体の変形も模擬可能であろう。このように、マルチフィジクスな物理現象を、粒子間の相互作用という統一的な“シングルフィジクス”で解釈し、時間発展計算を流体固体の区別なく同じ計算によって行う。こうすれば、すべてが流体だった場合の計算時間と比べて、本質的な遅延はないはずである。

なお、現在、このような“仮想粒子描像”で、一番成果を挙げているのは“粒子法”<sup>8)</sup>であろう。粒子法では、ひとつひとつの流体塊について運動方程式を解き、時間の経過に従って個々の流体塊がどのように移動するか？を求める。このため、「流体の大きな変形」や「衝突による流体の分裂」なども模擬できる。すなわち、物質を小さい塊の集合体としてモデル化するので、物質の運動や形状の大きな変化を自由に扱える。このため、流体解析のみならず、構造解析、固体解析などへ広く応用されている。

“粒子法”において流体塊（仮想粒子）が自由に動ける本質的な理由は、仮想粒子が存在できる位置を拘束する格子がない“メッシュレス解法”であるからである。他方、“格子ガス法”の場合、仮想粒子が存在できる位置は、規則正しく配置された格子

点上に限られる。しかしながら、仮想粒子の移動が格子軸の方向に限定されるわけではない。例えば、前述した“テシャラのFCHC54速度モデル”の場合、各格子点から48個の異なる向きに仮想粒子が飛び出すことができ、かなり自由な動きが可能である。従って、“粒子法”によるマルチフィジクスシミュレーションの成功事例があれば、その工夫をそのまま準用して恩恵を得ることができるはずだと考える。

### 5.3 出発粒子群への連行確率で粘性を制御

さて、仮想粒子は、実際には、極めて多数の実在分子を代表している。衝突散乱前後の“到着粒子”や“出発粒子”も、実は、多数の実在分子が集団行動している粒子群である。また、液体の場合、その密度は固体の密度とさほど違いはない。気体の場合でも、マッハ数が小さければ、非圧縮性流体のように振る舞う。すなわち、実在分子は、多くの場合、非常に密集しながら移動しており、どこかに空きスペースができればそこを埋める動きが生じる。このイメージを膨らませると、例えば「前回の衝突散乱である向きへ出発した仮想粒子が存在すれば、今回の衝突散乱で別の向きに向かって飛び出そうとした仮想粒子があっても、前回の出発粒子群の流れに引き込まれて、その向きに強制連行される実在分子が増えるであろう。」という“ファジィ推論”も可能である。これは、今回の出発粒子が前回の出発粒子の向きに同期して連行される確率が増すことを意味している。筆者は、多数のケーススタディにより、この“同期連行確率”を変化させることによって流体粘性を広範囲に制御できることを確認している<sup>20)</sup>(cf.図8)。なお、この制御では、時間平均で運動量保存が成立するように注意する。また、負の粘性の発現(静止流体からの自発的な渦発生)も可能である。

ものづくりのための流体力学では、実験・試作スケールのレイノルズ数から、実機スケールのレイノルズ数までを連続的にシミュレーションできると、予測の信頼性が向上し、自信をもった工学設計が可能になる。この意味で、簡単な方法で幅広い範囲の流体粘性を実現できるメリットは大きい。

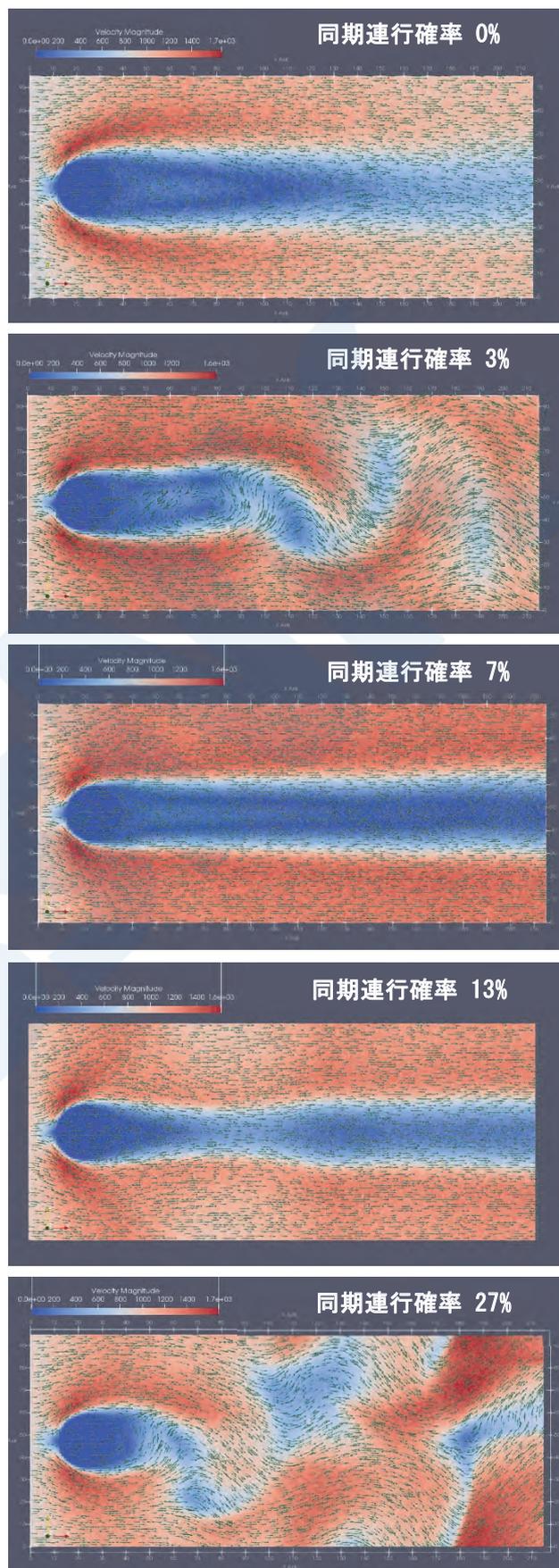


図8 同期連行操作の確率変化による粘性制御<sup>20)</sup>

## 5.4 粒子法の成果で亀裂の発生進展を予測

粒子法の応用では、動的弾性解析やクラック進展解析のシミュレーションも実施されている<sup>8)</sup>。物質を構成する小さな物質塊が分離することで、クラックの成長を模擬できる。粒子法の例では、応力が集中して、物質粒子のミーゼス応力（あるいは歪）が、その材料物性値である破壊応力（あるいは破壊歪）に達するとその粒子が破壊すると考える。そして、破壊した粒子は、応力のやりとりができなくなってクラック面を形成する粒子になる。この計算法を、格子ガス法の仮想粒子で実現する工夫をすればよい。現実の風車等の構造物では、亀裂の発生によるトラブルがしばしば発生している。流固体連成解析において、亀裂の発生進展の予測までを可能にすることは、実用上大きなメリットがある。

## 6. リアルワールドへの即応の実現を目指して (学習計算を装備する簡易モデルの提案)

### 6.1 再帰ニューラルネットで遅延ゼロ学習

“多層パーセプトロン（階層型ニューラルネットワーク）”は、社会利用が最も進んでいる人工ニューラルネットワークである。“深層学習（Deep Learning）”を実行できるタイプのニューラルネットワークもこれに含まれる。多層パーセプトロンの学習機能は、第2回目のAIブーム到来のきっかけになった“誤差逆伝搬法”である。その一般論と工学的応用は、このとき既に確立している。

格子ガス法では、マクロな物性値は、その近傍に存在する仮想粒子がもつ質量や運動量などの合計または統計平均から得られる。この合計または平均の計算も、多層パーセプトロンの計算構造で表現できる。従って、時間発展を計算するニューラルネットワークの階層構造の中には、「マクロな物性値を出力する多層パーセプトロン」も存在する。

また、その計算出力値を実測データに整合させた場合は、計算出力値と実測目標値の差が出た原因を逆にさかのぼって、そのさかのぼりパス上に位置するニューロンの重みを上述の“誤差逆伝搬法”の手順に従って修正する。この繰り返しで、計算出力値を教師データである実測目標値に近づけていくことができる。すなわち、多層パーセプトロンの後段から前段にデータをリカレントさせる計算構造（リカレントニューラルネットワーク：再帰ニューラルネットワーク：RNN）を構築できれば、“データ同化”の手段を自動的に獲得できたことになる。そこで、AIサロゲートモデルの第2条件を「学習機能をもつ再帰ニューラルネットワークの計算構造に置換で

きるモデルであること」と考えた。

ここで、時刻  $t$  における計算出力値と実測目標値の差から導出した新しい重みは、時刻  $t + \Delta t$  以降の時刻における計算に反映される。過去にさかのぼって計算しなおすわけではない。従って、この方法では、「計測データをシミュレーションにフィードバックすることが原因で、もとの時間発展計算を遅延させることはない。」という点が重要である。

### 6.2 時間発展計算を停止せずにデータ同化

前節で述べた方法を、格子ガス法の計算を行う多層パーセプトロンに適用すれば、時間発展計算を停止せずにデータ同化を実現できる。この場合、多層パーセプトロン構造のすべての計算は、実数を使わずに微小整数の範囲で実行できることを次に示す。

まず、物理空間中に規則正しく格子点を配置し、“各格子点が多層パーセプトロンを内蔵している”と考える（cf.図9, 10）。格子ガス法54速度モデルの場合は、6個は静止粒子なので動くことができない。従って、近傍に位置する最大48個（ $=54-6$ ）の格子点からやってくる“到着粒子”が存在し得る。このときの存否情報が、例えば、到着粒子が存在する場合「1」、存在しない場合「-1」、不明の場合「0」として、“多層パーセプトロン”の入力層に入力される。そして、ニューラルネットの“積和しきい値計算”によって算出された値（1, -1）が出力層に現れる。この情報が「1」のとき、当該格子点からの出発粒子が存在し、「-1」のときは出発粒子が存在しない。

なお、空間中のある場所で観測されるべきマクロな物理量は、その場所を中心とした適切な近傍に存在する仮想粒子がもつ質量・運動量・エネルギーの総和から算出する。従って、この計算を行うニューラルネットにおいても、微小整数しか現れてこない。

さらに、仮想粒子が移動する可能性のある格子点どうしをすべて結べば“流れ場全体”もニューラルネットワークで表現でき、その時間発展計算を実行できる。すなわち、“流れ場”の変化は、“ニューラルネットワーク（多層パーセプトロン）を内蔵した空間格子”とその格子点（ニューロン）間を移動する“仮想粒子”の集団挙動として理解できる（cf.図11）。

また、前節で述べたとおり、現実世界のいくつかの空間位置で計測データが得られる場合、それぞれの位置の近傍格子点に内蔵された“多層パーセプトロン”において誤差逆伝搬法を実行し、計算出力値を実測データに整合させることができる。このとき、多層パーセプトロンの入力データに乗じる“重み”の値も、（1, 0, -1）のいずれかの値しかとらない

と仮定する。学習によって調整するものは、それらの重みの適用確率である。要するに、1回1回の重み調整は、(1, 0, -1)の選択で大雑把に行い、微調整は、これらの重みの適用確率を調整することで実現する。このような重みの調整を継続すれば、実測データの変動状況にもよるが、シミュレーションデータが実測データにそれなりに整合してくると期待できる。

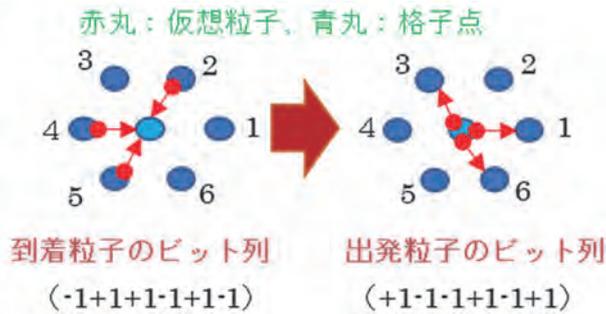


図9 衝突散乱による存否情報の変化<sup>20)</sup>  
(2次元格子ガス法FHPモデルの場合)

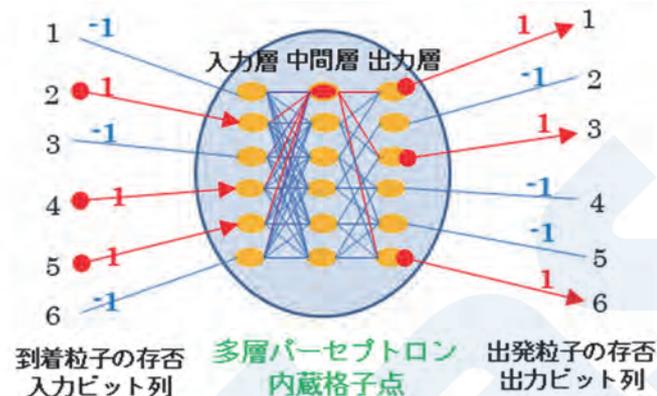


図10 衝突散乱を計算する多層パーセプトロン<sup>20)</sup>

図10で、入力層は入力値±1をそのまま中間層に伝える。中間層は入力ビット列を識別する。例えば、中間層の一番上の赤色ニューロンにおいて、赤線入力に+1、紫線入力に-1の重みを設定すれば、上から紫(-1)→赤(+1)→紫(-1)→赤(+1)→赤(+1)→紫(-1)の重み列になる。このとき、入力層への入力ビット列がこの重み列と一致するときのみ積和が最大値(6)になる。これを中間層ニューロンの活性化関数をしきい値=6の階段関数にして識別する。このニューロンの出力は、出力層のうち活性化すべきニューロン1, 3, 6にだけ接続しておく。出力層のニューロンは、接続されているシナプスの入力重みをすべて+1に設定し、活性化関数をしきい値=-1の階段関数にする。このことで、いずれかひとつでも入力が+1になれば活性化(出力=+1)する。実際の適用時には、このような階層を多段に重ねて適用する。なお、衝突規則を確率的に

適用する場合は、入力層のニューロンを増やし、±1の入力をランダムに与える。

RNNの時間展開 (2次元の場合のイメージ)

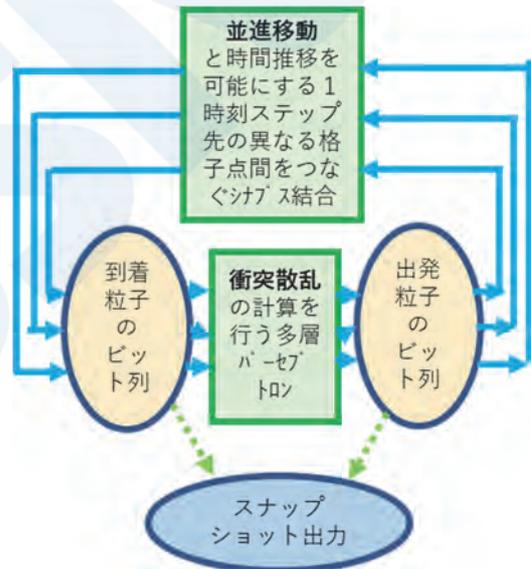
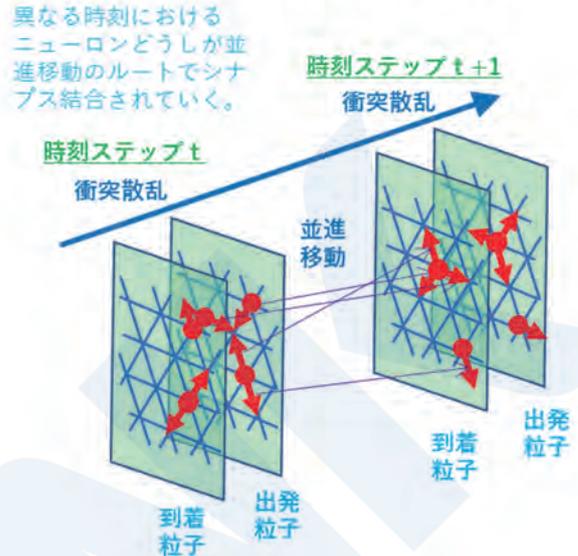


図11 流れ場全体のニューラルネットワーク<sup>20)</sup>

6.3 不完全な実世界計測データも頑健学習

現実世界から得られる実測情報は、計測システム設置上の制約や故障の発生などにより、すべての境界における完全なデータ取得は通常不可能であり、かつ、誤ったデータを含み得る。

ニューラルネットワークは、一般的に、多数の入力値の重み付き加算とそのしきい値演算の繰り返しである。従って、あるニューロンのひとつの入力値となるべきデータが欠損したり誤った情報入力になったりした場合でも、途中で、その影響が排除される可能性が高い。このような計算過程における“頑健性(頑強性, ロバストネス)”は、実測情報の不

完全さが時空間的に分散して生じる場合は、それなりの効果を期待でき、リアルワールドのデータ処理に好都合である。

### 〔俯瞰的視点〕微分方程式解法を離れてみること

現実世界（リアルワールド）における流体力学解析を考える際に最も重要なことは、「将来における境界条件の変化を事前に予測できないこと」であろう。境界条件は、境界の外側（外界）の状態変化の影響を受ける。従って、外界も含めたすべての環境が正確にシミュレーションされていない限り、事前に予測できないのは当然である。このため、どんなに精度よく現実に一致する初期条件で計算を開始できたとしても、外界の情報をフィードバックすることなく、現実世界における未来の状態をいつまでも精度よく予測し続けることはできない。このような大前提に立つと、リアルワールドへの対応を重視する場合、「微分方程式をできるだけ精度よく解く」という従来のアプローチを離れ、「人間の脳が行うような機能を模擬し、大雑把な高速推論と外界計測情報に基づく迅速なフィードバック補正」という

AI的なアプローチで時間発展計算を代替できないだろうか？と考えるのは、自然な発想であろう。

### 6.4 次元圧縮した状態量分布間で高速計算

AIと言えば、現在は、最初に思いつくキーワードは“深層学習”である。そこで、はじめに、格子ガス法ではなく、通常の数値流体力学（CFD）をベースにして、“深層学習”を応用した“AIサロゲートモデル”の概念を考えてみる（cf.図12）。

マルチスケール解析を克服するため、まずは、非常に大規模な計算ができるというスーパーコンピュータのcapability性能を活かし、ナビエ・ストークス方程式（NS方程式）等に基づく高解像度な時間発展計算を行う。これにより、1回の計算でも、「時刻 $t$ における詳細な流速空間分布」と「時刻 $t + \Delta t$ における詳細な流速空間分布」のセットを非常に多数得ることができる。次に、中規模な計算であれば非常に多数の計算を並列実行できるというスーパーコンピュータのcapacity性能を活かして、上記の計算で得られた各時刻の流速空間分布（速度ベクトルの各成分を表す3つの数値の巨大な3次元配列）を深層学習により次元圧縮する。次元圧縮によ

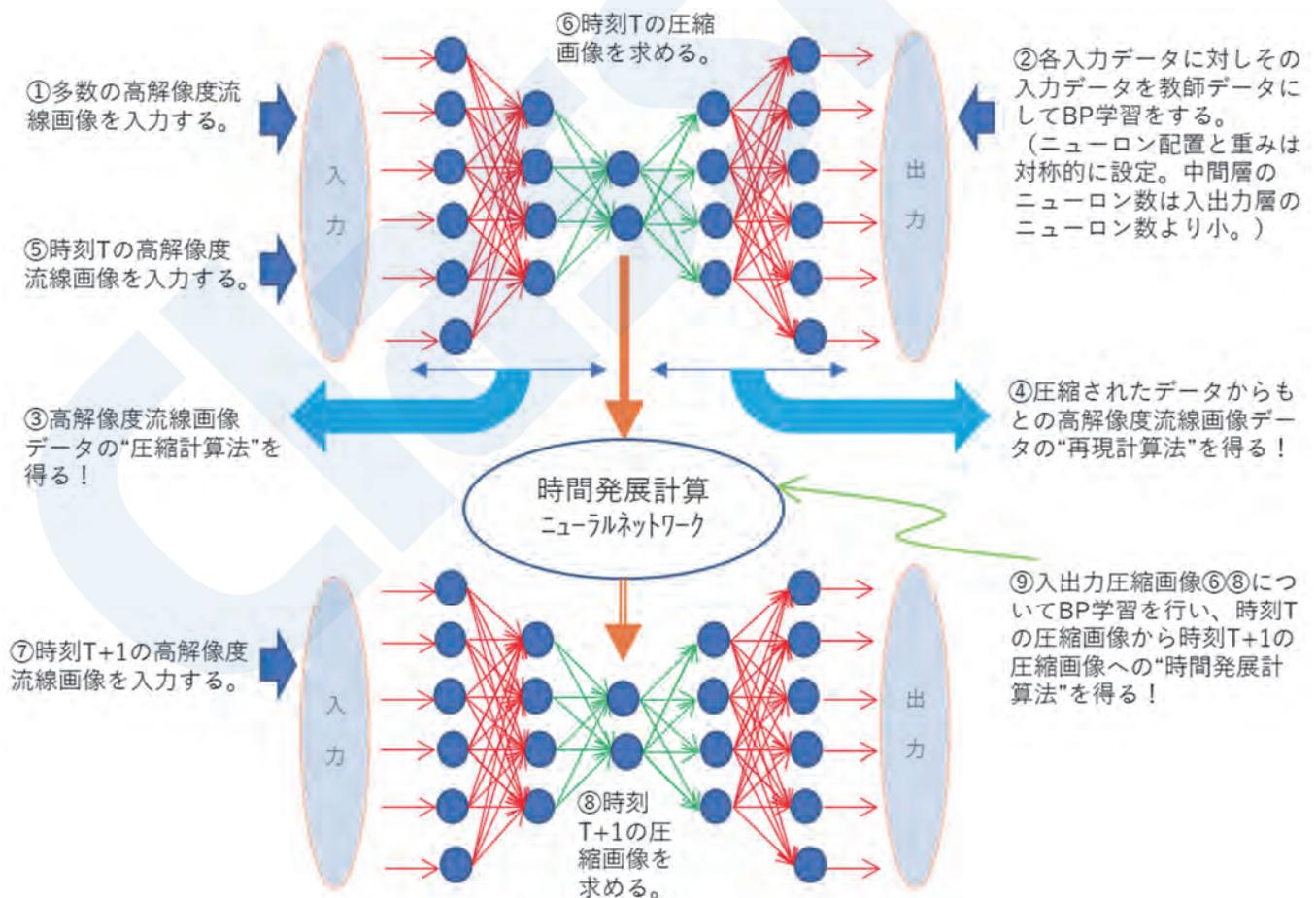


図12 情報圧縮型時間発展計算

って、必要な記憶容量を大きく削減できる。

ただし、次元圧縮で得られた数値配列は、ニューラルネットワークの計算によって機械的に学習されたものであるため、その数値分布を見ても人間の直感でその物理的な意味を理解することはできない。最後に、次元圧縮した時刻  $t$  と時刻  $t + \Delta t$  における流速空間分布のセットを入出力データとしてニューラルネットワークに学習させる。このときの入出力データセットは非常に多数あるが、次元圧縮されているので、ひとつひとつの学習に要する計算規模は中規模で済む。

以上の結果、次元圧縮された流速空間分布についての時間発展計算法が、ニューラルネットワークの計算法として学習されたことになる。これが、NS方程式による時間発展計算を代替する“AIサロゲートモデル”のひとつの概念である。

なお、この“AIサロゲートモデル”を用いて時間発展計算を行えば、各時刻で直接得られるデータは、やはり意味のわからない次元圧縮されたデータである。しかし、時間発展計算の過程で、我々がそのスナップショットを知りたいときはいつでも、次元圧縮の逆計算によってもとの高解像度レベルで物理的な意味のわかる流速空間分布を復元できる。

以上のような“情報圧縮型時間発展計算”は、格子ガス法によって得られたデータにもそのまま適用できる。これを、1ピクセルが54ビット情報で表現された多次元画像の画像認識や情報圧縮の問題だと考えてもよい。このような情報圧縮された画像間の時間発展計算法は、より高解像度の流体挙動をより高速に実行する可能性を拓く。このとき、計算法の直感的な意味を理解できなくなったとしても、リアルタイム制御の段階では、試行錯誤の検討が必要な設計段階とは違って、特に困らないとも言える。

リアルワールドへの即応というニーズは、システムの運用時に生じる。この場合は、スーパーコンピュータなどに頼らず、計測データを取得できる現地で、システム内部に組み込めるようなコンパクトな独立したコンピュータ、あるいは、インターネット接続可能なIoTエッジコンピュータのような形態の方が理想であろう。今後のAI研究によって、深層学習を超えるような工学的にも社会的にも大きなインパクトを与える革新的なアルゴリズムが発見されるかもしれない。また、AIアルゴリズムを高速に実行できるプロセッサの開発もなされるかもしれない。いずれにしても、流体計算をニューラルネットワークの計算構造に置換できることは、今後のAI研究の成果を直ちに適用できる点で楽しみである。

## 7. まとめ

ものづくりをめぐる流体工学解析の数値シミュレーションについては、はじめにその物理現象を支配する微分方程式を設定し、次に、その時間発展を計算するという方法が通常採用されている。これは、最も合理的で信頼できる方法であるが、現実世界の応用では、はるかに高性能なシミュレーション性能が求められつつある。本稿では、この飛躍的な性能向上を実現するため、従来からの“微分方程式の解法”という王道を離れ、微分方程式の代役をなす“AIサロゲートモデル”について検討し、ひとつの可能性を紹介した。散文的な記述スタイルをとったため論旨を明快に表現できていない部分もあるので、最後に、その骨子をまとめておく。

### ものづくり流体工学のための“AIサロゲートモデル”

#### (1) 今後の風力エネルギー利用拡大と流体解析

【現在の状況】 風力等の流体工学で高解像予測が必要

#### (2) 夢の目標設定とバックキャスト思考の試み

【野心的目標】 1次元あたり5~6桁幅が理想の解像度

#### (3) マルチスケール高速計算の実現を目指して (実数表現を全廃する簡易モデルの提案)

【挑戦的行動】 疎密格子に1格子点1ビット幅の演算



【直接的結果】 ベクトルコアで16384格子点一括計算  
【付加的結果】 実数全廃計算でどんな乱流も値を算出  
【近未来結果】 量子計算機なら多世界確率ビット演算

#### (4) マルチフィジクスな連成の実現を目指して (物理挙動を直感する簡易モデルの提案)

【挑戦的行動】 仮想粒子描像で異なる物理も同じ計算



【直接的結果】 流固体連成解析で連成起因の遅延ゼロ  
【付加的結果】 出発粒子群への連行確率で粘性を制御  
【近未来結果】 粒子法の成果で亀裂の発生進展を予測

#### (5) リアルワールドへの即応の実現を目指して (学習計算を装備する簡易モデルの提案)

【挑戦的行動】 再帰ニューラルネットワークで遅延ゼロ学習



【直接的結果】 時間発展計算を停止せずにデータ同化  
【付加的結果】 不完全な実世界計測データも頑健学習  
【近未来結果】 次元圧縮した状態量分布間で高速計算

## 謝辞

本稿で述べた研究の実施にあたっては、“AIサロゲートモデル”の候補となるモデルを考案するたびに、東北大学サイバーサイエンスセンターのベクトル型スーパーコンピュータ（SX-9, AOBA-A(SX-Aurora-TSUBASA)等）を利用して多数のパラメータスタディを行った。同コンピュータは、1格子点1ビット幅演算による超並列計算の性能を発揮しやすく非常に使いやすい。このような最先端のベクトル型コンピュータの利用環境を長年にわたり整備維持されるとともに、その利用時には、いつも親切なご指導とご協力をいただいたことについて、同センターの関係各位に心から感謝申し上げる次第である。

## 参考文献

※本稿は学会論文ではなく解説なので、参考文献としては、原著論文よりも解説的な文献を優先して挙げている。

- 1) 商船三井：“商船三井グループ 環境ビジョン 2.1”，商船三井のHP。  
(<https://www.mol.co.jp>)
- 2) Kanda, Y. & Ishihara, T. “High-resolution direct simulation of turbulence”, *J. of Turbulence*, 7, pp.1-17, 2006
- 3) 松尾：“チャンネル流”，*ながれ* 22, pp. 35-40, 2003
- 4) 坪倉：“「京」が変える車の開発プロセス”，*計算科学の世界* No.6, 理化学研究所計算科学研究機構, 2013
- 5) 西川：“「京」の中で船を走らす”，Vol. 14, *京算百景*, RIST, (hp150005：乱流の直接シミュレーションによる曳航水槽代替技術の実用化), 2015
- 6) 吉村ら：“スーパーシミュレーションとAIを連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用”，*クリーンエネルギー「富岳」プロジェクト*, 「富岳」成果創出加速プログラム
- 7) 徳田, 松岡：“実時間・超高速計算—計算機の新しい利用技術の開拓に向けて—”, *RIST News* No.52, pp.13-21, 2012
- 8) 矢川, 酒井：“粒子法 基礎と応用”, 2016, 岩波書店 (ISBN 978-4-00-006150-6)
- 9) B. Haaslachner, U. Frisch, Y. Pomeau: “Lattice Gas Automata for the Navier-Stokes Equation”, *Physical Review Letters* Vol.56, No.14, pp.1505-1508, 1986
- 10) Uriel Frisch, Dominique d’Humières, Brosl Hasslachner, Pierre Lallemand, Yves Pomeau, Jean-Pierre Rivet: “Lattice Gas Hydrodynamics in Two and Three Dimensions”, *Complex Systems*, 1 (1987), pp.649-707, 1987
- 11) Robert P. Bosch, Jr.: “A Multigrid Algorithm for Lattice Gases”, MIT, 1993
- 12) Christopher M. Teixeira: “Continuum Limit of Lattice Gas Fluid Dynamics”, MIT, 1993
- 13) 松岡：“ビット演算によるCFDと等価な高精度流体解析手法”，*RIST News* No.64, pp.17-28, 2018
- 14) 松岡：“リカレント型ビット演算による縦渦挙動のマルチスケール創発解析”，*萌芽課題研究 EX21204*, 第13回JHPCNシンポジウム, 2021
- 15) 松岡：“流体解析における時間発展計算のAIサロゲートモデルの追求”，*SENAC* Vol.55 No.1, pp.15-28, 2022
- 16) 大木, 菊池, 松岡, 菊池, 板倉, 廣川, 西川, 岩沢, 浅野, 斎藤, 緒方：“人工的な仮定を極力排除した物理モデルに基づく非熱流体シミュレーションコードの開発”，*地球シミュレータ産業戦略利用プログラム*, pp.89-99, 平成26年度利用成果報告書, 2014
- 17) 松岡, 峯尾, 横川, 瀧塚, 伊賀崎, 渡辺, 板倉, 福田, 菊池, 小林, 江川, 竹村, 菊池, 東田, 青柳, 高見, 小林：“計測融合オペレーション実現のための大規模計算機空気冷却風速場の実時間解析”，11-MD05, *JHPCN最終報告書*, 2012年5月
- 18) Daniel H. Rothman: “Negative-Viscosity Lattice Gases”, *Journal of Statistical Physics*, Vol.56, Nos. 3/4, 1989
- 19) Rudy Raymond, 今道：“最先端の量子コンピュータ「IBM-Q」”，pp.50-59, *ProVision* No.92, 2017
- 20) 松岡：“格子ガス法流体解析モデルとニューラルネットワークの融合”，*SENAC* Vol.54 No.1, pp.39-49, 2021

# 代替燃料船ガイドラインC部「アンモニアを燃料として使用する船舶の安全に関するガイドライン」について

技術本部 技術部

## 1. はじめに

近年、国際海運の分野では、大気汚染防止、地球温暖化防止の規制が強化される中、次世代の船舶燃料として、石油燃料に代わり地球に優しい燃料といわれる代替燃料の利用の検討が活発に行われている。現在、SO<sub>x</sub>及びNO<sub>x</sub>規制への対応のため、LNG、LPG、メタノール/エタノールなどを燃料として使用する船舶の導入が進められている。燃料油を使用する船舶がこれらの燃料を使用することによりCO<sub>2</sub>の排出量を10%から20%削減することが可能であるが、さらにGHG排出ゼロを実現すべく、炭素を含まないアンモニアや水素の燃料としての使用が期待されている。アンモニアを貨物として運送する船舶では、アンモニアを適切な状態で運搬するための貯蔵設備やプロセス設備が装備されている。また、冷凍船ではアンモニアを冷媒として利用している設備の実績もある。このようにアンモニアは燃料として使用されていないものの、船舶の分野では取り扱われている物質といえる。また、アンモニアは水素に比べてエネルギー密度が高いことや液化し易い特性もあり、船舶における脱炭素燃料として注目されている。アンモニアを燃料とする船舶は、各国で開発が行われており、2024年頃から就航することが見込まれている。将来の外航船も含めたアンモニア燃料船の普及のため、シンガポール等の主要な港ではアンモニア燃料供給船の開発計画が進められている。将来の国際航海に従事する船舶へのアンモニア燃料の使用に向けた準備が着々と進められている中で、アンモニアを燃料として使用するための国際的な規則は制定されていない。特にアンモニアは非常に強い毒性を持ち、微量でも人体に触れると重大な危害を及ぼす危険性があるため、十分な安全対策が求められる。本会は、アンモニア燃料船の開発に貢献するため、アンモニアを燃料として使用する船舶の安全性を確保するために求められる要件を「代替燃料船ガイドライン」C部にとりまとめた。

本報告は、同ガイドラインにおけるアンモニア燃料船に求められる安全要件の概要について説明するものである。

## 2. アンモニア燃料船開発の現状

### 2.1 アンモニア燃料船開発の背景

船舶からのCO<sub>2</sub>排出削減のための規制となるMARPOL条約 附属書VIの関連規則は2013年1月1日から施行されており、現在、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）が導入されている。

また、2018年4月のIMO MEPC72においてGHG削減戦略が採択され、GHG排出削減のための短期対策として、2030年までに国際海運全体の輸送効率を2008年比で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、EEXI規制及び燃費実績（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、現在燃費実績格付け制度を実施するために関連するガイドラインの作成が行われている。また、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%改善及びGHG排出量を50%削減すること、長期削減目標として今世紀中にGHGは排出量をゼロとすることが掲げられている。これらの目標を達成するための中・長期対策として、燃料油に対する課金制度や排出量取引制度なども検討されている。

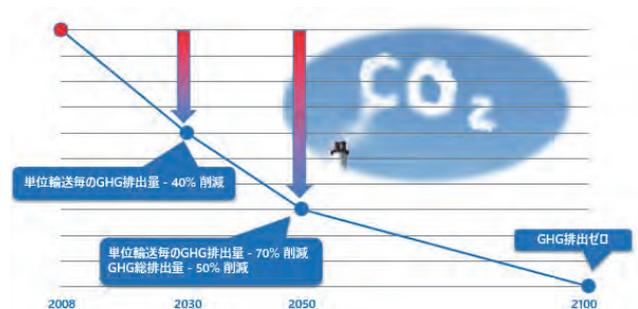


図1 国際海運の輸送量毎の船舶のCO<sub>2</sub>排出量削減量

一方、2015年に採択されたパリ協定では、世界の平均気温上昇を産業革命以前から2℃以内に抑え、1.5℃に抑える努力目標が盛り込まれた。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）では、気温上昇を1.5℃に抑えるためには、2050年までにGHG排出量

を実質ゼロに抑える必要があるとされており、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ため、IMO GHG削減戦略の見直し作業を行うことが合意されている。

上記を背景に、燃焼時にCO<sub>2</sub>を排出しないアンモニアはGHGの排出を大幅に削減できる燃料として注目されている。アンモニアは、陸上では肥料及び工業用に原料として一般に使用されているため、製造、輸送、貯蔵というサプライチェーンの各段階で既存技術を活用することが可能である。また、アンモニアは製造プロセスやCO<sub>2</sub>の抑制制度合いに応じて、グリーンアンモニア（再生可能エネルギーから製造されたアンモニア）、ブルーアンモニア（天然ガスや石炭を原料として、製造段階で生じるCO<sub>2</sub>をカーボンリサイクルやCCSにより回収したアンモニア）、グレーアンモニア（天然ガスや石炭を原料としたアンモニア）などに分類される。現在、主流のアンモニアは、グレーアンモニアであり、安価に入手可能であるが、製造時にCO<sub>2</sub>を排出するため、今後、グリーンアンモニアやブルーアンモニア等の製造も期待される。

このように、船舶からのCO<sub>2</sub>排出量の大幅な低減が可能であることに加え、アンモニアのサプライチェーンが世界中に構築されていることから、代替燃料として有力な選択肢となりえるものとしてアンモニア燃料船の開発が活発に検討されている。

## 2.2 アンモニア燃料船の開発状況

世界におけるアンモニア燃料船の取り組みとして、造船所、エンジンメーカーなどが開発するアンモニアを燃料として使用するバルクキャリアやコンテナ船などに対して、複数の船級から基本設計承認（AiP）が発行されている。

アンモニア燃料船を実現するためには、エンジンの開発が必須であるが、2024年にMAN社から2ストロークエンジンの初号機を出荷する計画が発表されている。また、アンモニア燃料船の実建造のプロジェクトとして、2024年にWartila社の4ストロークエンジンを搭載したアンモニア燃料油タンカーを就航する開発計画が発表されている。

日本国内においても、実建造プロジェクトとして、2024年就航予定の株式会社IHI原動機が開発する4ストロークエンジンを搭載するアンモニア燃料塔グボート、2026年就航予定の株式会社ジャパンエンジンコーポレーションが開発する2ストロークエンジンを搭載するアンモニア燃料塔アンモニア輸送船、及び上述のMAN社の開発する2ストロークエンジンを搭載するアンモニア燃料塔バルクキャリアなどの開発が発表されている。



図2 アンモニア燃料塔アンモニア輸送船

## 2.3 アンモニア燃料供給システム

アンモニア燃料船に採用される燃料供給システムは次の2種類に大別される。

- (1) 高圧の2ストロークエンジンに燃料を供給するシステム（図3参照）：液化アンモニアを所定の温度圧力で循環させながら、機関に必要な量の燃料を供給する。

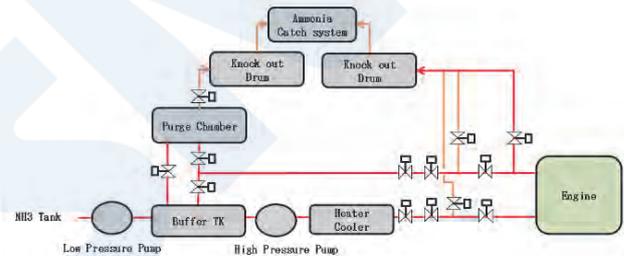


図3 2ストロークエンジンの燃料供給システム

- (2) 低圧の4ストローク機関に燃料を供給するシステム（図4参照）：液化アンモニアをガス化し、所定の温度圧力で機関に供給する。

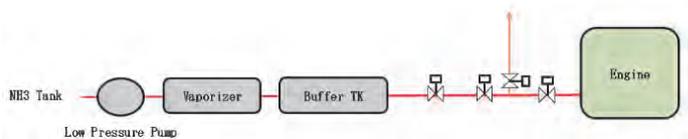


図4 4ストロークエンジンの燃料供給システム

## 2.4 ガス塔き機関の種類と特徴

現在検討されているアンモニア塔き機関としては、以下の2種類がある。

- (1) 低圧式4ストローク二元燃料機関

低圧式4ストローク二元燃料機関では、機関の給気にガス燃料を混合して圧縮した後、パイロット油で希薄混合気を着火する予混合希薄燃焼方式が採用される。給気にガスを予混合するため、供給ガス圧力が比較的低いといった利点があるが、アンモニアスリップと呼ばれる微量の未燃ガスの排出があること、

また異常燃焼であるノッキングが発生する可能性があります，これらの影響を低減させる制御等が求められる。(図5参照)

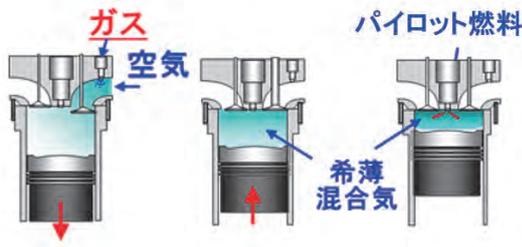


図5 4ストローク二元燃料機関の燃焼方式

## (2) 高圧式2ストローク二元燃料機関

高圧式2ストローク二元燃料機関では，掃気工程が終了し，圧縮した空気に直接アンモニア燃料を噴射し，パイロット油で着火させる油焚きディーゼルエンジンと同様の拡散燃焼方式である。アンモニアスリップやノッキングが生じず，比較的安定燃焼が得られるという利点があるが，約8barの液体状態の高圧アンモニアを機関に供給するため，船内での高圧ガスの取扱いについて安全性を考慮する必要がある。(図6参照)

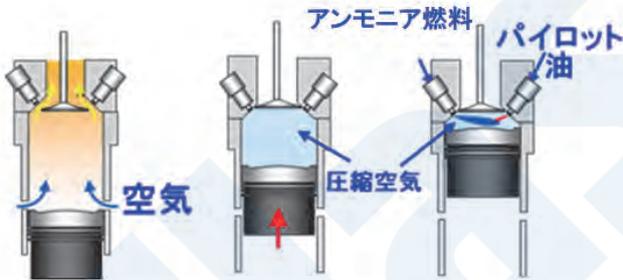


図6 2ストローク二元燃料機関の燃焼方式

## 2.5 アンモニア燃料タンク

アンモニア運搬船の貨物タンクは，IGC Codeで規定される独立型タンクの実績があり，アンモニア燃料タンクも同様と考えられる。アンモニア燃料タンクの種類と特徴を表1に，アンモニアの液化方式に応じた貨物タンクの特徴を表2に示す。

常温加圧式（アンモニアに圧力をかけて液体状態で運送する方式）及びセミレフ式（アンモニアを冷却しつつも圧力をかけ液化状態で運送する方式）のアンモニア貨物のタンクとして用いられる独立型タンクType Cは，圧力容器の構造をしており，高圧化が可能であること，二次防壁が不要であることから比較的シンプルな構造や設備となる利点があるが，円筒形であるため船内の区画に設置する場合，周り

にデッドスペースが多く生じることになる。特に大型の貨物船で大型のアンモニア燃料タンクを船内の区画に設置する場合，貨物の積載量や船のサイズへの影響を可能な限り抑えるため，フルレフ式（アンモニアを大気圧における飽和温度状態で運送する方式）のアンモニア貨物タンクで用いられる方形型の独立型タンクType A及びType Bの採用も今後検討されるものと考えられる。

表1 アンモニア燃料タンクの種類と特徴

種類	独立型 Type A	独立型 Type B	独立型 Type C
形状			
設計蒸気圧	<0.07MPa	<0.07MPa	~数MPa (高圧化可能)
ガス運搬船実績	中型~大型 LPG船	大型LNG船	小型LPG船 小型LNG船
ガス燃料船実績	なし	なし(検討中)	有り
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>船内スペースの有効な利用(方形タンク)</li> <li>二重構造(完全二次防壁)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>船内スペースの有効な利用(方形タンク)</li> <li>詳細な疲労解析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>シンプルな設計・構造(圧力容器)</li> <li>高い操作性(圧力の自由度)</li> </ul>

表2 一般的なアンモニア貨物タンクの仕様

	常温加圧式	セミレフ式	フルレフ式
タンクタイプ	Type C	Type C	Type A, Type B
設計温度	0°C	約-50°C/LPG運送の為 -33°C@大気圧/NH3の飽和蒸気温度	約-50°C/LPG運送の為 -33°C@大気圧/NH3の飽和蒸気温度
設計圧力	約1.8MPa 45°CにおけるNH3の飽和蒸気圧	0.65MPa~0.85MPa	0.025MPa 0.045MPa(in harbor)
タンク容量	~800m <sup>3</sup>	3,000m <sup>3</sup> ~4,000m <sup>3</sup>	---
材料	KD500	KL37-M	KL33, KL27

## 3. 代替燃料船ガイドラインC部

### 3.1 概要

2021年8月，本会は，代替燃料船ガイドラインC部“アンモニアを燃料として使用する船舶の安全に関するガイドライン”を発行した。本ガイドラインC-1部では，液化ガス運搬船以外の船舶でアンモニアを燃料として使用する場合の安全に関する要件を規定し，本ガイドラインC-2部では液化ガス運搬船でアンモニアを燃料として使用する場合の安全に関する要件を規定している。

### 3.2 ガイドライン策定プロセス

アンモニアを燃料として使用する船舶の安全に関するガイドラインは，以下の3つのステップにより策定した。

**Step1** アンモニアの物性を調査し，従来の油燃料及び液化ガス燃料とのGAP解析を実施した。

**Step2** 代替燃料船ガイドラインC-1部ではIGF

Code, 代替燃料船ガイドラインC-2部ではIGC Code16章で規定されるメタンを燃料とした船舶の規定を基に, Step1の調査結果を考慮して, アンモニアを燃料として使用する船舶が, メタンを燃料として使用する船舶と同等の安全性を確保するために必要と考えられる安全要件を纏めた。

なお, IGF Codeでは液化ガス燃料のメタンを燃料として使用する際の詳細要件が規定されていることから, 同様に液化ガスであるアンモニアを燃料として使用するための要件のベースとした。

更に, アンモニアはメタンに比べ, 可燃性・爆発性のリスクは低いものの, 毒性のリスクが高いなど, アンモニアを燃料として使用する船舶において特別な考慮が必要となる事項を洗い出した。

Step3 次に掲げる既存の規則及びガイドラインを調査し, 必要に応じて安全要件に反映した。

- IGF Code : 液化ガス (メタン) を燃料として使用するための要件
- IGC Code : アンモニアを貨物として輸送するための要件
- IBC Code : アンモニア水を貨物として輸送するための要件
- 冷蔵設備規則 : アンモニアを冷媒として使用するための要件
- 代替燃料船ガイドラインA部「メタノール/エタノール燃料船の安全に関するガイドライン」: 毒性燃料に関する要件
- 代替燃料船ガイドラインB部「LPGを燃料として使用する船舶の安全に関するガイドライン」: 液化ガス燃料の使用に関する要件

### 3.3 代替燃料船ガイドラインC部のコンセプト

#### 3.3.1 液化ガス燃料の安全対策の基本方針

液化ガス燃料の一般的な安全対策の基本方針として, IGF Codeの根底にある考え方を分析し, 燃料の存在の有無を基に4つのエリアに分類した。

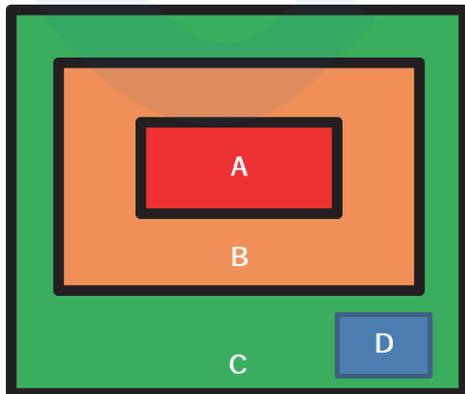


図7 液化ガス燃料の存在の有無を基にした分類

Aのエリアは常に燃料が存在するエリア (例: 燃料タンクや配管装置等) であり, ガス燃料を安全に内部に格納することが求められ, 設備の健全性の確保や外部損傷からの隔離などの対応が必要となる。このエリアは, 人が立ち入れないエリアである。

Bのエリアは通常は燃料が存在しないが, 漏洩した際に燃料が存在するエリア (例: タンクコネクションスペース, 燃料調整室, 二重管及びダクト等) であり, 燃料漏洩の影響の最小化のため, 漏洩ガスの検知, 燃料供給の遮断, 漏洩燃料の保持・除去及び被害の最小化の対応が求められる。このエリアは, 業務上必要な場合に人が立ち入ることができるエリアである。

Cのエリアは燃料を存在させないエリアであり, エリアAからは2つの境界, エリアBからは1つの境界で隔離する必要がある。なお, 物理的な隔離ができない場合は, 距離により隔離する必要がある。

DのエリアはCのエリアの中でも特に燃料を存在させない考慮が必要なエリア (例: 居住区) であり, エリアBと直接接しないようにすることが必要となる。

これらのエリアにおいて, 特にアンモニアの物性で考慮が必要な事項は, Aのエリアは腐食性, Bのエリアは可燃性及び毒性となる。

#### 3.3.2 アンモニアの特性を考慮した安全対策の基本方針

代替燃料船ガイドラインC部の作成プロセスStep1のGAP解析にて得られたメタンとアンモニアの物性の違いを表3に示す。

表3 アンモニアとメタンの物性値比較

	アンモニア	メタン
標準沸点 (°C)	-33.4	-161.5
液体密度 (kg/l) @沸点	0.6819	0.4226
ガス密度 (kg/m <sup>3</sup> ) (0°C, 1atm)	0.7714	0.7175
気化熱 (kJ/kg)	1368.1	510.4
下限可燃範囲 (% vol)	15	5
上限爆轟範囲 (% vol)	28	15
最小着火エネルギー (mJ) 空气中	680	0.3
空気中における層流燃焼速度 (cm/s)	13	40
消炎距離 (cm) (Groveの方法)	22.1	3.53
低位発熱量 (MJ/kg)	18.6	50.01
自己発火温度 (°C)	651	595
毒性	あり	なし
腐食性	あり	なし

	アンモニア	メタン
応力腐食割れ	あり	なし
水溶性@20°C	531 (g/l)	36.7 (ml/l)

これらのGap解析から得られたアンモニアの危険性として考慮すべき事項を以下に示す。

● 毒性（健康被害）

アンモニアが人に与える代表的な影響として、急性毒性、皮膚腐食性、目に対する重篤な損傷性、呼吸器感作性などがある。アンモニアの濃度に対して、人に与える影響は、表4に示す通りである。

表4 アンモニア濃度と人に与える影響

アンモニア濃度 (ppm)	人体に与える影響
5~10	臭気を感じる
50	不快感を覚える
100	刺激を感じる
200~300	目やのどを刺激する
300~500	短時間(20分~60分) 耐え得る限界
2,500~5,000	短時間(30分くらい)で生命危険
5,000~10,000	呼吸停止, 短時間で死亡

● 腐食性

銅、銅合金、水銀、亜鉛及びカドミウムに対して腐食性がある。

● 応力腐食割れ

炭素マンガン鋼、ニッケル鋼では応力腐食割れを引き起こす性質がある。

● 微燃性

爆発下限界は15%程度で、既存燃料の爆発下限界（1~6%）と比較して高く、最小着火エネルギーは8mJ~680mJで、メタン（0.274mJ）と比較して高いため、メタンなどの既存燃料と比較して燃えにくいものと考えられる。しかし、半閉鎖及び閉鎖場所などでは可燃性混合気を生じる可能性があり、当該場所においては火災・爆発を生じる可能性がある。

● 火災の際の危険性

アンモニアは、燃焼の継続性に疑義がある。また、アンモニアが燃焼しても発熱量が既存の燃料と比較して小さいことから、アンモニア火災による設備への影響は低いものと考えられる。

上記のアンモニアの特性として考慮すべき事項として、A) 毒性、B) 可燃性、C) 腐食性に分類し、それらに関わる安全対策の基本方針を以下に示す。

A) 毒性

アンモニアは少量であっても人に重大な影響を及ぼすことから、新たに毒性危険場所を設定し、アンモニア放出及び漏洩時の安全要件を以下の通り規定した。

A-1) アンモニアの隔離

アンモニアが存在する場所（エリアA及びB）とアンモニアを存在させてはいけない場所（エリアC及びD）の間に、物理的な囲壁などによる隔離要件や、物理的な囲壁を設けられない開放甲板上などについては、距離の規定を設けた。

A-2) 漏洩アンモニアの制御

エリアBにおいて、アンモニアが漏洩した場合、アンモニアを迅速に検知し、漏洩した箇所へのアンモニア燃料供給を遮断し、漏洩したアンモニアを区画から除去する要件を規定した。なお、船内への漏洩や燃料タンクの圧力逃し弁からのベント排出等の緊急時における液化ガス放出については、IGF Code及びIGC Codeと同様に特に規制を設けていない。

A-3) 人へのアンモニア曝露の対応

人とアンモニアの接触を防止するため、異常時にアンモニアが存在する可能性がある場所（エリアB）では、アンモニアが検知されていないことを確認すること、仮にアンモニアが検知された場合も、適切な保護具を装着することによりアクセスを可能とした。また、人とアンモニアが接触した場合において、その影響を軽減するための処置を設けることを規定した。

A-4) 安全なオペレーションの確保

緊急時にアンモニアが大気に放出された場合においても、船舶の安全のための最低限の運航が疎外されないよう、船舶の操船、推進のために必要な場所、並びに、消火活動及び避難行動などの非常時のオペレーションを行う場所は、安全な場所に配置することを規定した。

B) 可燃性

アンモニアは、爆発下限界や最少着火エネルギーが高いことから、他の燃料と比較して着火しにくいという。また、旧IGC Codeでは“閉鎖された区画内でのアンモニアの濃度が高くなると引火性となりえるため、引火性貨物に関する10章の規定は、開放甲板上の区域を除き適用しなければならない”と規定されていた。これらを踏まえ、開放甲板上には引火性の危険場所の規定を設けず、防熱等の要件をメタン燃料の要件と比較して軽減した。

C) 腐食性

アンモニアは特定の材料に腐食性を有し、炭素マンガン鋼及びニッケル鋼では応力腐食割れが発生する危険性を有することから、IGC Code17章のアンモニアの特別要件を基に関連の要件を規定した。

### 3.3.3 アンモニアの放出に関する基本方針

アンモニアの放出が想定されるシナリオとして緊急時と通常時に分けて、それぞれの取り扱いを以下に示す。

#### (1) 緊急時

以下に掲げる事象は緊急時として扱い、アンモニアの大気や海洋への放出が可能としている。

① アンモニア燃料を保持することで、最悪の事象が生じる恐れのある場合

(例) アンモニア燃料タンク周囲の火災により、タンク内の圧力上昇が生じ、圧力逃がし弁が作動する場合

② アンモニア燃料を保持することが不可能な事象

(例1) 閉鎖及び半閉鎖場所内において、配管装置などが損傷し、漏洩した区画からアンモニアを除去する場合

(例2) バンカリングステーションなどにおいて、漏洩アンモニアを水噴霧装置により水に吸着させ海洋に放出する場合

#### (2) 通常時

通常の実運用では、アンモニアが存在する場所（エリアA：タンク、配管装置など）からの高濃度のアンモニアを船外へ放出することはできない。

(例1) アンモニア燃料供給装置、バンカリングラインのパージ及びガスフリー

(例2) 入渠時や出渠時のタンク及び配管のガスフリー

## 3.4 代替燃料船ガイドラインC部の主な要件

### 3.4.1 機能要件 (C-1部 3章)

代替燃料船ガイドラインC-1部では、IGF Codeと同様に基本概念としてGoal based approachを用いて、目的（Goal）と機能要件（Functional requirement）を規定することにより、設計、建造及びオペレーションの指針を与える構成となっている。代替燃料船ガイドラインC-1部3章では、本ガイドライン全体の目的と機能要件を規定しており、目的を「アンモニア燃料を使用する推進機関、補機発電機関及び／又は他の目的に使用する機関を搭載する船舶に対し、安全で環境に配慮したシステムの設計、構造及び運用を提供すること」としている。また機能要件として19項目が挙げられている。主な機能要件を以下に挙げる。

- ・ 従来船（油焚機関）と同等の安全性及び信頼性を確保すること
- ・ アンモニア燃料の使用に関わる危険を最小化すること
- ・ 燃料装置の単一故障に対し十分な安全性を確保

すること

- ・ 危険場所を最小化すること
- ・ 燃料の予期せぬ蓄積を回避すること
- ・ 安全上必要な場合以外は燃料放出しないこと
- ・ 燃料の毒性による人への健康被害を最小化すること

### 3.4.2 リスク評価 (C-1部 4章)

アンモニア燃料船の設計においては、乗客乗員、環境又は船体への有害な影響を排除又は低減するためにリスク評価を実施することが要求される。リスク評価の実施範囲は、IGF Codeの天然ガス燃料を使用する船舶のように限定されておらず、アンモニア燃料の使用に関係する箇所すべてを対象としている。

### 3.4.3 ガス安全機関区域の配置 (C-1部 5, 9, 10章)

IGF Codeでは、ガス安全機関区域に加え、ESD保護機関区域の概念が導入されているが、アンモニアは少量でも人に甚大な影響を及ぼすため、単一の故障が機関区域内へのガス燃料の放出の原因となりえるESD保護機関区域は認められないものとした。

なお、ガス安全機関区域は、正常状態のみならず異常状態においてもガス安全とみなされる機関区域と規定され、単一の故障が機関区域内へのガス燃料の漏洩を引き起こすことがないように、機関区域内のアンモニア燃料配管は二重管として配置する必要がある。

### 3.4.4 材料の配置 (C-1部 7章)

アンモニアの腐食性を考慮して、通常の使用状態において燃料にさらされる可能性のある材料には、水銀、銅及び銅合金、亜鉛の使用を禁止した。今後、カドミウムも追加する予定である。

また、アンモニアには、炭素マンガン鋼又はニッケル鋼のタンク及び配管装置に応力腐食割れを引き起こす可能性があるため、IGC Code 17.12のアンモニアの特別要件を基に、対策を追加した。主な要件としては以下の通りである。

- ・ 燃料タンク、その他圧力容器及び配管装置などに、炭素マンガン鋼を用いる場合、規格最小降伏点  $\leq 355 \text{ N/mm}^2$  及び実際の降伏値  $\leq 440 \text{ N/mm}^2$  とした上で、以下の①から④のいずれかの要件を満たす必要がある。
  - ① 規格最小引張強さ  $< 410 \text{ N/mm}^2$
  - ② 熱処理による溶接残留応力除去
  - ③ 運送温度  $-33^\circ\text{C}$ （いかなる場合も  $-20^\circ\text{C}$  未満）
  - ④ 水分を0.1%以上含むアンモニアのみを積載する
- ・ 上記の降伏点を超える高降伏点の材料を使用す

る場合、熱処理による溶接残留応力除去が要求される。

- ・ プロセス用圧力容器及び管などに用いる炭素マンガング鋼、ニッケル鋼は、溶接残留応力除去のための熱処理が要求される。
- ・ 5%を超えるニッケルを含有するニッケル鋼の仕様は禁止されている。なお、5%ニッケル鋼のニッケル含有量は、鋼船規則K編上、4.75%～6.00%とされており、本ガイドラインで使用可能な範囲は、4.75%～5.00%までとなる

### 3.4.5 燃料の補給 (C部 8章)

アンモニアの毒性は少量でも人に甚大な影響を与えるため、開放甲板上のアンモニア燃料の供給配管装置は二次的な囲壁で囲うこととしている。ただし、アンモニア燃料のバンカリング配管については、バンカリング時以外はガスフリーされ、アンモニアが配管内に存在する頻度が少ないため、二次的な囲壁で覆うことは要求されない。(単管での配置が可能となる。)

また、バンカリングステーションの接続部は、過大な荷重によるバンカリングホースの破断などを防止するため、BAC (Break Away Coupling) やERC (Emergency Release Coupling) により安全に切り離しが可能なものとする必要がある。本切り離し装置の起動時、各カップリングに残留する少量の燃料が飛散し、人と接触するリスクを低減するため、バンカリングステーションには水噴霧装置の設置が要求される。

### 3.4.6 危険場所 (C-1部 12章)

アンモニアはLELや最少着火エネルギーが大きいことから、開放甲板上では火災及び爆発性の雰囲気を生じる危険性は低いとされている。そのため、開放甲板上に引火性危険場所を設定していない。ただし、閉鎖及び半閉鎖場所に対しては、可燃性の雰囲気を生じる危険性があることから、従来のIGC Code及びIGF Codeと同様に危険場所を設定した。現ガイドラインC部 (Ver1.1) では、危険場所を引火性の危険場所と毒性の危険場所に分けているが、今後、IGC Codeと同様に、引火性危険場所の中に毒性危険場所が含まれるように変更する予定である。

### 3.4.7 火災安全 (C部 11章)

#### (1) 開放甲板上

アンモニア燃料タンクは、外部火災による入熱に対して冷却及び防火により保護するため、開放甲板上に設置された燃料タンクの暴露部を水噴霧装置で覆わなければならない。

また、上述の通り開放甲板上では、アンモニア由来の火災や爆発の雰囲気は生じないものとして整理

した。そのため、IGF Codeで要求される、燃料タンクの火災から保護すべき箇所 (居住区域等) への水噴霧装置の設置は要求されない。

#### (2) 開放甲板下

閉鎖及び半閉鎖場所については、アンモニアの火災及び爆発の危険性があるため、アンモニア燃料格納設備は、A類機関区域及び火災の危険性が高い区画から、以下の方法により保護する必要がある。

- ・ A-60級防熱の施工
- ・ 900mm以上の長さをもつコファダムにより隔離 (独立型タンクTypeCの場合、A類機関区域や火災の危険性が高い区画の直上に配置されなければ、燃料貯蔵ホールスペースをコファダムとみなしてよい)

### 3.4.8 毒性への対策 (C部 6, 12, 13, 14章)

毒性危険場所も引火性危険場所と同様に、閉鎖及び半閉鎖場所に設定し、開放甲板上には設定していない。一方、開放甲板上における毒性に対する安全対策として、アンモニアが放出する可能性がある場所と人が通常いる場所、非危険場所の開口、非危険場所の通風装置の出入り口などの保護すべき箇所との隔離すべき距離の要件を以下の通り明確化した。

#### ① ベントポスト

ベント出口の高さ:

- ・ 暴露甲板上からB'3又は6mの大きい方以上
- ・ 作業区域及び歩廊上から6m以上

ベント出口の隔離距離

- ・ 非危険場所の空気取入口/出口及び開口からB又は25mのうちいずれか小さい方以上

#### ② 通風装置の排気口:

閉塞された危険場所の通風装置の排気口の高さ

- ・ 暴露甲板、作業区域及び歩廊から4m以上

閉塞された危険場所の通風装置の排気口の隔離距離

- ・ 非危険場所の空気取入口/出口及び開口の場所から10m以上

#### ③ 保護すべき場所:

以下の(A)から(C)に掲げる保護すべき場所は、(a)から(d)に掲げるアンモニアが放出する可能性がある場所ごとに規定される隔離距離をとって離す必要がある。

保護すべき箇所:

(A) 非危険場所の吸排気口及び開口

(B) 居住区、制御場所、電気機器室などの常時人がいる区画の脱出経路

(C) 救命艇

アンモニアが放出する可能性がある場所と隔離距離:

(a) 燃料タンク排気口、ガス又は蒸気の排気口、バ

ンカーマニホールド弁, その他の燃料弁, 燃料管フランジ, 燃料調整室の通風排気口及び温度変化により生じる, 燃料タンク内圧力を調整するために少量のガス又は蒸気を放出する燃料タンク排気開口から球形4.5m (3m+1.5m) の距離

- (b) 燃料調整室の入口, 燃料調整室の吸気口及び燃料が漏洩する可能性のある場所のその他の開口から球形3.0m (1.5m+1.5m) の距離
- (c) 燃料バンカーマニホールド弁に設けられた燃料漏れ保護用コーミングの周囲4.5m (3m+1.5m), 高さ3.9m (2.4m+1.5m) の距離
- (d) TypeCタンクを除き, 燃料格納設備の外表面が暴露している場合, その外表面から3.9m (2.4m+1.5m) の距離

### 3.4.9 通風装置 (C部 13章)

ガスが滞留する可能性のある以下の区画には通風装置の設置が要求される。

- ・ タンクコネクションスペース
- ・ 燃料調整室
- ・ 二重管及びダクト

これら区画の通風装置は, 火花を発しない構造の排気式機械通風装置とする必要があり, 毎時30回以上の換気能力が要求される。なお, アンモニア関連装置の設置区画であって, 運航中に人が立ち入る区画には, 漏洩アンモニアを迅速に除去できるように以下を満たす追加の通風装置が要求される。

- ・ 少なくとも毎時45回以上の換気ができる容量を持つこと (通常時の毎時30回の換気容量を含めてよい)
- ・ 設置区画のアンモニアガス濃度が3,000ppmを超えて検知された場合に, 自動始動すること

バンカリングステーションは, 自然通風が十分に行われる開放甲板上に配置されない場合, リスク評価を実施し, その安全性を評価しなければならない。その際, 特に燃料補給作業中にガスが漏洩するリスクを考慮し, 適切な機械式通風装置の設置要否についても検討しなければならない。

また, アンモニアが漏洩する可能性がある区画の通風装置は, 他の区域用の通風装置から独立したものとし, 常に人がいる場所の空気取入口及び排気口には閉鎖装置を設ける必要がある。

### 3.4.10 アンモニア燃料供給の自動遮断 (C部 15章)

アンモニア燃料漏洩や通風装置停止などの異常な状態が発生した場合の安全装置として, 機関区域内への燃料供給を停止するための自動遮断弁 (マスタ弁) を設けること, 及びガス燃料を使用する各機関

の異常が発生した場合, その機関へのガス燃料供給を停止するためのダブルブロック・ブリード弁を機関毎に設ける必要がある。区画内で漏洩したアンモニアを検知したときの濃度設定値は, 人体への影響を考慮して, 25ppmで警報, 300ppmでマスタ弁及びダブルブロックブリード弁を遮断させることとした。

### 3.5 今後の審議・開発

アンモニアを燃料として使用する船舶の要件の策定に向けた国際的な審議として, IMOでは, 2021年9月, EU27加盟国及びECにより, 貨物運送小委員会 (CCC) 7にアンモニアの安全要件策定を提案する文書 (CCC7/3/9) が提出された。また, 2021年10月, 日本政府より, 海上安全委員会 (MSC) 104に, アンモニアを燃料として使用する船舶に対するガイドラインの策定作業が提案された。両委員会では 時間の制約上, 提案に関する審議は行われず, 次回のMSC 105 (2022年4月) で審議, 承認されれば, CCC 8小委員会 (2022年9月) から具体的なアンモニア燃料船の安全要件の検討が開始される見込みである。

本会としては, 昨今のアンモニア燃料船開発の要望に寄与するため, 安全要件をまとめたガイドラインを発行した。今後, 本ガイドラインの策定に伴い得られた調査検討結果等を活かして国際規則策定の議論に貢献すると共に, IMOにおける最新の審議状況及び新技術の急速な発展を考慮して定期的に見直し, 開発者に有用なガイドラインの策定に取り組む所存である。

# 鋼船規則C編の変遷と全面改正の概要

石橋 公也\*

## 1. はじめに

本会の技術規則である鋼船規則C編は、コンテナ船、鉱石運搬船、液化ガス運搬船等、CSR（IACS共通構造規則）適用船を除く船舶に対する船体構造及び艤装に関する要件が定められており、本会の約100年間に渡る船級業務で培った船体構造に関する技術や経験が集約された規則である。

本会は、2017年から5年間の中期経営計画の中で5つの基本戦略を策定し、その戦略の一つである「研究開発活動の推進」に対応した形で、鋼船規則C編の全面改正作業を進めることになった。

本改正作業を進めるにあたり、新たな構造強度規則を開発するために必要となる要素技術である荷重、腐食、降伏、座屈及び疲労等の研究開発を行うため、大学、研究所と連携した多くの共同研究プロジェクトを立ち上げた。また、造船所及び船社に所属する若手技術者にも本プロジェクトに参画いただくことにより、膨大な作業が必要となる研究開発、規則開発、影響評価の作業を同時に進める体制を構築した。2019年には、本会が開催する関連業界の技術者や学識経験者で構成される船体専門委員会において全面改正案に関する本格的な議論が行われ、最終的に、2022年1月に開催された第1回技術委員会にて鋼船規則C編の全面改正が承認された。

本稿では、1921年に初刊行されてからの本会の構造規則の変遷について解説し、これまでの変遷から見た今回の全面改正の位置付けについて言及する。

## 2. 構造強度規則の変遷

### 2.1 鋼船規則の刊行

船級検査の判断基準の拠り所となる鋼船規則は1921年に初めて刊行された。第二次世界大戦後に帝国海事協会から日本海事協会に名称を改め、事業を再スタートした後に初めて刊行された鋼船規則は、その内容が大幅に変更されている。しかしながら、手元にある中で最も古い大正14年（1925年）の鋼船規則（図1参照）の目次を眺めると、現在の鋼船規則C編にその名残が十分にあることが分かる。新

旧規則は共通して、各種部材に関する要件を纏めた章（当時は編）が、ブロック建造法が採用される以前の建造順序に従って並んでおり、これらの章が構造規則の大半を占めている。旧規則では、それらの各部材に関する章の後に、油槽船（タンカー）のための要件を定めた章のみが規定されていた。油槽船は乾舷が小さく相対的に構造に働く荷重が大きくなり、また、縦通隔壁を有するため一般貨物船と構造様式が大きく異なる。当時の規則は、L、B、D等の主要目をパラメタとした実績寸法等に基づく経験式が多く採用されていたため、油槽船には一般貨物船とは異なる算式が必要であった。また、当時、リベット接合も広く使われており、貨物油が漏れないようなリベットの間隔等の要件などが確認できる。

目次	
第一章	総則
第二章	定義
第三章	船体
第四章	鋼材及材料試験
第五章	板等、溶接、溶接材、溶接部材
第六章	船
第七章	中心線内梁等
第八章	二重底
第九章	船
第十章	船
第十一章	船
第十二章	船
第十三章	船内梁等及船体構造
第十四章	船柱、斜設支柱、甲板下設支柱
第十五章	船下甲板
第十六章	船
第十七章	船内梁等試験法
第十八章	外観
第十九章	甲板
第二十章	内装

図1 帝国海事協会鋼船規則（大正14年刊行）

### 2.2 経験式から理論式への移行

過去70年間に渡る構造強度関連の鋼船規則の主な改正を表1に纏めた。ただし、舵、船体艤装品、材料及び溶接関連の改正は割愛した。

1950年代のルールは、防撓材などの単純梁問題として扱える部材については、現在と変わらない寸法要求算式の形となっているが、外板や桁板等の多くの要求算式については、L、B、D等の船の主要目を用いた実績寸法や他船級ルールとの比較（図2参照）から導いた式となっていた。これらの要求算式は、現代に近づくにつれて、適切な荷重モデルと強度モデルに基づいたより合理的な寸法算式に変更されていくことになる（表2参照）。

\* 開発本部 船体開発部

表1 NK構造強度規則の主な改正事項

時期	改正内容
1921年	鋼船規則初版の発行
1949年	日本海事協会として鋼船規則の初発行
1959年	スラミング荷重を考慮した要件の導入
1961年	理論式ベースの外板要求算式の導入
1963年	桁ウェブに関する座屈強度要件の導入
1972年	長期予測に基づく波浪縦曲げモーメントの導入
1973年	31章「ばら積貨物船」の新設 (等価パネルによる相持ち構造評価の導入)
1974年	構造関連の要件を鋼船規則C編として再編成 直接強度計算に基づく強度評価法の導入
1980年	長期予測に基づく波浪圧力を用いた大幅改正
1983年	32章「コンテナ船」の新設
1987年	UR S11 (縦強度) の一部取り入れ
1989年	組み合わせ荷重下の座屈要件の導入
1993年	29A章「ダブルハルトンカー」の新設 (ロンジ波疲労強度要件の導入)
1999年	Bulk Carrier Safety関連要件の導入 (浸水時強度要件等の導入)
2001年	タンカーの構造強度に関するガイドライン発行 (ネット寸法評価, 等価設計波法, 大骨疲労強度評価, 縦曲げ最終強度評価の導入)
2006年	CSR-B編及びCSR-T編の新設
2016年	CSR-B&T編の新設 コンテナ船要件の大幅改正 (ホイッピング荷重を考慮した要件の導入)

1960年代は、タンカーを筆頭に貨物船が急激に大型化した時代であった。これらの貨物船に対して就航船の定期的検査が実施されるような時期となる1972年に発行されたNKの会誌には次のような記述があった。「実際の船舶の損傷例をみると船体縦曲げ応力が高くなったために生じた損傷は極めてまれで、むしろ局所的な船体構造に波浪外力等の力が作用して、応力集中等で座屈または亀裂等の損傷が発生した例が多い」。単純梁の強度モデルで表される縦強度や防撓材の算式であれば、このような大型化に対応できるが、板部材や桁ウェブ部材の板の多くは、実績寸法等に基づく経験式で板厚が定められていたため対応が困難であった。船舶の大型化に伴い容積が広がった貨物倉では相対的に桁部材の強度の重要度が増しており、複雑な不静定構造の応答により発生する変形や応力に、これら経験則に基づく算式は対応できなくなっていた。これに対して、二重底構造等の相持ち構造を等価なパネルに置き換えることで、縦桁と横桁に働くせん断力の分担率を求める手法等、様々な不静定な構造様式に対応した複雑な規則算式がこの時期に多く開発されている。

2.3 長期予測と直接強度計算の登場

1970年代には、現在でも最も重要な強度評価技術が鋼船規則に登場している。その一つは、長期予測に基づく設計荷重の推定技術<sup>4)</sup>である。船体運動や船体に働く圧力を計算することができるストリップ法と、短期予測、長期予測を組み合わせた手法により波浪圧力、波浪中縦曲げモーメント等の就航期間中の最大値を求めることができるようになり、これまでの経験式に代り、より適用性が広く、より合理的な要件とすることが可能となった。

もう一つの重要な技術は、図3に示すような有限要素法による直接強度計算である。相持ち構造や強制変位的に荷重が働くような不静定問題を算式で扱おうとすると、あまりに式が複雑化すること、モデル化の時点でかなりの誤差を生むことが考えられるが、直接強度計算であれば、実構造を適切なビーム要素やシェル要素に置き換えることにより、これまでより遥かに精度の高い評価が可能となる。また、シェル要素であれば、トランスリングのような複雑な形状の桁に発生する局所的な応力も精度よく求めることができる。

船型	L	B	D	d	d/L	船底外板				船側外板			
						助造荷方式	S	t	案	S	t	案	案
凹 1D <sup>h</sup>	44	7.8	3.8	3.4	.0772	T 560	9.46	9.81	10 9.47	560	8.39	8.54	9 8.5 7.86
#	48	8.8	4.2	3.76	.0783	T 540	9.98	9.72	10 9.56	540	8.60	8.47	9 8.57 8.12
#	60	9.7	5.5	4.8	.0800	T 600	11.51	11.40	10 11.34	600	10.02	9.93	10 10.13 9.40
#	62	10.4	5.5	4.85	.0782	T 600	11.69	11.61	11 11.40	600	10.18	10.11	10 10.16 9.55
#	64.5	10.2	5.4	4.75	.0796	T 600	11.82	11.60	10 11.36	600	10.28	10.26	10 10.10 9.74
#	65	10.2	5.4	4.75	.0791	T 600	11.88	11.85	11 11.36	600	10.31	10.30	11 10.13 9.76
#	65	10.4	5.2	4.55	.0703	T 660	12.20	12.45	11.50 12.08	660	10.58	10.85	10.5 10.69 10.14
平 漁 船	66.33	10.5	5.5	4.8	.0724	L 650	10.26	9.68	11 10.32	600	10.54	10.39	11 10.10 9.89
凹 1D <sup>h</sup>	67	10.8	5.7	4.8	.0716	L 650	10.32	9.70	11 10.32	610	10.33	10.51	11 10.26 9.97

図2 NK会誌に掲載された他船級及び実寸法比較表

表2 船底外板の板厚要求式

年代	規則算式
1960年	Lが110m以上のとき $\left\{0.54 + 10.7 \left(\frac{L}{100}\right)\right\} \left\{1 + 0.025 \left(\frac{L}{11} - D_s\right)\right\}$ (mm) D <sub>s</sub> : 船の(強力上の)深さ
1961年	1.44C <sub>d</sub> S√L + 2.5 (mm) C <sub>d</sub> = 1 + 7 $\left(\frac{d}{L} - 0.06\right)$ S : 縦通肋骨心距
1974年	3.64CS $\sqrt{\frac{d + 0.035L'}{1.66 - f_b}} + 2.5$ (mm) C : Lに応じた補正係数1.0~1.07 f <sub>b</sub> : 船底に関する縦強度の使用係数

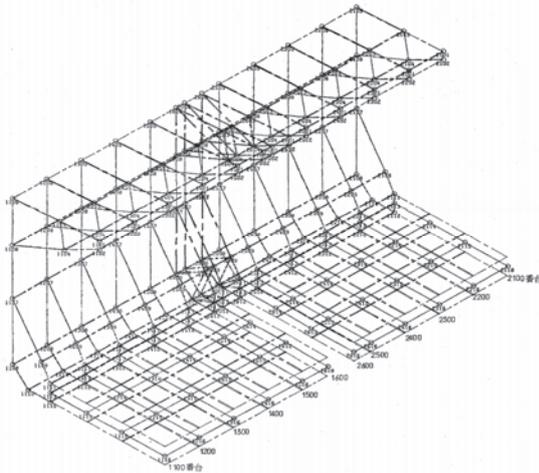


図3 1970年代に作成されたFEモデル

## 2.4 より理論的で合理的なルールへ

上記2つの技術を活用すれば、今回の全面改正の方向性である、より理論的で合理的な規則とすべく規則の開発を一挙に進めることができるように考えられるが、1980年に実施された長期予測に基づく波浪圧力を用いた各要件の改正以降は、大幅な改正が行われていない。90年代以降は、代わってIACS共通ルールであるCSRの制定等、IMO及びIACSの構造安全性に関する対策に関連した改正が多くなっている。

このように規則の開発が進まなかった理由は、様々挙げられるが、以下に示した2つの問題が大きな要因であると考えられる。

問題点の1つは、長期予測法により導かれた荷重値が、比較的大きかったことにあると考える。図4は、1972年に規則改正が行われた縦強度要件に用いる波浪垂直曲げモーメントの技術背景となった長期予測結果である。この当時から船の就航期間中の最大値は、超過確率 $10^{-8}$ レベルに相当することが分かっていたが、避航、減速、変針の影響を考慮して超過確率 $10^{-5}$ レベルに相当するモーメントを導く算式を採用している。当時の縦曲げ応力に対する許容応力は、約 $150\text{N/mm}^2$ （現在は、 $190\text{N/mm}^2$ ）となっていたこともあり、実績寸法に基づいた調整が必要であった。

この頃から、操船や遭遇海象の実態を把握するため、実船計測プロジェクトが実施されたが、得られるデータは、わずか数隻の船舶から得られたものであり、実態の全容を把握することは不可能であった。

もう1つの要因は、長期予測により、それぞれの位置において波浪縦曲げモーメントや圧力、加速度等の最大値が求められるが、それらの荷重の相関が一切分からないことである。船舶の設計には、同時

に発生する複合的な荷重を考慮する必要がある。この問題については、過去に様々な研究<sup>5)~7)</sup>が行われており、本会が発行した「タンカーの構造強度に関するガイドライン」<sup>8)</sup>において初めて採用された等価設計波法にそれらの成果が活かされた。また、この等価設計波法は、その後にCSRにも採用されている。

等価設計波法とは、船体構造応答の長期予測において極めて発生確率レベルの低い値は、非常に限られた特定の短期海象（或いは、特定の波向き、波長の規則波）により生じる特性に着目して、それらの短期海象を再現する波ケースを用いて強度評価を行うというものである。

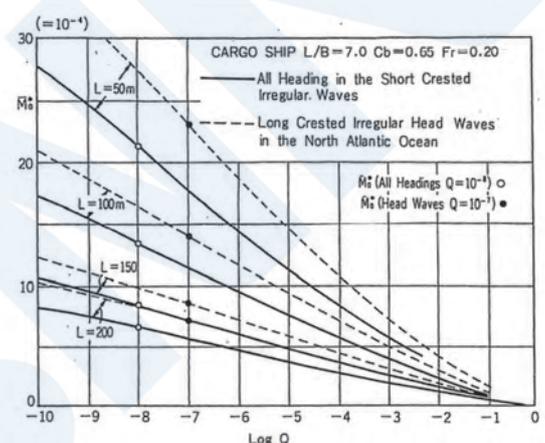


図4 波浪垂直曲げモーメントの長期予測結果

## 3. 新しい鋼船規則C編について

### 3.1 新しい鋼船規則C編の章構成

前2.1.に述べたとおり、現行の鋼船規則C編の章構成は、大正時代から大きく変化していない。主として一般貨物船を対象とした各構造部位に対する要件を規定した章が、規則の大半を占めており、船種別の強度要件がその後に続く。船種ごとの章の下レベルには、船底構造、船側構造等の各構造部位に関する節があるという所謂入れ子構成となっており、規則の読み易さを低下させる一因となっている。

鋼船規則が初めて刊行された時代と異なり、現代では荷重応答の長期予測や等価設計法の技術を用いれば、あらゆる箇所の荷重値や加速度の長期予測値や、それぞれの荷重の同時性を考慮した組み合わせを示すことができるようになっており、また、板及び防撓材の局部強度だけでなく、大骨、桁等の主要支持構造部材についても一般化した強度モデルとして扱えるようになってきているため、構造部位ごとに章を分ける必要性は低下している。

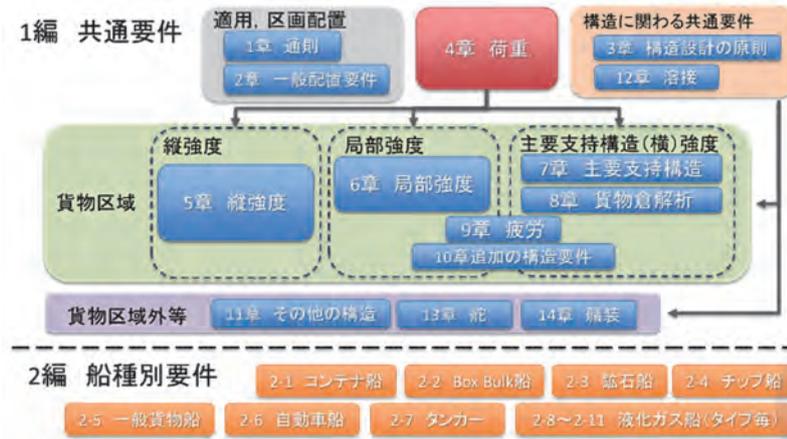


図5 新しい構造強度規則の章構成

このような状況から、規則の読み易さ、CSRに習熟した設計者からの読み易さ等を考慮して、新しい構造強度規則では図5に示す章構成とする。

局部強度、主要支持構造強度、縦強度のような強度上の構造の階層レベルや、荷重、疲労強度のような強度評価のカテゴリに関する章が規則の骨子となっている。また、船種特有の貨物の種類や積付に関する要件、特有の構造に関する追加要件を2編に規定している。

### 3.2 設計荷重

新しい鋼船規則C編の設計荷重に関しては、前2.4で述べた長期予測法と等価設計波コンセプトが引き続きベースとなっており、これらに非線形影響と操船影響を考慮することにより、より現実的な荷重値を導くようになっている。

荷重算式の開発に際しては、2次元ポテンシャル理論より導出される物理的に意味のある式を簡易化することで、より適用性が広く精度の高い推定式<sup>9)</sup> <sup>10)</sup>とした。さらに、現時点で推定精度、信頼性、計算工数のバランスが最もよく、また広く使われている3Dパネル法による船体応答解析、この結果に基づいた短期予測、長期予測のシリーズ計算を実施し、開発した荷重算式の検証・調整を行った。

大波高時の船体没水部の変化等に起因する非線形影響については、水槽実験及び非線形3Dパネル法を用いたシリーズ解析の結果から等価設計波ごとの係数<sup>11)</sup>として求めている。

操船影響については、数万隻のAISより得られた遭遇海象ベースの波浪頻度分布を用いて主要な船体応答の長期予測値を求め、従来から用いられていたIACS Rec.34<sup>12)</sup>に定義される波浪頻度分布表より導かれる長期予測値との比率から係数<sup>13)</sup>を定めている。

これらの係数により、実際の船体構造に働く荷重値を、より精度よく推定し、且つ、実績寸法との乖離の少ない要求寸法を導くことができる。

### 3.3 腐食予備厚及び強度クライテリアの精度向上

前3.2に述べた設計荷重だけではなく、腐食予備厚、降伏、座屈、疲労に関する強度クライテリアについても、より実際の現象に沿った強度評価が行えるよう高精度化することを目指した。

新しい構造強度規則で用いられる腐食予備厚については、就航船検査時に実施される板厚計測から得られる膨大なデータを統計解析することにより、腐食環境に応じた値としている。

CSRでも本手法による腐食予備厚が採用されているが、新しい鋼船規則C編では、統計解析の対象となる板厚計測データを、主に1990年代以降に建造された船舶から集めることにより、検査強化プログラム (ESP) を前提とした近年のメンテナンス品質を腐食予備厚に反映させた。この結果、メンテナンス品質の向上によりバラスタタンクのように腐食量が減少した箇所と、乾貨物船の内底板等の腐食が抑えられない箇所が数値として明確にでている。

降伏、座屈、疲労に関する強度クライテリアについては、より損傷に直結するようなクライテリアとなるよう努めた。例えば、板及び防撓材の面外圧力に関する寸法算式については、長らく初期降伏強度及び剛塑性理論に基づく算式とこれに付随する経験的に定められていた安全率が使われてきた。

今回の開発作業においては、板及び防撓材に対して、様々なレベルの圧力を載荷・除荷する非線形FE解析を実施して、残留変形が残らない強度クライテリアがどこにあるか調査し、そのクライテリアを導くことができる簡易算式を開発<sup>14)</sup> <sup>15)</sup>した。本簡易算式に適切な安全率を加えることで、損傷との対応が明確な寸法要求算式を導いた。

座屈強度評価においては、荷重算式と同様にできる限り物理的に意味のある式を用いつつ、弾性座屈後の崩壊強度を精度よく推定<sup>15)</sup>できるようにした。

また、船体構造のような不静定構造体において、局部的に板パネルが座屈した際の周辺構造への荷重再配分の影響を考慮した要件も一部に取り入れ、より実際の損傷との相関が高い基準とした。

疲労強度評価に関しては、数万隻のAISから得られた航路の情報に基づき、より実際に近い繰り返し荷重の設定<sup>16)</sup>を行っている。また、船全体の疲労損傷発生確率に基づいた安全率を設定する等、実際の損傷事例との相関が明確な要件とした。

#### 4. おわりに

今回の新しい鋼船規則C編のコンセプトは、1970年代の長期予測技術が発展した当時から構想されていた構造強度規則の理想像にかなり近づいたものとなり、その立役者は、AISデータや板厚計測データから得られたビッグデータと言える。

今後、デジタルツイン関連の技術が発達し、普及することにより、船舶の就航中に起きる様々な事象が定量的に計測され、利用できるようになる。また、これまで以上に実遭遇海象や複雑な非線形の構造応答に関する知見が獲得でき、損傷の事故原因究明等が正確に行われることになる。

新しい鋼船規則C編は、実遭遇海象や就航後の船体構造の状態の再現、実際の損傷に基づくクライテリアによる強度評価を目指し、開発を進めてきた。従って、デジタルツイン技術で明らかになった知見を、比較的容易に規則に反映することができ、今後さらに規則の安全性と合理性を向上させることが期待できる。

#### 参考文献

- 1) 日本海事協会：鋼船規則CSR-B&T編，2021
- 2) 日本海事協会：鋼船規則C編，2021
- 3) 日本海事協会：鋼船規則CS編，2021
- 4) 福田淳一：船体応答の統計的予測，日本造船学会耐航性に関するシンポジウム，1969年
- 5) 土岐直二：設計海象の設定法に関する研究（その1）（その2），西部造船会報第89号，（平成6年），pp.191-208，第93号（平成8年），pp.121-133
- 6) 河辺寛他：波浪荷重の長期分布と遭遇海象との関係（第1報波浪荷重の最大値と想定海象），日本造船学会論文集，第186号，pp.319-339，1999
- 7) 重見利幸，朱庭耀：タンカーの主要構造部材に対する設計荷重の実用的設定法に関する研究—第一報 設計海象—，日本造船学会論文集，第191号，pp.195-207，2002
- 8) 日本海事協会：タンカーの構造強度に関するガイドライン，2001
- 9) Kyohei Shinomoto, Sadaoki Matsui et al.: Development of Closed Formula of Wave Load Based upon Long-Term Prediction - Heave Acceleration and Pitch Angle-, ASME 2020 39th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2020), 2020
- 10) 松井貞興，篠本恭平，杉本圭：船体構造設計のための波浪荷重の簡易算式の開発—第1報：縦運動の応答関数とその支配的な船型パラメータ—，日本船舶海洋工学会論文集第34号，2021（査読中）
- 11) Kei Sugimoto, Hiroshi Kawabe et al.: Non Linear Effect on Wave-induced Loads for Hull Structural Design, ASME 2020 39th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2020), 2020
- 12) International Association of Classification Societies:IACS Rec No.34, 1992
- 13) 見良津黎，福井努，朱庭耀：実海域での船舶遭遇海象における操船影響の定量的評価に関する研究（第3報），日本船舶海洋工学会講演会論文集，2021
- 14) Yoshiaki Naruse, Tetsuo Okada et al.: Scantlings Evaluations of Plates and Stiffeners Based on Elasto-plastic Analysis under Axial Loads and Lateral Pressures, PRADS 2019, Sep 22-26, 2019, Yokohama, Japan
- 15) 石橋公也，藤久保昌彦：組み合わせ荷重を受ける矩形板の最終強度簡易評価法について，日本船舶海洋工学会論文集，33巻，pp.159-172，2021
- 16) 山本規雄，杉本友宏，石橋公也：AISデータを用いた疲労強度評価用荷重（第3報：波浪追算データを用いた操船影響の検討），日本船舶海洋工学会講演会論文集，第30号，pp.495-498，2020

# 最新の板厚計測データに基づく腐食予備厚の設定

杉本 友宏\*, 山本 規雄\*, 石橋 公也\*

## 1. 緒言

従来、本会の船体構造規則である鋼船規則C編で考慮される腐食予備厚は、原則2.5 mmが腐食環境にかかわらず構造部材寸法算式に足されている<sup>1)</sup>。一方で、船体構造強度を有限要素解析により評価する手法がまとめられている船体構造強度に関するガイドライン<sup>2) 3)</sup>においては、建造板厚から船舶の設計寿命(25年)の間に腐食するであろう数値(腐食予備厚)を予め控除したネット寸法を用いて構造強度を評価する手法が採用されており、国際船級協会連合(以下、IACS)の共通構造規則(Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers)であるCSR-BC、CSR-OT及びCSR-BC&OTにも同手法が取り入れられている<sup>4)~6)</sup>。合理的な構造規則を策定するにあたっては、船舶が25年間に腐食する衰耗量を適切に見積もる必要がある。船体構造部材の腐食衰耗量は、それらが曝される環境や防食塗装の状態に依存するため、腐食の発生及び進行の過程に対する確率モデルを設定し、長年にわたって蓄積している板厚計測データを、そのモデルに当て嵌めて統計的に解析することにより、腐食衰耗量を推定する。本報告では、比較的新しい船の板厚計測データを用いて、腐食衰耗量の推定を行い、腐食予備厚を設定する。また、CSR-BC&OTに規定される腐食予備厚と比較を行う。

## 2. 腐食に影響を及ぼす要件の変遷

船体構造部材の腐食衰耗量は、その部材が曝される環境での塗装状態やメンテナンスの程度に依存するため、それらを要求するような規則が改正された場合、腐食衰耗量に大きな影響を与える。表1に塗装やメンテナンス等腐食環境に影響を与えるような規則改正の一覧を示す。

1983年に海洋汚染防止条約(MARPOL条約)<sup>7)</sup>が適用されたことにより、油タンカーに分離バラストタンクの設置が要求された。それまでは荷下ろし後は油タンカーの貨物倉にバラスト水を積載して航行していたのが、本要件により、貨物油タンク、バラ

ストタンクが専用の使われ方をし始めたため、貨物油タンクの腐食状況が劇的に改善された。その後、老齢ばら積貨物船が経年劣化に起因する損傷により、立て続けに沈没する事故が発生したことを受け、ばら積貨物船、油タンカー、ケミカルタンカーに対して国際海事機関(以下、IMO)で検査強化プログラム(Enhanced Survey Programme: 以下、ESP)<sup>8)</sup>が採択された。ここでは、バラストタンクの塗装状態がGOOD、FAIR、POORの三段階で判断されるようになり、もしPOORと判断された場合はその後毎年の内部検査が要求されるため、就航後のメンテナンスの程度が改善された。なお、三段階の塗装状態の判断基準を表2に示す。また、上述の事故の中には腐食が原因だったものもあったため、国際的にも塗装状態の確認、腐食状況の改善に対する機運が高まり、その後、IACSにおいても統一規則(UR) Z7 (Rev.5)<sup>9)</sup>が採択され、ESP同様、塗装状態が三段階で評価されるようになった。これらの規則が適用された1996年、1998年から腐食状況は大きく改善された。最近では、2008年にバラストタンク、2013年に貨物油タンクに対して、塗装性能基準(PSPC)<sup>10) 11)</sup>が適用開始され、建造段階において、15年経過時までGOODの状態を保つような塗装性能が要求されるようになった。構造規則では、本会が開発した船種毎の船体構造強度に関するガイドラインやIACS CSRにおいて、ネット寸法手法が採用され、設計寿命間の腐食衰耗に対する構造健全性が維持されるようになった。

## 3. 腐食衰耗量の推定方法

本報告で用いた腐食衰耗量の推定法は、山本らの統計的アプローチによる。山本らは、腐食の発生・進行を次の3つの連続する過程で表せるとして、それぞれに対して確率モデルを導入している<sup>12)</sup>。

Phase I: 孔食活性点が生成されるまでの期間  $f_{T_0}(t)$

\* 開発本部 船体開発部

$$f_{T_0}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0 t} \exp\left\{-\frac{(\ln t - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}\right\} \quad (1)$$

ここで、

$T_0$  : 孔食活性点が生成されるまでの時間

$\mu_0, \sigma_0$  : それぞれ  $\ln T_0$  の平均値及び標準偏差

Phase II : 孔食活性点が成長を開始する孔食点へと推移するまでの期間  $g_{T_r}(t)$

$$g_{T_r}(t) = \alpha \exp(-\alpha t) \quad (2)$$

ここで、

$T_r$  : 孔食活性点が孔食点に遷移するまでの時間

$\alpha$  : 平均推移時間の逆数

Phase III : 孔食点が成長する期間  $z(t)$

$$z(t) = a(t - t_0)^b \quad (3)$$

ここで、

$a, b$  : 腐食進行挙動を特徴づけるパラメータ

$t_0$  : 孔食点が生成されるまでの時間

これらの過程を図示すると、図1のようになる。

Phase IからPhase IIIまでの確率モデルの確率変数を、板厚計測データを用いて、最尤推定法により推定することで、腐食衰耗量を統計的に導出する。

表1 腐食環境及びメンテナンスに関連する規則

規則名	適用開始年	発行元	腐食環境又はメンテナンスへの影響
MARPOL	1983	IMO	分離バラストタンクの設置による油タンクの腐食状況が劇的に向上
ESP	1996	IMO	板厚計測による状態監視、塗装状態の点検、早期メンテナンスによる船体構造の腐食状況の改善
IACS UR Z7 (Rev.5)	1998	IACS	
PSPC(WBT) PSPC(COT)	2008 2013	IMO	バラストタンク/タンカーの貨物油タンクの塗装品質の向上
構造強度ガイドライン	2001 2002	NK	ネット寸法手法により、設計寿命間の腐食衰耗に対する構造健全性を維持
CSR-BC, CSR-OT	2006	IACS	
CSR-BC&OT	2015	IACS	

表2 塗装状態の判断基準

判定	判定基準
GOOD	ごく一部にだけ薄い錆が発生している状態で、具体的には塗膜に破損がなく、考慮している箇所の3%未満に点状の錆が発生、部材の自由端、溶接継手の20%未満に錆が生じている状態
FAIR	部材の自由端、溶接継手において部分的な塗装の破損があり、考慮している箇所の20%以上の範囲にわたって薄い錆が発生している状態で、POORよりも状態がいいもの
POOR	考慮している箇所の20%以上にわたり全般的な塗膜破損がある状態で、10%以上にわたり厚い錆が発生している状態

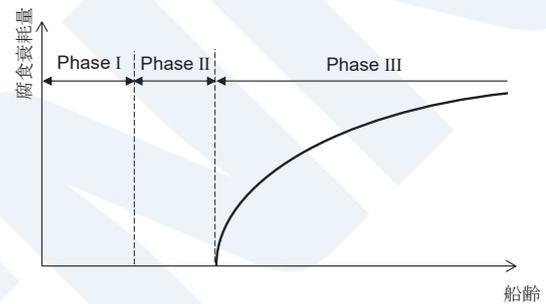


図1 船齢と腐食衰耗量の関係

#### 4. 板厚計測データ

腐食衰耗量を推定するにあたり板厚計測データを収集する必要があるが、本報告においては、ESPやUR Z7 (Rev.5)が適用開始されてからの船のデータを多く収集することを目的に、次の条件を設定し、285隻から、合計211,866か所の板厚計測データを収集した。なお、収集した板厚計測データは本会に登録される船舶の定期検査の際に計測されたものである。

- ・船の長さが90m以上の船 (鋼船規則C編適用船)
- ・新造時から本会に入級している船
- ・2004年1月1日以降に定期検査が行われた船
- ・検査時の船齢が14年以上の船
- ・船体横断面の板厚計測データ

板厚計測データを収集した船舶の建造年の分布を図2に示す。ESPやUR Z7 (Rev.5)の適用が開始されて以降に建造された船のデータが多く含まれていることがわかる。なお、データ収集時にPSPC適用後14年以上経過している船舶がなかったため、PSPC適用船のデータは含んでいない。

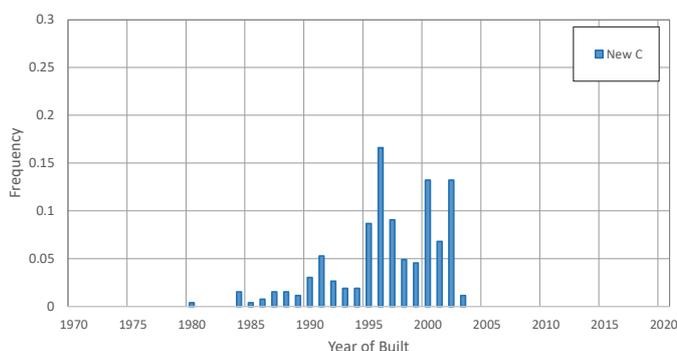


図2 板厚計測データを収集した船舶の建造年

### 5. 腐食衰耗量の推定結果

3章の考え方及び4章で収集した板厚計測データにより、腐食衰耗量の推定を行った。腐食衰耗量は、原則として、腐食環境の組合せ毎に求めている。例えば、バラスト環境と海水環境の境界をなす板としては、船底外板や船側外板があるが、部材毎に区別はせず、1つの腐食環境の組合せとして取り扱っている。ただし、同じ腐食環境の組合せであっても、部材によって著しく腐食衰耗量の異なっていた部材、例えば、貨物ホールド環境とバラスト環境の境界をなす部材のうち内底板は、その他の部材とは区別した。

得られた腐食衰耗量の推定値の例として、両面がバラスト環境に曝される部材、チップ船・一般貨物船・タンカーの貨物ホールドと海水に曝される部材及び両面がチップ船・一般貨物船・タンカーの貨物ホールドに曝される部材に対する値をそれぞれ図3、図5及び図7に示す。グラフの横軸が経過年数、縦軸が腐食衰耗量、黒点が板厚計測データから得られた腐食衰耗量、赤点が経過年数毎の腐食衰耗量の平均値、色付きの線が腐食衰耗量の累積確率に応じた値で、それぞれ50%、75%、90%、95%、平均値に対応する値である。

本報告では、腐食予備厚を決定するにあたり、25年経過時における累積確率90%に対応する値を用いており、この考え方はCSRと同じである。25年経過時における累積確率90%に対応する値は、両面がバラスト環境に曝される部材で0.61 mm、チップ船、一般貨物船及びタンカーの貨物ホールド及び海水暴露環境に曝される部材で0.84 mmであった。板厚計測データの腐食衰耗量が累積確率90%に対応する値を超えているものが多くあるように見えるが、図4、図6及び図8に示すような板厚計測データの腐食衰耗量のヒストグラムを確認すると、大きく腐食しているデータの頻度はゼロに近いということがわかる。本報告で考慮した腐食環境の組合せの一

部とそれに対応する25年経過時における累積確率90%の値を表3に示す。

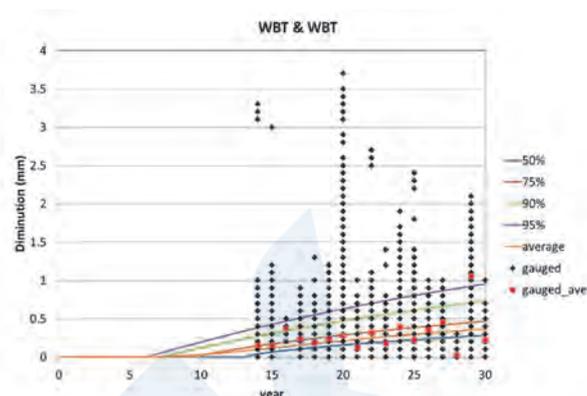


図3 両側がバラスト環境に曝される部材の腐食衰耗量の推定値

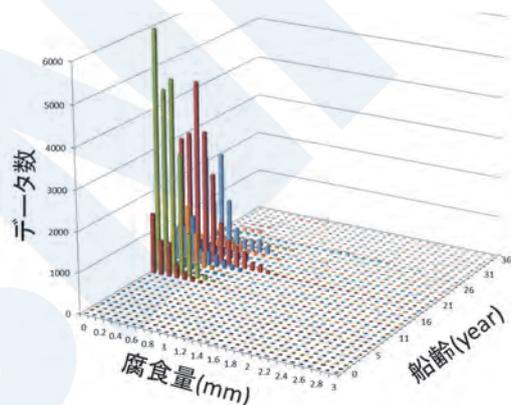


図4 両側がバラスト環境に曝される部材の板厚計測データのヒストグラム

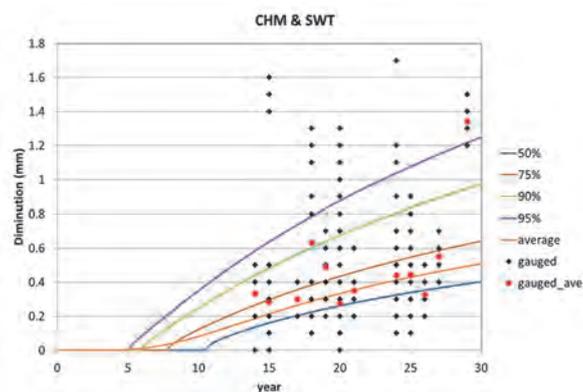


図5 チップ船、一般貨物船、タンカーの貨物倉と海水環境に曝される部材の腐食衰耗量の推定値

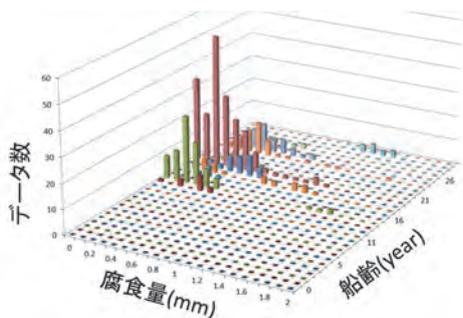


図6 チップ船，一般貨物船，タンカーの貨物倉と海水環境に曝される部材の板厚計測データのヒストグラム

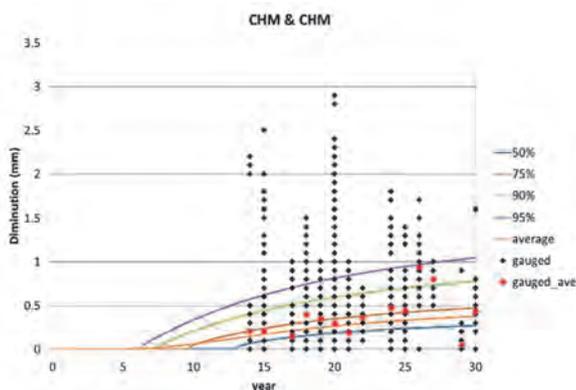


図7 両側がチップ船，一般貨物船，タンカーの貨物倉に曝される部材の腐食衰耗量の推定値

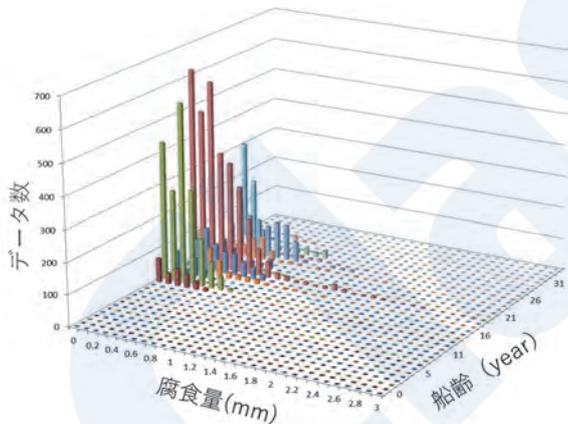


図8 両側がチップ船，一般貨物船，タンカーの貨物倉に曝される部材の板厚計測データのヒストグラム

表3 腐食環境の組合せ毎の25年経過時90%累積確率値に対応する腐食衰耗量の推定値の例

腐食環境の組合せ		腐食衰耗量 (mm)
大気環境 (高温)	バラスト環境	0.67
	低温 Cargo Hold	0.59
	貨物ホールド (その他)	1.08
大気環境 (高温以外)	大気環境 (高温以外)	0.71
	バラスト環境	0.45
	低温貨物ホールド	0.46
燃料油タンク	貨物ホールド (その他)	0.68
	燃料油タンク	0.52
	海水環境	0.57
海水環境	バラスト環境	0.81
	空所環境	0.65
	バラスト環境	0.53
バラスト環境	貨物ホールド (その他)	0.84
	バラスト環境	0.61
貨物ホールド (その他)	貨物ホールド (その他)	0.53
	貨物ホールド (その他)	0.70
PCC 貨物ホールド	PCC 貨物ホールド	0.45
常温 Type C 貨物ホールド	常温 Type C 貨物ホールド	0.46
貨物ホールドの内底板 (ばら積船)	バラスト環境	4.20
貨物ホールドの内底板 (チップ船)	燃料油タンク	4.05
	バラスト環境	3.94
貨物ホールドの内底板 (一般貨物船)	燃料油タンク	3.26
	バラスト環境	3.24
貨物ホールドの内底板 (タンカー)	バラスト環境	0.47

(備考) 貨物ホールド (その他) は，チップ船，一般貨物船，タンカー等の貨物ホールドを意味する。

### 6. 腐食予備厚

腐食予備厚  $t_c$  (mm) は，(4)式により設定する。

$$t_c = \text{Roundup}_{0.5}(t_{c1} + t_{c2}) + t_{res} \quad (4)$$

ここで，

$t_{c1}$ ,  $t_{c2}$  : 片面の腐食予備厚

$t_{res}$  : 検査間隔の間に腐食が進行する量で 0.5 mm

Roundup は，0.5 mm 単位で値を切上げるとい

ことを意味している。

片面の腐食予備厚 $t_{c1}$ 、 $t_{c2}$ は、前5章で求めた各環境の組合せに対する腐食衰耗量の推定値から導出する。導出にあたっては、設定する片面の腐食予備厚 $t_{c1}$ 、 $t_{c2}$ を足し合わせた場合に、表3に示すような腐食環境の組合せに対する値を下回らないように安全側の値とした。本報告で求めた腐食予備厚を、全面的な改正を行った鋼船規則C編（以下、新C編）に規定しており、その値を付録に示す。なお、チェーンロッカ等、十分な量の板厚計測データが収集できなかった部材の腐食予備厚は、従来、本会の鋼船規則C編やCSRにおいて考慮していた値や考え方を参考として設定している。

## 7. CSRに規定される腐食予備厚との比較

CSRで規定される腐食予備厚も3章で述べた腐食衰耗量の推定法を用いている。表4に代表的な区画におけるCSRと新C編の片面の腐食予備厚の比較結果を示す。

表4から、ほとんどの腐食環境で、新C編の腐食予備厚はCSRの腐食予備厚よりも小さくなっているのがわかる。例えば、バラスト環境はCSRでは1.2 mmであるのに対して新C編では0.5 mmである。

本報告で収集した板厚計測データの対象船の建造年分布は図2で示した通りであるが、CSRの腐食予備厚を定めるにあたり収集した板厚計測データの対象船は、ESP及びUR Z7 (Rev.5)が適用開始される前の船舶である。このことから、適用規則が変わったことで、船舶の塗装性能が向上したり、メンテナンスが向上したりしたことが、本報告で得られた腐食予備厚がCSRのものよりも小さくなった要因であると考えられる。また、塗装技術そのものが向上していることも一因として考えられる。

一方で、ばら積貨物船の内底板はCSRと新C編の結果で違いはなかった。当該部材は機械ダメージも想定され、本来の腐食現象とは様相が異なることから、塗装状態の改善が難しい箇所であることが原因と考えられる。

表4 CSRと全面改正後の鋼船規則C編の  
片面腐食予備厚の比較

区画の種類	CSRの片面腐食予備厚	新C編の片面腐食予備厚
バラストタンク	1.2 mm	0.5 mm
ばら積貨物倉（ホッパ斜板，内底板）	3.7 mm	3.7 mm
大気暴露（暴露甲板）	1.7 mm	0.6 mm
海水暴露（喫水付近）	1.5 mm	1.0 mm
燃料油タンク	0.7 mm	0.5 mm
清水タンク	0.7 mm	0.5 mm
空所	0.7 mm	0.5 mm
ドライスペース	0.5 mm	0.5 mm

## 8. 結言

検査強化プログラムESPが適用され始めた1996年以降に建造された船舶の板厚計測データを多く用いて腐食衰耗量の推定を行った。また、その結果を用いて、種々の腐食環境に対して腐食予備厚を設定した。CSRに規定される腐食予備厚と比較したところ、ほとんどの腐食環境において、CSRの値よりも小さい値であった。ただし、ばら積貨物船の内底板についてはCSRの値と変わらなかった。CSRよりも腐食予備厚が小さくなった理由としては、船舶に適用される規則が改正されたことにより、建造時の塗装性能の向上、就航船に対する腐食環境の改善やメンテナンス程度の向上が図られたためであると考えられる。

なお、本報告で求めた腐食予備厚には、PSPCの影響が含まれていない。3回目の定期検査を終えたPSPC適用船の板厚計測データが十分に集まってから、再度同様の検討を行い、PSPC適用バラストタンクや貨物油タンクに対する腐食予備厚の設定を行う予定である。

本報告で得られた腐食予備厚は、全面改正された鋼船規則C編に用いられている。この腐食予備厚を用いることにより、より合理的に構造強度評価を行えることが期待される。

## 参考文献

- 1) 日本海事協会：鋼船規則C編，2021.
- 2) 日本海事協会：タンカーの構造強度に関するガイドライン，2001.
- 3) 日本海事協会：ばら積貨物船の構造強度に関するガイドライン，2002.

- 4) 日本海事協会：鋼船規則CSR-B編，2021.
- 5) 日本海事協会：鋼船規則CSR-T編，2021.
- 6) 日本海事協会：鋼船規則CSR-B&T編，2021.
- 7) IMO: International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto.
- 8) IMO: Resolution A.744(18) – Guidelines on the Enhanced Programme of Inspections During Surveys for Bulk Carriers and Oil Tankers, 1993.
- 9) IACS: Unified Requirement Z7 (Rev.5), 1998.
- 10) IMO: Resolution MSC.215(82) - Performance Standard for Protective Coatings for Dedicated Seawater Ballast Tanks in All Types of Ships and Double-side Skin Spaces of Bulk Carriers, 2006.
- 11) IMO: Resolution MSC.288(87) - Performance Standard for Protective Coatings for Cargo Oil Tanks of Crude Oil Tankers, 2010.
- 12) N. Yamamoto et.al. : A Study on the Degradation of Coating and Corrosion of Ship's Hull Based on the Probabilistic Approach, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.120, pp 121-128, 1998.

#### 付録

Corrosion addition specified in the new structural rules (new Part C) of ClassNK

## 付録 Corrosion addition specified in the new structural rules (new Part C) of ClassNK

区画の種類	詳細	$t_{c1}$ 又は $t_{c2}$ (mm)	
バラストタンク、ビルジタンク、排水貯蔵タンク、チェーンロッカ(注1)	タンク頂板から垂直方向下向きに3 m 以内の範囲(注2)	1.0	
	その他の箇所	0.5	
貨物倉又は貨物タンク	コンテナ運搬船	内底板	1.5
		その他	0.5
	ばら積貨物船、鉱石運搬船等の貨物倉(注3)	内底板及びホップ斜板(注4)	3.7
		ロワースツール	1.6
		横隔壁及び縦通隔壁(注5)	1.0
		その他	1.0
	チップ船	内底板、ホップ斜板及びロワースツール	3.5
		その他	0.7
	一般貨物船	内底板	3.0
		その他	0.7
	低温貨物ホールド(冷凍運搬船)		0.5
	空所環境の貨物倉(自動車運搬船)		0.5
	タンカー(注6)		0.7
	高温貨物タンク(アスファルト等)が格納されているホールドスペース		0.5
	独立型の高温貨物タンク(アスファルト等)		0.7
	独立型の低温貨物タンクが格納されているホールドスペース(独立型タンクを有する液化ガス運搬船)		0
	独立方形型の低温貨物タンク(独立方形タンクを有する液化ガス船)		0
	Type C方式の液化ガス運搬船(常温)のホールドスペース		0.5
	Type C方式の液化ガス運搬船(低温)のホールドスペース		0
	メンブレン方式の液化ガス運搬船のホールドスペース		0
その他の貨物ホールド(セメント専用運搬船等の貨物ホールド内にセルフアンローダを有する船舶の貨物ホールドを含む)		0.7	
大気暴露	甲板上の暴露部材	0.6	
	上記以外の部材	0.5	
海水暴露	設計最小バラスト喫水線と構造用喫水線の間の外板	1.0	
	その他の外板	0.5	
燃料油タンク(注7)及び潤滑油タンク		0.5	
清水タンク		0.5	
空所(注8)及びドライスペース(注9)(注10)		0.5	
居住区		0	
上記以外		0.5	
(注)			
(1) チェーンロッカの底板上面から垂直方向上向きに3 m 以内の範囲にある板部材の表面には、1.0 mm 追加しなければならない。			
(2) タンク頂板が暴露甲板である場合にのみ適用する。3 m の距離はタンク頂部と平行に、タンク頂部から垂直に測る。なお、ビルジタンク、排水貯蔵タンク及びチェーンロッカに対しては、「その他の箇所」とする。			
(3) ばら積貨物倉は、バラスト兼用倉を含む。			
(4) 鉱石運搬船にあっては、内底板から垂直方向上向きに3 m 以内の範囲にのみ適用する。なお、内底板から垂直方向上向きに3 m を超える範囲は1.0 mm とする。			
(5) 内底板から垂直方向上向きに3 m 以内の範囲にある隔壁に用いる板には、0.2 mm 追加しなければならない。			
(6) サクションベルマウス周辺の内底板及びサクションウェルには、サクションベルマウスの外周から1 ロングスペース程度の範囲で、2.0 mm 追加しなければならない。			
(7) ガス燃料タンクが設置される区画の腐食予備厚は、各種液化ガス運搬船のホールドスペースの腐食予備厚を準用する。			
(8) ボルト締めマンホールからのみ出入り可能な区画、パイプトンネル等の通常は出入りしない区画のことをいう。閉断面のピラー内部の区画も含む。			
(9) 機関区域、ポンプ室、貯蔵品室、操舵機室等の内部のことをいう。			
(10) 主機室の内底板には2.0 mm 追加しなければならない。ただし、事前に資料を提出して本会の承認を受けた防食措置を行う場合は、この限りではない。			

# 船舶の実遭遇海象に基づく操船影響の定量的評価

見良津 黎\*, 福井 努\*, 朱 庭耀\*

## 1. はじめに

船舶は、船体構造の安全性や復原性の確保、貨物の荷崩れ防止、機関設備及び艙装品の保護、燃料消費量の削減等の様々な観点から操船が行われるため、船舶の実遭遇海象を精度良く把握することが肝要である。実海域における操船の傾向や操船が船体の構造強度に与える影響は、過去に多数報告されている<sup>1)~5)</sup>。現行の船級規則では、既に操船影響が考慮されているが、より高精度な実遭遇海象に基づく合理的な技術背景の整備が求められる。

近年、自動船舶識別装置（Automatic Identification System, AIS）により、全球における船舶の位置情報データを取得することが可能である。AISデータの位置・時刻情報に基づく海象データは波浪追算（wave hindcast）を用いて算出できるため、これらのデータを組み合わせることで、船舶が実際に遭遇した海象の把握が可能となる。

著者らは、2年11か月間のAISデータ及び波浪追算データを用いて、有義波高、波周期、波向き、船速等を考慮し、船体ロール角、船体中央横断面における波浪中縦曲げモーメント、船体中央横断面の船底中心線における波浪変動圧を対象に北大西洋の自然海象に対する操船影響の定量的評価を実施した<sup>6)7)</sup>。

一方、本会が鋭意完遂した船体構造に関する鋼船規則C編の全面改正には、国際船級協会連合（IACS）が規定する北大西洋海域の波浪発現頻度表Recommendation No. 34（以降、IACS Rec. No. 34）<sup>8)</sup>に対する操船影響の定量的評価が不可欠であった。

そこで本研究では、北大西洋における一般商船（バルクキャリア、油タンカー、コンテナ船）の実遭遇海象を踏まえて、当該船舶のヒープ、ロール、ピッチ、船体中央横断面における波浪中縦曲げモーメント、船体中央横断面の船底中心線及び喫水線における波浪変動圧を対象に、IACS Rec. No. 34に基づく操船影響の定量的評価を実施した。

## 2. AISデータ・波浪データ

本研究では、Vessel Tracker社のAISデータ<sup>9)</sup>を使用した。AISデータは衛星及び陸上の基地局を経由して取得され、任意の船舶の位置・時刻情報を抽出可能である。表1にAISデータの概要を示す。本研究では、2年11か月（2014年1月及び2015年1月から2017年10月）の間に北大西洋を航行したバルクキャリア4,509隻、油タンカー1,875隻、コンテナ船2,072隻の計8,456隻分のAISデータを使用した。なお、上述の2014年1月は、北大西洋において過去25年間（1994年～2018年）で最も厳しい海象が発生した期間に該当する<sup>10)</sup>。本研究では、船速が0 knotのデータを除外するとともに、時間間隔が不規則なAISデータを1時間間隔に間引いて使用した。

波浪データは、ERA5（ECMWF）<sup>11)</sup>及びIOWAGA（IFREMER）<sup>12)</sup>の波浪追算データを用いた。表2に上述の波浪追算データの概要を示す。本検討では、図1に示すIACS Rec. No. 34と同一の海域（GWS Area 8, 9, 15, 16）を対象とした。各波浪追算データは、海洋気象ブイ及び地球観測衛星による計測値との比較により、一定の精度を有していることが確認されている<sup>10)</sup>。ここで、上述の1時間間隔に間引いたAISデータの前後30分で最も近い時刻の海象データとの紐づけを行い、海象データ1点を1時間の短期海象とみなして検討を行った。

表1 AISデータ概要

Time period	2014/1, 2015/1~2017/10
Navigation area	GWS Area 8, 9, 15, 16 (North Atlantic)
Number of ships	8,456 (Bulk carrier: 4,509, Oil tanker: 1,875, Container ship: 2,072)

表2 波浪追算データ概要

Data set	ERA5	IOWAGA
Organization	ECMWF	IFREMER
Spatial resolution	0.36 deg	0.5 deg
Time step	1 h	3 h
Wave model	ECWAM	WW3-st4
Wind forcing	Coupled model	NCEP-CFSR

\* 技術研究所

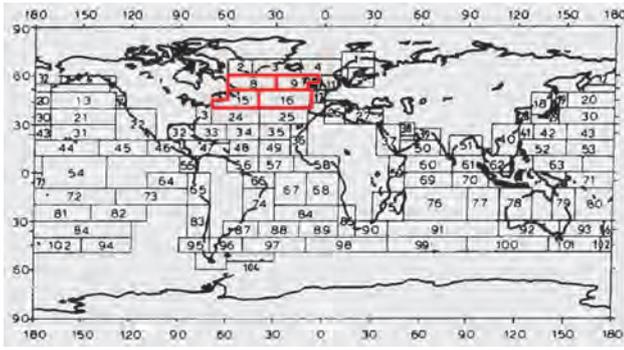


図1 IACS Rec. No. 34の対象海域（北大西洋）

### 3. 操船影響の定量的評価

船舶の遭遇有義波高及び波周期を考慮した操船影響係数の算出手順を以下に示す<sup>6)7)</sup>。

- 1) 下記の波浪発現頻度表を用意する。
  - (A) 操船影響を含んだ波浪発現頻度表（AISデータと波浪追算データを基に算出）
  - (B) IACS Rec. No. 34
- 2) 前1)の各波浪発現頻度表を用いて、ヒープ（Heave）、ロール（Roll）、ピッチ（Pitch）、船体中央横断面における波浪中縦曲げモーメント（VBM）、船体中央横断面の船底中心線における波浪変動圧（Pcl）及び船体中央横断面の喫水線における波浪変動圧（Pwl）の長期予測値（超過確率 $10^{-8}$ の値）を線形ストリップ法で算出する。一例として、ある1隻のパナマックス型バルクキャリアの長期予測値の分布（VBM）を図2に示す。
- 3) 前2)で述べた種々の長期予測値を用いて、前1)の2年11か月分の操船影響を含んだ波浪発現頻度表（A）とIACS Rec. No. 34（B）との比である操船影響係数 $F_{op\_rec.No.34}$ を下記の算式により算出する。

$$F_{op\_rec.No.34} = \frac{\text{long-term prediction at } 10^{-8} \text{ (with ship operational effect)(A)}}{\text{long-term prediction at } 10^{-8} \text{ (IACS Rec.No.34)(B)}}$$

表3にシリーズ計算対象船（バルクキャリア：22隻、油タンカー：27隻、コンテナ船：26隻）の概要、表4に長期予測の解析条件を示す。また、表3のシリーズ計算対象船は、表1に示したAISデータの対象船とは異なる点に留意が必要である。

図3に $F_{op\_rec.No.34}$ の統計値（平均値±2標準偏差）、図4から図9に船種にかかわらず船の長さをパラメータとした $F_{op\_rec.No.34}$ の散布図を示す。図3に示した $F_{op\_rec.No.34}$ の平均値±2標準偏差の範囲は0.75～

0.84である。図4から図9より、波浪モデル、シリーズ計算対象船の長さ及び船種に対する $F_{op\_rec.No.34}$ に顕著なばらつきは認められなかった。

表3 シリーズ計算対象船の概要

Ship type	Bulk carrier	Oil tanker	Container ship
Ship length[m]	110～285	110～320	110～350
Number of ships	22	27	26
Loading condition	Full load		

表4 長期予測の解析条件

Program	Liner strip method
Parameter	Heave, Roll <sup>※</sup> , Pitch, Vertical bending moment amidships (VBM), Hydrodynamic pressure at bottom center line amidship (Pcl), Hydrodynamic pressure at water line amidship (Pwl)
Ship speed	5 knots
Wave direction	All headings

※Excluding container ships

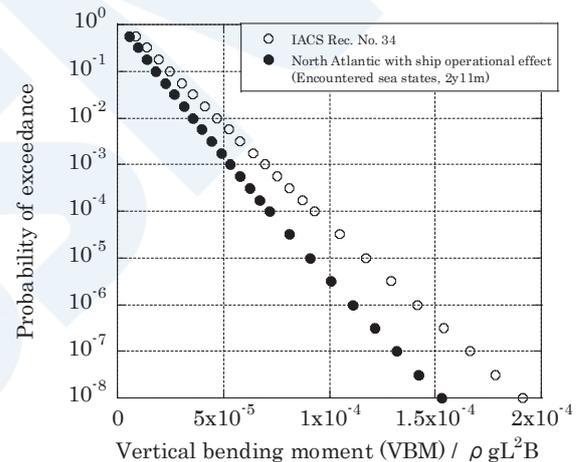


図2 操船影響を含んだ波浪発現頻度表及びIACS Rec. No. 34より算出した船体中央横断面における波浪中縦曲げモーメント（VBM）の長期予測値の一例

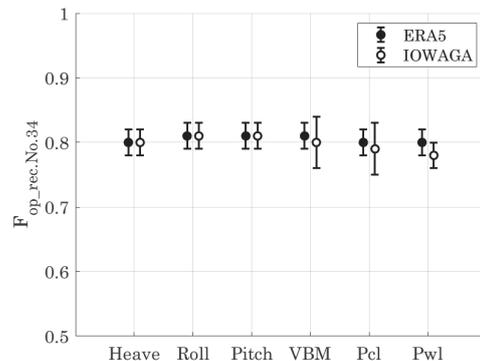


図3 評価対象項目ごとの操船影響係数の統計値（平均値±2標準偏差）

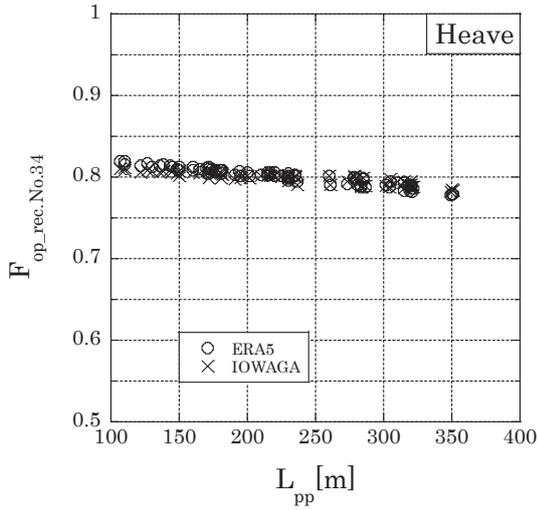


図4 ヒープに関する操船影響係数 $F_{op\_rec.No.34}$

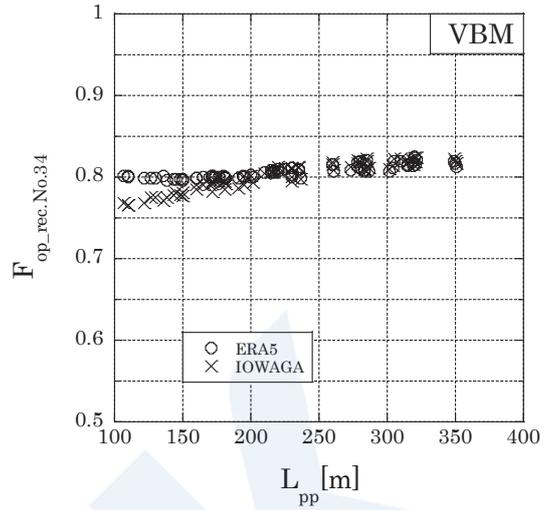


図7 船体中央横断面における波浪中縦曲げモーメントに関する操船影響係数 $F_{op\_rec.No.34}$

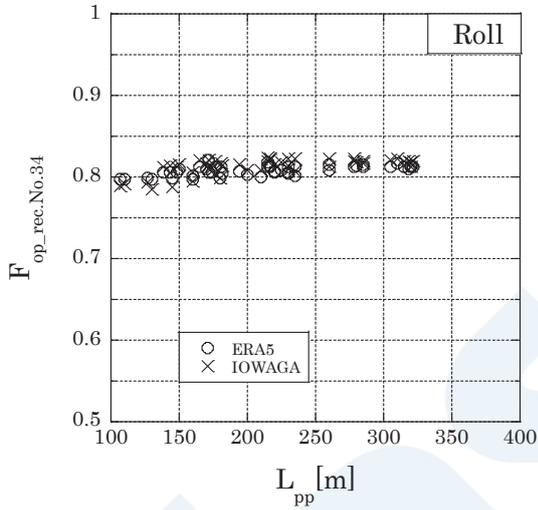


図5 ロールに関する操船影響係数 $F_{op\_rec.No.34}$

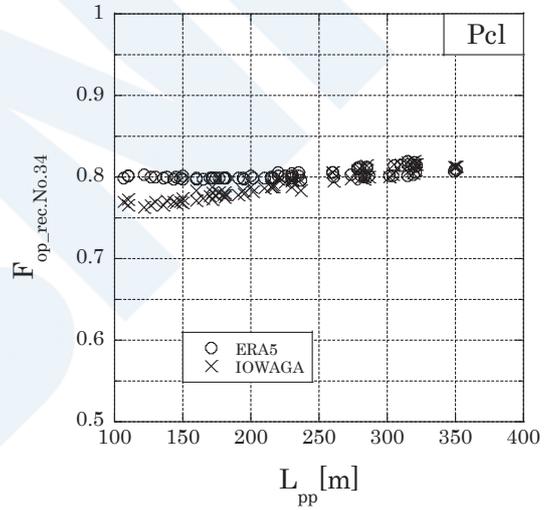


図8 船体中央横断面の船底中心線における波浪変動圧に関する操船影響係数 $F_{op\_rec.No.34}$

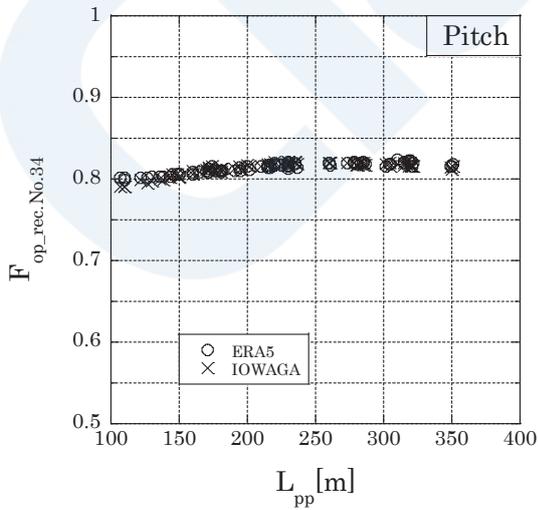


図6 ピッチに関する操船影響係数 $F_{op\_rec.No.34}$

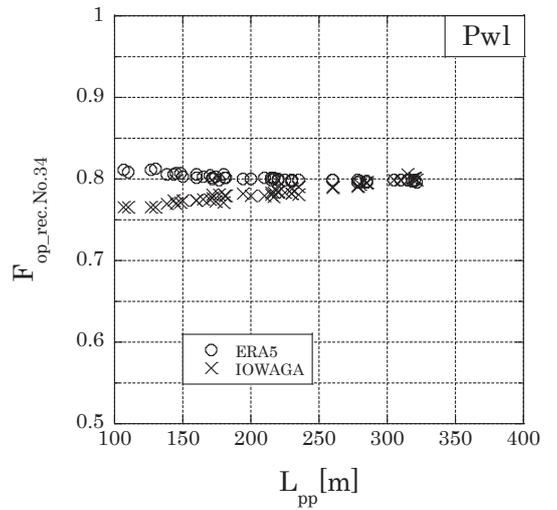


図9 船体中央横断面の喫水線における波浪変動圧に関する操船影響係数 $F_{op\_rec.No.34}$

#### 4. おわりに

本研究では、船体構造に関する鋼船規則C編の改正に資する検討として、IACSが規定する北大西洋海域の波浪発現頻度表 (IACS Rec. No. 34) に対する操船影響の定量的評価を実施した。北大西洋における一般商船 (バルクキャリア, 油タンカー, コンテナ船) の実遭遇海象を踏まえて、当該船舶のヒープ, ロール, ピッチ, 船体中央横断面における波浪中縦曲げモーメント, 船体中央横断面の船底中心線及び喫水線における波浪変動圧を対象に、IACS Rec. No. 34に基づく操船影響の定量的評価を実施し、以下の結論を得た。

- 1) IACS Rec. No. 34に基づく操船影響係数  $F_{op\_rec.No.34}$  の平均値  $\pm 2$  標準偏差の範囲は 0.75~0.84である。
- 2) 波浪モデル, シリーズ計算対象船の長さ及び船種に対する  $F_{op\_rec.No.34}$  に顕著なばらつきは認められなかった。

#### 参考文献

- 1) Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK): Technical Guide Regarding the Strength Evaluation of Hull Structures, 1999.
- 2) 内藤林他: 運航限界を考慮した長期予測, 関西造船協会論文集, 第241号, 2004.
- 3) Soares C.G.: Effect of heavy weather maneuvering on the wave induced vertical bending moments in ship structures, Journal of Ship Research. Vol. 34 (1), pp.60–68, 1990.
- 4) Shu Z. and Moan T.: Effects of Avoidance of Heavy Weather on the Wave-induced Load on Ships, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 130 (2), 2008.
- 5) Vettor R. and Soares C.G.: Rough weather avoidance effect on the wave climate experienced by oceangoing vessels. Applied Ocean Research, Vol. 59, pp.606–615, 2016.
- 6) 見良津黎他: 実海域での船舶遭遇海象における操船影響の定量的評価に関する研究 (第2報), 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第30号, pp.397-401, 2020.
- 7) Miratsu R., Fukui T., Matsumoto T. and Zhu T.: Study on ship operational effect for defining design values on ship motion and loads in North Atlantic, ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2020), 2020.
- 8) International Association of Classification Societies (IACS) Recommendation No.34, Standard Wave Data, 2001.
- 9) Genscape Vesseltracker™ Data Services. Retrieved March 2020 from <https://www.vesseltracker.com/en/products/dataServices.html>.
- 10) Sasmal K., Miratsu R., Kodaira T., Kita Y., Zhu T., Fukui T. and Waseda T.: Wave climate in the North Atlantic Ocean and extreme value analysis, 2nd International Workshop on Waves, Storm Surges and Coastal Hazards, 2019.
- 11) Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horanyi A., Muñoz-Sabater J. et.al.: The ERA5 global reanalysis, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146, pp.1999–2049, 2020.
- 12) Rasche N. and Ardhuin F.: A global wave parameter database for geophysical applications. part 2: Model validation with improved source term parameterization, Ocean Modelling, 70, pp.174–188, 2013.

# CBMライフサイクル保守管理

## — 船用機器の状態監視・状態評価技術 —

寺 剛史\*, 飯間 智史\*\*, 若生 拓也\*\*\*

### 1. はじめに

IACS統一規則（以下、UR）Z27において、Condition Based Maintenance（以下、CBM）認証に関するスキームが定められ、2020年1月以降、IACSにおいて、統一的に運用されるものとなった。これを受け、日本海事協会では、CBM認証を本格的に進めることとなる。CBMは、遠隔で対象機器の状態監視、評価、予測が可能となる技術である為、自動化が求められている分野で必要となる技術である。今般、CBM適用のメリットを以下のように整理した。

#### 1) メンテナンスの最適化

劣化度を監視することで、メンテナンスが必要な箇所を洗い出すことが可能となる。その為、メンテナンスの負担やコストの削減につながる。

#### 2) 検査の合理化

部品によっては、一定の検査期間以上に寿命が持続しているものもあれば、検査前に異常をきたす可能性があるものもある。CBMを採用することで、機器の稼働条件に即した検査の実現につながる。

#### 3) 検査の標準化

従来の検査方式では、検査員の経験に依存する部分もあり、検査精度にばらつきが生じる可能性もある。CBMを採用することで、一定の品質が担保されたセンサーで取得するデータを基に、評価技術が標準化される。その為、熟練者同等の検査実施が可能となる。

ただし、CBMの実施は以上のメリットの反面、課題も存在する。

#### 1) 初期・維持コスト

センサーや解析装置の設置による初期コストが増加する。また、それらの設備の管理費用等の維持コストが増加する。特に船陸間通信によりモニタリングする場合、通信費用や監視等の追加コストを考慮する必要がある。

#### 2) 計測値や解析方法の信頼性

センサーの精度が保証される範囲内で適切な箇所適用されていなければ、結果の信頼性も失われる。その為、適切な計測法とその解析法が重要である。

#### 3) 判断基準の獲得

船員及び検査員は、異常と判断するデータの構成や検査要否を判断できる知見が必要となる。

今後、CBMは船舶の高度な自動化、自律化に向けたステップとして重要な要素となる為、船上でのデータ蓄積やセンサーの精度に関する技術は発展していくものと予想される。従って、より一層CBM適用船舶が拡大していくものと考えており、合理的な機器モニタリング／解析法の開発や関連規則の改正及び策定を進めていく。

## 2. CBM規則について

船舶機器のCBM採用は船舶所有社（船舶管理会社）の申し込み及び日本海事協会の承認により、表1の開放検査をCBM方式とすることができる。

表1 機器等の開放検査

検査項目	検査内容
1. 往復動内燃機関	・シリンダカバー、ライナ、ピストン、クロスヘッドピン及び軸受、連切棒、クランクピン及び軸受、クランクジャーナル及び軸受、カム軸及び同駆動装置、過給機、掃気ポンプ又はフロア、空気冷却、付属する重要なポンプ。
2. 蒸気タービン	・タービンロータ及び軸受、ケーシング、タービンと減速装置の継手、ノズル弁、操縦弁。
3. 動力伝達装置及び軸系装置	・減速装置、逆転装置、クラッチ、弾性継手、中間軸・推進軸及び当該軸受。
4. 補助機関	・発電機、推進補機並びに操船・保安補機を駆動する補助機関。
5. ウォータジェット推進装置	・操船駆動システム用圧ポンプ、潤滑油ポンプ、冷却器、その他。
6. 旋回式推進装置	・推進用歯車、中間軸歯車、駆動軸歯車、軸受、軸受及びクラッチ、旋回用歯車、旋回用圧ポンプ及び出圧モータ、潤滑油ポンプ、冷却器、その他。
7. 補機	・空気圧縮機、送風機、冷却ポンプ、燃料油ポンプ、潤滑油ポンプ、給水、復水、ドレンポンプ、ヒルジ、バラスト、消化ポンプ、復水器、給水加熱器、冷却器、油加熱器、燃料油タンク、空気機、貨物装置等、甲板機器、造水装置、その他。

機器全体又は部品毎にCBMを適用することが可能であり、管理上のコスト、船員の負担の程度、技術的な可能性等に基づいて最終的に採択を決定する。また、「鋼船規則B編附属書B9.1.3-4.機関計画保全

\* 株式会社 MTI

\*\* 株式会社 ジャパンエンジンコーポレーション

\*\*\* 日本海事協会 技術研究所

検査（PMS）及び機関状態監視保全検査（CBM）管理ソフトウェアの承認要領1.3.3-1.(3)において、機器の安全上、良好な運転状況か判断する為に計測データのトレンドと共に限界値の表示を求めている。一方で、エンジンの負荷や性能、気象状況のような外的な要因、燃料の性状等、複雑なパラメータの下での状態異常の判定を行うことは非常に難しい。従って、対象機器製造社又は船舶所有社（船舶管理会社）による異常検知技術に対する信頼性、データの蓄積、活用の模索等はCBM実現の重要なポイントとなる。

### 3. 本研究について

本研究は、上記の項目を基にCBM実現に向けて船舶所有社、機器の製造社、船級協会が「主軸受の潤滑油（以下、LO）出口温度監視による軸受の損傷把握」を目的として行った共同研究である。なお、成果については日本海事協会における、「CBMガイドライン（第2.0版）」に採用されている。

本研究では、船用プラントの故障がどの部位でどのように発生しており、それがどのような影響を及ぼし、現状はどのように防止しているのかを把握し、それらをデータに代替する手法の検討をリスク評価手法にて行った。本リスク評価手法では、Fault Tree Analysis（以下、FTA）を使用し、故障の原因解析を行い、本FTAから計測可能なパラメータを決定している。その結果から今回CBM手法を適用する主機関主軸受に関しては、主軸受LO出口温度を監視する手法を選定した。主軸受LO出口温度監視による軸受の損傷把握が可能かどうかについても評価を行った。また、計測された実船データを用いて損傷を適切に把握できるかどうかを検討し、その技術の確からしさを検証する為、設置状況を模擬した陸上試験を実施することでCBM適用の可能性を検討した。

#### 3.1 実船監視

実船において主軸受LO出口温度を連続データとして収集し本データを解析することで、主軸受の状態診断技術になり得るか検討する為、図1の設置図のように台板サドルに测温抵抗体を取り付けた。

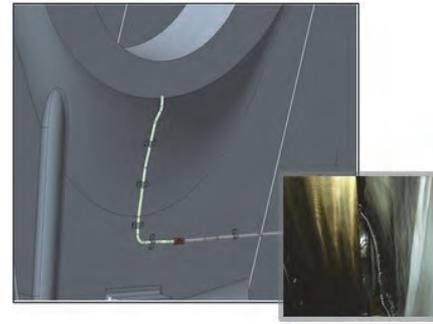


図1 実船設置図

2019年12月に測定したNo.2（黒線）、4（赤線）の主軸受LO出口温度を図2に示す（縦軸：温度[℃]、横軸：時間[日]）。丸枠で囲まれている部分は測定したデータに+1度温度を上昇させたものである。瞬間的に温度が上昇する状態について検討することで、解析の有効性を目的としたものである。

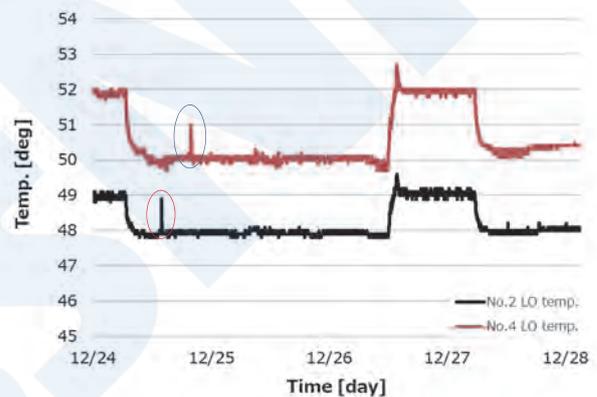


図2 No. 2, 4メインベアリングLO出口温度（12月）

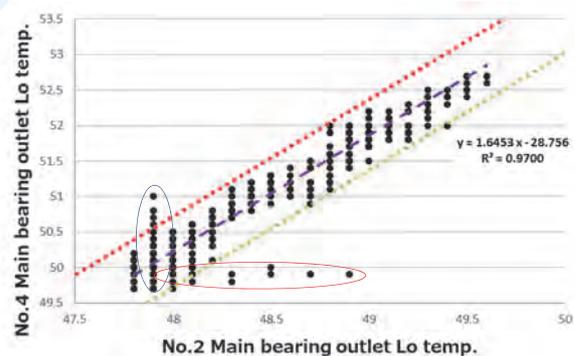


図3 No. 2, 4メインベアリングLO出口温度相関図（12月）

図3のように各メインベアリングLO出口温度勾配は同一である為、縦軸No.4、横軸No.2の出口温度として相関を取ることで、回帰直線を青点線のように引くことができる。回帰直線に対して、 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の平行な赤—緑点線の範囲にほぼ収まる結果となった。図2, 3における赤枠、青枠で囲まれているプロットからわかるように、No.2の瞬間的な温度上昇

に対しては、水平右方向にデータが広がっていくことが確認できた。また、No.4に対して瞬間的な温度上昇が起こった際には、鉛直上方向にプロットされていくことになる。従って相関に対して温度幅を設定することで異常値を鮮明に判別することが可能となる。異常発生 の判定において、発生時間を確認する為には、計測した生データを確認することが適切であると考ええる。

2020年6月に計測したNo.2, 4の主軸受の計測結果の一部を図4に示す(縦軸:温度 [°C], 横軸:時間 [日])。センサーの不具合によって、連続データの一部が部分的に振動状態になった。

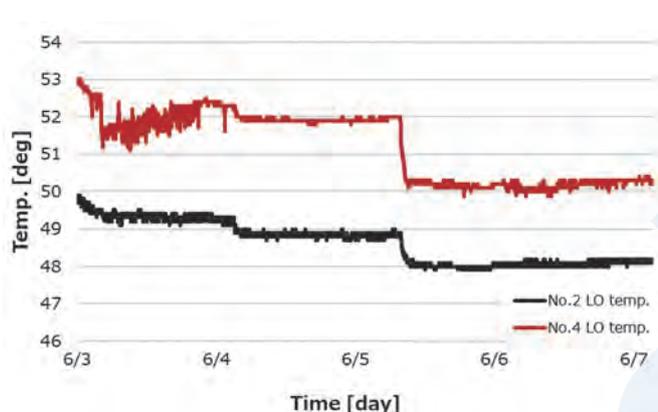


図4 No. 2, 4メインベアリングLO出口温度 (6月)

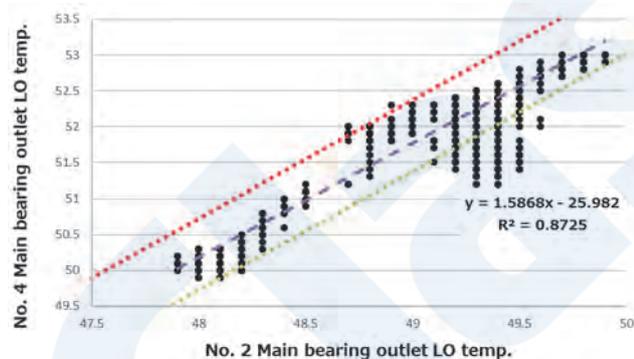


図5 No. 2, 4メインベアリングLO出口温度相関図 (6月)

図5の結果については、振動がNo.4で起こった状況において、同様な形で解析するとまとまったような形としてデータが±0.5°Cの平行線から外れた形で表現された。No.4側で振動現象が起こった間に、No.2側の温度が多少変化していることで、水平方向にも広がった形でデータが範囲内から外れている。この解析手法は設定された範囲から外れる量が増えるほどプロットされたデータに対しての解釈が難しくなる。従って、短期間の測定結果の判定に向いており、生データと同時に確認することが必要である。

## 3.2 模擬試験

機器の状態監視を採用するにはその技術の有効性について検討する必要がある。本研究では主軸受LO出口の温度監視による軸受の損傷監視の有効性検証の為、各損傷モードについて検討を行った。図6に滑り軸受の摩耗形態を示す。軸受を設置した後、接触面の形状に合わせるなじみ運転を行う。この時期は通常運転時より多くの摩耗を伴いながら平滑化される。なじみ運転後の通常運転時には繰り返し荷重により少しずつ摩耗が進み、最終的に摩耗の成長、油膜切れ等により異常摩耗になり焼損/破損に至る。

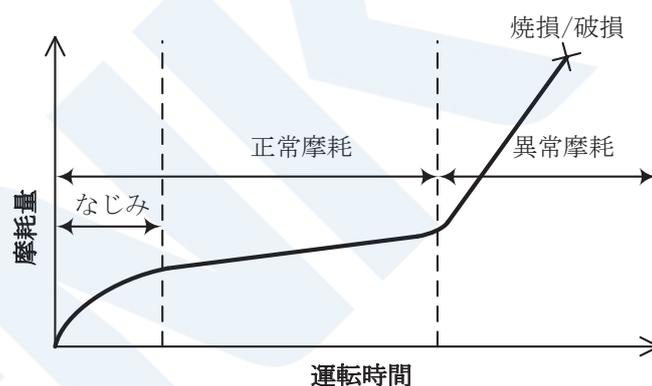


図6 滑り軸受の摩耗

また、上記の異常摩耗以外にも疲労破壊がある。この疲労破壊は主に全体的又は局所的な軸受の面圧が過大となったことや油膜厚さが過小となったこと等が考えられる。これらの異常摩耗と疲労破壊以外にも潤滑油性状不良による腐食とキャビテーションや電食のような浸食が考えられるが、軸受の損傷に占める割合が少ない為、本研究対象には含めていない。

実船状況を想定した異常時のデータを収集し、異常発生と計測値の関連性について調査する為、模擬試験を実施した。図7に焼き付きの確認試験の結果を示す(縦軸:温度 [°C], 横軸:時間 [日])。

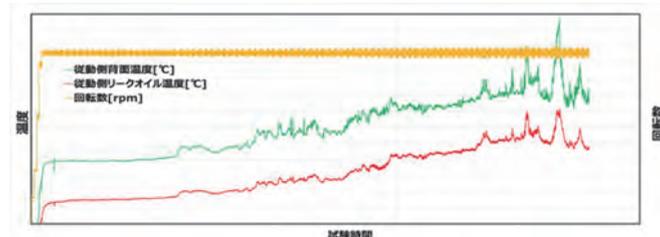


図7 焼き付きの確認試験

高負荷、高回転数によって損傷を意図的に与えやすい状況において、初期の損傷段階がLO出口温度の上昇から確認された。その後、軸受背面温度の上昇に伴いLO出口温度の上昇がほぼ同時に起き、焼

き付きを生じた後はより顕著に温度変化が生じた。  
試験を終了させた後の軸受表面の状態を図8に示す。



図8 模擬試験後の軸受メタル表面

同条件下において、初期の損傷を確認する為の試験が行われ、図9のように初期の温度上昇発生後に試験を停止させ確認したところ、図10に示すような損傷が確認された。

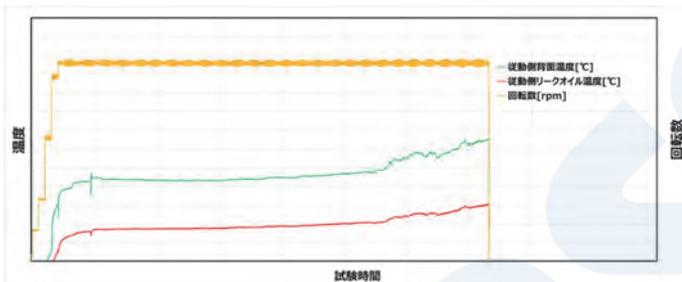


図9 焼き付き確認試験

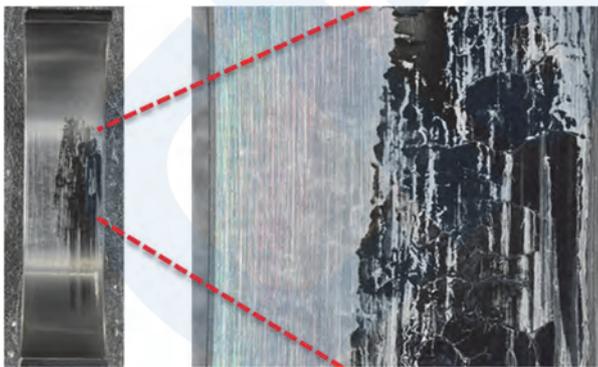


図10 焼き付き確認試験後の軸受メタル表面

以上の実験から、主軸受LO出口温度は軸受メタルの温度を反映しており、温度が次第に上昇していくこと、及びLO出口温度の監視によりメタルの損傷が確認できることが判明した。

#### 4. まとめ

本研究では、CBMの効率的かつ信頼性のある新たな手法について業界に貢献することを目的として取り組んでいる。現状のCBMにおいては、診断技術が確立されていない部分が多く限定的であることから、機器部品毎のレベルでの状態診断の可否判断がより一層必要となってくる。また、状態異常監視による円滑な検査を進めていく為には、新たな検査技術の妥当性を検証する必要がある。ここでは、主軸受LO出口温度の監視によって、軸受メタルの損傷を把握する為の研究が行われ、実船試験から主軸受LO出口温度の監視は有効であり、適切なデータの解析によってより正確な異常判別が可能となった。また、模擬試験から主軸受LO出口温度の監視によって軸受の損傷を初期の異常状態から把握することが可能となった。

従って、主軸受LO出口温度の測定・監視・解析によって軸受の損傷監視ができることを確認した。

今後も新たなCBMに対して取り組みを進め、その進捗を開示し、海事産業全体に貢献していきたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 日本海事協会：ClassNK技報（2020）
- 2) IACS.UR Z27 Condition Monitoring and Condition Based Maintenance, 2018.
- 3) 株式会社ジャパンエンジンコーポレーション “主機の状態監視と今後の展望について”（安全運航に向けたデータ活用とサイバーセキュリティを考えるセミナー，2020）
- 4) 日本海事協会鋼船規則 B編
- 5) 椎原，岡本，黒澤，滑り軸受け状態監視の計測・解析・診断技術—ディーゼル主機関主軸受の最適状態監視を目指して，日本マリンエンジニアリング学会誌，44-2(2009)
- 6) トライボロジー学会編 “トライボロジー故障例とその対策”，養賢堂，2003
- 7) 株式会社MTI 植松，”Condition Based Maintenance手法開発の取り組み～機関プラント状態の監視手法～”（Monohakobi Techno Forum 2021, [https://www.monohakobi.com/ja/company/news/news\\_20211209/](https://www.monohakobi.com/ja/company/news/news_20211209/)），2021

# 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6月に開催された第76回海洋環境保護委員会（MEPC 76）の審議内容を紹介した。

今号では、2021年11月22日から26日に開催された第77回海洋環境保護委員会（MEPC 77）及び2021年10月4日から8日に開催された第104回海上安全委員会（MSC 104）の主な審議結果を紹介する。

### 2. MEPC 77の審議結果—海洋環境保護関連—

#### 2.1 温室効果ガス（GHG）関連

国際海運からの温室効果ガス（GHG）排出の抑制対策はIMOにて検討が進められており、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）が導入されている。また、2018年4月に開催されたMEPC 72において、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、脱炭素化に向けたGHG削減手法について検討が行われている。

##### 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、前回のMEPC 76では、EEXI規制と、燃費実績（Carbon Intensity Indicator, CII）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、その後、燃費実績格付け制度を実施するために通信部会を設置して、DCSの関連ガイドラインとSEEMPガイドラインの改正、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作成作業が行われている。

この通信部会による作業は2022年6月に開催されるMEPC 78において最終化し採択される予定となっており、今回の会合ではガイドラインの最終化に向け下記の事項について合意された。

- 複数の満載喫水線証書を保有している場合、年間のCIIを求める際に使用するDWTやGTについてDCS認証ガイドラインで規定する
- 補正は、CIIの基準値ではなくCII値の計算にて適用し、補正後のCII値にて格付けを行う
- CII値やその補正係数など関連するデータは、DCSの情報と併せてIMOへの報告が必要

##### 2.1.2 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%改善及びGHG総排出量を50%削減すること、長期削減目標として今世紀中にGHG排出量をゼロとすることが明記されている。今回の会合では、これらの目標を達成するための具体的な中・長期対策として、燃料油に対する課金制度や排出量取引制度などが提案され、次回会合において検討を継続することが合意された。

##### 2.1.3 IMO研究開発ファンド

MEPC 75において、低・脱炭素技術の研究開発を促進することを目的としたIMO研究開発ファンド（International Maritime Research Fund, IMRF）の設立が提案された。今回の会合で審議した結果、引き続き次回MEPC 78で審議を行うこととされた。

##### 2.1.4 IMO GHG削減戦略の見直し

2015年に採択されたパリ協定では、世界の平均気温上昇を産業革命以前から2℃以内に抑え、1.5℃に抑える努力をするという目標が盛り込まれている。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）によると、気温上昇を1.5℃に抑えるためには、2050年までにGHG排出量を実質ゼロ（ネットゼロ）に抑える必要があるとされている。

今回の会合では、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ことを認識し、これを踏まえて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た。

##### 2.1.5 EEDIにおける風力補助推進システム

MEPC 65において、革新的技術の導入による省エネ効果をEEDI値に反映するため、革新的省エネ技術ガイダンス（MEPC.1/Circ.815）が策定され

ている。

今回の会合では、今後採用が見込まれる風力補助推進システム (Wind Assisted Propulsion System, WAPS) について、その省エネ効果をEEDI/EEXI値に反映するために同ガイドランスの改正が承認された。

## 2.2 バラスト水管理条約

### 2.2.1 バラスト水処理装置搭載時の性能確認

バラスト水処理装置の搭載試験時に、処理済バラスト水の分析を行うことで処理装置の動作確認を行うことを義務付けるバラスト水管理条約の改正がMEPC 75で採択されている。この改正により、2022年6月1日以降に実施される搭載試験では、バラスト水処理装置搭載時の試運転に関するガイドランス (BWM.2/Circ.70/Rev.1) に従い、処理済みのバラスト水の分析を行うことが要求される。

今回の会合では、当該規定の対象となるバラスト水処理装置を明確化するための統一解釈が承認された。この統一解釈では、バラスト水処理装置の搭載検査完了日が2022年6月1日以降の場合に、試運転時にバラスト水の分析が必要となることが明確化されている。

### 2.2.2 水質に問題がある際の処理装置の利用

バラスト水処理装置の使用について、システム設計制限 (System Design Limitation, SDL) を超え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、ガイドランスの作成が検討されている。

今回の会合では水質に問題のある寄港地においては、BWM.2/Circ.62に規定するContingency measuresに沿った対応とすることが基本合意され、ガイドランスの詳細な規定について、次回のMEPC 78に向け更に検討を行うことになった。

### 2.2.3 経験蓄積期間の延長

バラスト水管理条約発効後の導入期に、条約運用に関する課題を情報収集し、課題の解消を図るための経験蓄積期間を設けることが合意され、MEPC 71において経験蓄積期間中の作業計画等を明記したMEPC決議 (MEPC.290(71)) が採択された。この決議では、経験蓄積期間を①課題に関する情報収集、②情報分析、③条約要件のレビュー、の3つのステージに分割して作業を行うことが規定されている。

今回の会合では、コロナ禍の影響により①の課題に関する情報収集が滞っていたことから、経験蓄積期間を2年延長し、2024年秋までとすることが提案された。審議の結果、収集した情報の分析結果が報告される次回MEPC 78にて延長の是非を検討する

ことが合意された。

## 2.3 大気汚染防止

### 2.3.1 排ガス浄化装置ガイドラインの見直し

MARPOL条約 附属書VI 第14規則では、船舶から排出される硫黄酸化物 (SO<sub>x</sub>) を削減するために、硫黄分濃度規制値に適合する燃料油の使用、または代替措置、例えば主管庁によって承認された排ガス浄化装置 (EGCS) を使用する必要がある。このEGCSは、技術基準、及び認証方法を定めたEGCSガイドライン (MEPC.289(68)) に適合したものとすることが必要である。

今回の会合では、汚染防止・対応小委員会 (PPR) による同ガイドラインの見直し作業の報告を受け、用語の明確化や技術要件の修正を加えた同ガイドラインの改正が採択された。この改正ガイドラインは、2022年6月1日以降に起工する船舶に搭載されるEGCS、2022年6月1日以降に納入契約されるEGCS (納入契約日が無い場合には実際の納入日)、及び2022年6月1日以降にEGCSに実質的な変更があった場合に適用される。

### 2.3.2 排ガス浄化装置が故障した際の対応

MEPC 74では、排ガス浄化装置 (EGCS) が故障した際の対応を示すガイドランス (MEPC.1/Circ.883) が策定された。このガイドランスでは、システムの不具合が1時間以内に復旧できない場合は故障と判断すること、故障が発生した際には旗国及び寄港国主管庁に報告し、判断を仰ぐよう勧告している。

今回の会合では、当該ガイドランスの適用対象となるEGCSの明確化と、故障したまま目的の航海を継続する際には、適切な対応の決定のために、その旨を関連する寄港国に通知すること等を規定したガイドランスの改正が承認された。

## 2.4 その他 (海洋プラスチック廃棄物)

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、国連の調査によれば、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。この問題に対し、船舶から排出される海洋プラスチックごみの発生原因や発生状況を把握するために、海洋プラスチックごみに関する調査を実施することが合意された。

今回の会合では、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。

### 3. MSC 104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 104で採択された主要な義務要件は以下の通り。

- (1) 1988年のLL議定書及びIGCコードの改正  
貨物船の浸水時の残存要件で考慮すべき水密戸を明確にするための1988年のLL議定書27規則(13)(a)及び関連するIGCコードの改正。

#### 3.2 SOLAS条約及び関連コードの臨時的な改正サイクル

SOLAS条約の改正は、通常4年毎に発効することになっている。また、改正の採択から発効までの最短期間は18ヶ月と定められている。これらの規定によると、2024年に発効するためには、今回のMSC 105（2022年4月）において条約改正を採択する必要がある。MSC 106以降で採択された条約改正は2028年に発効することになる。

しかしながら新型コロナウイルスの感染拡大により、本来2024年1月1日に発効する予定であった改正案の承認・採択のための最終化作業が遅延している。

この状況に鑑み、2024年7月1日より前に採択されたSOLAS条約の改正案については2026年1月1日を発効日とする臨時的な改正サイクルを設けることが合意された。

#### 3.3 GMDSS (Global Maritime Distress and Safety System) の近代化

GMDSSに関連する要件及び基準が長期にわたり更新されていなかったため、IMOにおいてGMDSSの近代化について長年審議が行われてきた。

今回の会合では、SOLAS条約 II-1, III, IV, V章及び付録（証書）、1988年のSOLAS議定書、1994及び2000 HSCコード、1983及び2008 SPSコード並びに1979、1989及び2009 MODUコードの改正案が最終化、承認された。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。本改正案が次回MSC 105で採択された場合、2024年1月1日より適用となる。本改正の要点は以下の通り。

- (1) 「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。
- (2) SOLAS条約 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条約 IV章に移設。
- (3) 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、船舶の簡易航海情報記録装置（S-VDR）及びVDR等の性能基準が改正された。

#### 3.4 遠隔検査に関する新規検討項目

近年の新型コロナウイルスの感染拡大により、船上検査への検査員の立会が阻害・制限される場合がある。この状況に対応するため、検査員の立会検査に代えて、情報通信技術を活用した遠隔での検査が一部実施されている。

今回の審議では、2024年の作業完了を目標に遠隔検査の適用に関する指針を検討していくことが合意された。次回III小委員会（2022年7月）より審議が開始される。

#### 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、代替燃料として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。

時間の制約上、今回の会合ではこの提案に関する審議は行われなかった。次回のMSC 105（2022年4月）で審議を行い、CCC小委員会（2022年9月）からアンモニア燃料船の安全対策の検討が開始される見込み。