解説

安全な海上輸送の実現に向けて 独立行政法人海上技術安全研究所の取組み

海上技術安全研究所 谷澤克治, 小田野直光

海上技術安全研究所では、海上輸送の安全確保のための研究活動を精力的に実施している。本稿では重点的に実施している研究課題として、船体の構造強度基準の策定に関する研究、衝突・座礁の防止など操船に係わる安全性向上のための研究、復原性基準策定等の荒天波浪中を航走する船舶の安全性向上のための研究、危険物・放射性物質等の海上輸送に係わる安全性向上のための研究、海難事故再発防止に対する取組みなどを紹介する。

I. はじめに

我が国の輸出入貨物のうち、どの程度が船舶によって海上輸送されているかご存知であろうか。平成20年の海事レポートによると、実に99.7%が海上輸送されている。海上輸送は食料やエネルギー・鉱物資源の輸入や自動車等の工業製品の輸出に欠かせないものであり、国民生活を支える生命線である。安全で安定的な海上輸送の確保は四面を海に囲まれた我が国にとって最重要課題のひとつであるといえよう。

ところが、船舶の重大海難事故が世界中で発生しており、海上輸送の安全性はまだまだ十分とはいえない状況にある。例えば、「ナホトカ号」事故(1997年)、「エリカ号」事故(1999年)、「プレステージ号」事故(2002年：第1図)では、いずれも船体折損から引き起こされた大規模油流出が立て続けに起こり、沿岸国に甚大な環境被害を及ぼした。バルト海における RORO 客船「エストニア号」の転覆事故(1994年)では900人近くの人命が失われる大惨事となった。国内においても、底引網漁船「第五龍寶丸」の転覆事故(2000年)では乗組員14人が行方不明になるなど、漁船の転覆事故が後を絶たず毎年人命が失われている。また、ジェットフォイル旅客船「トッピー4」の浮遊物との衝突事故(2006年)では、多数の旅客が腰椎圧迫骨折、腰椎破裂骨折などの重傷を負っている。今年に入ってからでも、野島崎沖で発生したイージス艦「あたご」と漁船「清徳丸」との衝突事故(2月)で2名が行方不明に

明に、明石海峡付近で発生した貨物船やタンカーなど3隻が絡む衝突事故(3月)では、貨物船「ゴールドリーダー」が沈没して3人が死亡し、1人が行方不明になっている。

以上に述べたように、海上輸送の安全性はまだまだ不十分であり、海上輸送の安全確保は国民の命と財産を守るために不可欠であるのみならず、海難事故に伴う油汚染等の環境被害を未然に防止する観点からも非常に重要である。そこで、独立行政法人海上技術安全研究所(以下、海技研)では、第2期中期計画の重点課題に「海上輸送の安全確保」を設定して研究活動を展開している。本稿では、主に安全確保の切り口で海技研の活動を紹介するとともに、使用済核燃料等の危険物の海上輸送に関する安全確保への取組みについても併せて紹介したい。

II. 構造安全性基準

船舶の荒天下での折損事故等を未然に防止するには、

第1図 プレステージ号折損事故(2002年)(事故報告書より)

Activities of National Maritime Research Institute to Create the Basis for the Maritime Safety Improvements : Katsuji TANIZAWA, Naoteru ODANO.

(2008年 10月 6日 受理)

合理的な構造安全基準の整備が重要な対策の一つである。これまでも重大海難事故が発生するたびに国連の組織IMO(国際海事機関)が国際規則を整備し、海上安全の確保と海洋汚染の防止に向けて中心的役割を担ってきた。しかし、近年の重大海難事故の多発を受けて、リスク評価により均一な安全レベルを担保するより合理的な安全基準の整備が求められている。海技研では以下に述べるGBSの概念による合理的で体系的な船体構造強度基準を提案すべく研究を実施している。

1. 目的指向型構造安全基準

目的指向型構造安全基準：GBSとはGOAL-BASED NEW SHIP CONSTRUCTION STANDARDSの略称で、船舶の構造設計・建造を対象にした基本的理念を構築する基準である。これに対し、造船所が船舶の設計に用いる構造設計規則は、要求部材寸法を規定する仕様の規則であり、世界の主要な船級協会(我が国では日本海事協会)がこれを定めている。GBSは船級協会が定める詳細な仕様の規則を作成するための目標(ゴール)や機能要件等を規定した規則、すなわち規則作成のための規則である。

IMOにおけるGBSの審議では、国際的に整合性を確保した構造設計規則を整備していくために、構造設計基準の体系的整理に取り組んでいる。このような基準の体系化は、すでに原子力など他分野でも取り組まれているものである。IMOで現在合意されている基準体系は第2図に示す5階層システムより構成されている。船級協会等が策定する構造設計規則(第4階層)の上位に、設計理念(ゴール(第1階層)、機能要件(第2階層))と適合性を検証するスキーム(第3階層)を新たに確立する体系となっている。第3階層の審議では事故をゼロに抑えることが現実的に不可能であることを前提に、社会的に許容できる安全レベルをどの程度に設定すべきかといった点が審議されている。

海技研では安全レベルの設定にあたり、既存の設計規則により設計・建造された船舶の安全レベルとの整合化を図る、いわゆるルールキャリブレーションと呼ばれる手法を採用し、船体が中央で折損するような、船体構造上想定される最も危機的な状態の最終強度を対象に解析

調査に取り組むなど、構造信頼性解析を系統的に実施¹⁾するとともに、IMOにおける船舶が達成すべき安全レベルに関する国際的合意に向け、機動的に取り組んでいる。

2. コンテナ船の大型化への対応

世界的規模で海上輸送量が増大し続ける中、コンテナ船の大型化が進み、「EMMA MAERSK号」のように積載数が11,000 TEU(20フィートコンテナ換算の積載数)を超え、全長が400 mに迫る超大型コンテナ船が登場している。設計や安全基準の観点から見た場合、想定しているコンテナ船は6,000 TEU積み程度であるため、超大型コンテナ船は基準の想定外となっている。また、これらを設計・建造するためには、板厚の増加あるいは鋼材の高強度化が避けられないため、使用実績のない板厚および鋼材強度の構造部材に対する適切な評価を行った上で新しい構造基準を設定することが不可欠となっている。

これらの問題を合理的に解決するためには、鋼材強度の確保、荷重と構造強度評価から工作の問題まで極めて多岐にわたる検討が必要になる。とりわけ、構造部材ごとの適切な材質選定や十分な構造強度の確保のためには、構造強度評価の入力である荷重の推定精度の重要性が従来以上に増してくることも明らかである。しかしながら、大型化は船体剛性の相対的低下をもたらし、船体が弾性梁として出会い波と同調して振動するスプリング現象が発生することも懸念される。また、大型化に伴い船首船側が大きく張り出すといった船型上の特徴から、荒天中では波高に対する船体応答ならびに波浪荷重の非線形性が顕著になってくる。

海技研ではこれら非線形影響や船体弾性影響を加味した6自由度の船体運動/波浪荷重計算法を開発した²⁾。6自由度に対応できることから、斜め波中で船体に作用する振りモーメントやホイッピング(波が船首部を叩くスラミングという現象に伴う船体振動応答)を計算することも可能である。

Ⅲ. 衝突・座礁防止

海運を取り巻く状況は大きく変化しつつある。現在、他の交通モードと同様に、乗組員の削減が進められているほか、内航海運においては船員の高齢化が進み、外航海運においては外国人船員が増加した。これにより船員の負担が増え、スキル維持も困難となり、ヒューマンエラーによる海難事故の発生が後を絶たない。一方、船舶の大型化、高速化、海域の輻輳化が進んだことにより、衝突・座礁事故に対する潜在的危険も増大するとともに、1回の事故の影響が大きくなっている。

このような状況に対応するため、優秀な船員の育成確

第2図 GBS 5段階システム(基準の体系化)

保のほか、経験の少ない船員による安全な航行を実現する、単純でわかり易い航海支援システムの開発が課題となっている。まず、船舶の自律的航行機能の向上には、①電子海図表示や衝突・座礁警報機能等による状況認識支援、②衝突危険状況表示や電子海図上への避險線(入ると危険な領域を示す線)表示等による航行判断支援、③設定航路上を自動航行させるトラックパイロット等による操船支援の向上等が挙げられる。また、陸上から船舶への航行支援機能の向上には、④海上交通センターによる海域監視・管制、航行関連情報の提供、⑤船上機器モニタリングなどによる陸上からの船舶管理等が挙げられる。海技研では、これらの支援技術に関する研究を通じて、関連国際規則・国際標準の策定支援、新しい航海支援システムの提案を行い、環境変化に伴う諸問題に対応している。また、以下に述べる e-Navigation 構想にも積極的に参画し、海上交通の ICT(情報通信技術)化を推進している。

1. e-Navigation

海上輸送における運航システムの電子化・情報化は他の交通モードと比べて大きく遅れている。このため、IMO では海上安全委員会の下部組織である航行安全小委員会(NAV 小委員会)を軸に、情報通信技術を中心とした技術革新を総合的に反映させた e-Navigation の戦略構築および関連サービスの導入作業を行っており、海上輸送の安全性および効率の向上、環境保護、保安を目的に、新旧システムを有機的に活用した新しいサービスの提供を目指している。現在、e-Navigation 構想の状況は、2008年でその戦略策定を終え、2009年度から4年計画で具体的なサービスの導入計画の検討に入る。

海技研は、海難分析から必要となるサービスを抽出するとともに、サービス構築のためのロードマップを航行安全小委員会に提案するなど、e-Navigation 戦略構築に積極的に関わってきた。導入計画の検討においても積極的に参画し、e-Navigation 関連サービス実現を目指す³⁾。

2. 新しい航海機器の開発・評価

海技研では、自律的航行機能の向上を目的に、状況認識、航行判断、操船支援の各機能を対象にして各種の航海機器の開発を行っており、操船者の最も重要としている目視情報にマッチする形で情報提供を行う目視認識支援装置や先進航行安全支援システム(INT-NAV)の開発を行った。また、現在、遭遇船舶との航行意思疎通を支援する協調型航行支援システムの開発を行っている⁴⁾。協調型航行支援システムは、自動船舶識別装置(AIS)を利用し、遭遇船舶間で避航方法を矢印等でレーダ画面上に重畳表示するものである。表示例を第3図に示す。これにより従来の VHF 無線より容易に意思疎通が行える

第3図 協調型航行支援システムの表示例

ほか、言葉の障壁や誤認等の発生を低く抑えることができると期待されている。

Ⅳ. 転覆事故防止

転覆事故に対する安全性を確保するためには、十分な復原性能を保持するとともに、適切な操船・運航を行う必要がある。復原性能に関しては、国内規則である船舶復原性規則および国際規則である IMO の非損傷時復原性コード(IS コード)において基準値が定められており、規則が適用される船舶に関しては一定以上の復原性能が確保されている。また IMO においては、転覆に至る危険な状況を避けるための操船ガイダンスも定められている。以下、最近の IMO における復原性基準の検討動向と海技研の取組みについて紹介する。

IMO では、1998年に北太平洋上において発生したコンテナ船のパラメトリック横揺(コンテナ船などのスマートな船体形状を有する船が向波や追波中を航走する際に発生する大振幅横揺で、1波ごとにブランコをこぐように横揺角が増加し、大振幅に至るのが特徴)に伴うコンテナ流出事故等を契機に、2002年から IS コードの改正が審議されてきた。その結果、短期的な課題とされた従来非強制的勧告であった IS コードの一部強制化が昨年度の会合で合意され、現在、2010年7月発効予定で条約の改正手続きが進められている。

一方、長期的な課題とされた性能要件化された復原性基準の策定に向けた検討が昨年より本格的に開始され、今年度の会合では、新世代非損傷時復原性基準としてその基本的な枠組みが合意され、2012年完了を目標に検討を進めることとなった。

新世代非損傷時復原性基準は、現行の IS コードで安全性が十分に担保されていない、機関故障時を想定した操船不能状態の復原性、復原力変動問題(パラメトリック横揺、追波中復原力減少)、操縦性関連問題(ブローチング)の3つの危険モードに関して策定されるものであり、危険性の有無を簡易に判定する基準(第1段階基準)と数値計算を用いたより詳細な復原性能の直接評価基準

第4図 パラメトリック横揺の水槽実験

(第2段階基準)で構成される。

このようなIMOにおける審議に対応するため、海技研ではISコードの強制化の際に導入された一部基準の代替評価のための標準模型試験方法を提案し、その検証を行うとともに、数値計算による復原性能の評価手法(操船不能状態の転覆確率計算、パラメトリック横揺のシミュレーション計算)の検討を行っている。

特に、パラメトリック横揺に関しては、波浪中における復原力変動に起因することから、現象把握のための自由航走模型を用いた実験⁵⁾に加えて、復原力変動量を計測する模型実験も行っており、シミュレーション計算の検証等に活用している。(第4図)

V. 危険物・放射性物質の海上輸送

我が国の経済活動上、一般に危険物と呼ばれるガソリン、硫酸、火薬等の輸送は不可欠である。基準に適合した容器に入れ、一般貨物船やコンテナ船で、あるいはケミカルタンカー、LPG船、LNG船に直接搭載することにより、危険物は大量に海上輸送されているのが現状である。また、原子力発電に関しては、新燃料(集合体および粉末)、使用済燃料、低レベル・高レベル放射性廃棄物等が海上輸送されており、核燃料サイクルを支えるうえで重要な役割を果たしている。

危険物輸送の安全確保は、国際基準に基づき、容器、表示等の運送要件および船舶の構造、設備等の技術基準が国内法令で定められているとともに、危険物を輸送する船舶に対して輸送前の検査や立入検査を行い、海上輸送時の事故防止対策を行っている。

海技研においては、放射性物質の海上輸送に係る研究として、放射線遮蔽および放射線計測技術を中心に研究を実施してきた。放射性物質の輸送はこれまでに安全の実績を積み重ねてきているが、今後、国際的に放射性物質輸送のセキュリティ強化が図られていくこと、国内では、原子炉の廃止措置に伴う放射性解体廃棄物が大量に海上輸送されることが予想されることから、海技研では、放射性物質の安全輸送を支える基盤的な研究を従来

よりも幅広く実施しているところである。最近では、海上輸送事故時の環境影響評価システムの構築、輸送のリスク評価に関する研究、テロ等の不法行為に対する船舶の保安向上に関する研究に取り組んでおり、本稿では近年、重点的に取り組んでいる研究の主要な成果を紹介する。

1. 輸送容器の遮蔽安全評価に用いられるデータおよび手法に関する研究

我が国では、使用済燃料輸送容器の設計承認等の安全審査における遮蔽安全評価には、離散座標法による輸送計算コード(1次元用:ANISN, 2次元用:DOT)が主に使用されている。これらの輸送計算コードには中性子・ガンマ線断面積セットが必要となるが、従来より米国の評価済核データライブラリー ENDF/B-II に基づく DLC 23/CASK が広く用いられている。この断面積セットは1973年に作成されたものであり、特定の条件では計算精度に問題があることがわかっており、最新の核データライブラリーに基づくデータセットが望まれている。すでに、最新の評価済核データである JENDL-3.3 に基づく、輸送容器遮蔽評価用断面積セット SFCX-J 33 が開発されており、海技研では、1次元平板体系および輸送容器モックアップ体系において²⁵²Cf 線源を用いたベンチマーク実験を行い、新しい断面積セット SFCX-J 33 の検証を行った。ベンチマーク実験の結果と SFCX-J 33 を用いた解析結果はよく一致しており、SFCX-J 33 は輸送容器体系において十分な精度を有することを確認した⁶⁾。今後、輸送容器設計のみならず、幅広い分野での活用が期待される。

また、放射線遮蔽解析の分野では、計算機の性能向上に伴い、モンテカルロ法が広く使用されるようになっていく。上述のように、現在、輸送容器の安全審査においては輸送計算コードが使用されているが、2次元のモデル化をしているために、種々の安全裕度を見込んだ評価をしているのが現状である。近年、炉心の高燃焼度化が進んでおり、2次元モデルによる評価の結果を用いた場合には、実際には輸送可能なまでに使用済燃料が冷却されているにもかかわらず、より長期間の冷却が求められることになる。そのため、海技研では、モデル化の誤差がほとんどないモンテカルロ法を輸送容器の安全審査の遮蔽安全評価に適用可能であることを検証するためのベンチマーク実験を、モックアップ模型や実機輸送容器を使用して実施している。これらの実験と解析を比較することにより、モンテカルロ法を用いる際に考慮すべき安全裕度を明らかにするとともに、モンテカルロ法による輸送容器の遮蔽解析手法のガイドラインを作成することを目指している。これらの研究成果は、高燃焼度使用済燃料の効率的な輸送と最新の科学的知見に基づく合理的な安全審査に資するものと期待される。

2. 海上輸送事故時の環境影響評価システムの構築

平成11年のウラン加工工場での臨界事故を契機に、平成12年に原子力災害対策特別措置法が施行され、放射性物質の輸送についても原子力災害としての対応が求められることになった。そのため、海技研では、国土交通省からの受託研究として、放射性物資の海上輸送時に事故が発生した際の環境影響評価システムを開発した⁷⁾。このシステムは、平成17年度より、国の核燃料物質等の海上輸送時の災害対応に組み込まれており、事故時において、海技研が運用する体制が構築されている。海技研においては、短時間で、環境影響評価を実施し、国土交通省がとる事故対策措置を迅速かつ的確に支援することが求められている。

開発した環境影響評価システムの概念を第5図に示す。システムは、気象・海象等のデータベースのほか、大気拡散解析、海洋拡散解析、船内被ばく線量評価解析のための計算プログラムで構成されている。システムは逐次、シミュレーションプログラムのさらなる高度化を図っており、大気拡散解析では、港湾付近での事故を想定し、陸上地形並びに海上および地上の大気の相互作用を考慮できるよう改良するとともに、海洋拡散解析で

は、海流の流速・流向予測データを活用した高精度で高速な解析システムを構築中である。これらの成果は、事故時の環境影響評価のみならず、テロ等の不法行為が発生した際の環境影響評価にも活用されることが期待される。

Ⅵ. 海難事故解析センターの開設

最後に、海技研が9月1日に開設した「海難事故解析センター」を紹介して本稿を締めくくりたい。

海難事故に際しては、客観的かつ定量的な事故情報を迅速に収集するとともに、必要に応じて事故再現実験を行い事故シナリオを検証し、事故原因を解明することが再発防止策を立案する上で大変重要である。2008年10月に国土交通省に運輸安全委員会が設置されたことを受け、海技研では海難事故解析センターを開設し、重大海難事故に対して即応体制を整えた。本センターは、事故情報収集、事故解析、情報発信の機能を担っており、重大海難事故発生に際しては、まず、センター長、副センター長、上級海難分析研究員等からなる情報分析会議を招集し、迅速な情報発信を行うために必要は対応方針を議決する。さらに、詳細解析が必要な場合には、第6図

第5図 事故評価システムの概念

第6図 海難事故解析に活用される海技研の主要施設

に示す主要施設等を活用し、事故再現や各種状況のシミュレーションを行うことにより、国等における再発防止対策の立案等への支援を行っていく計画である。

—参考資料—

- 1) 平方勝, 他, “船舶の構造信頼性評価についての技術的課題”, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第6号, (2008).
- 2) Y. Ogawa, *et al.*, “The effect of a bow flare shape on the water impact pressure”, *Int. J. Offshore Polar Eng. (IJOPE)*, **16**[2], 112-117 (2005).
- 3) 今津隼馬, 他, “航海情報の統合と表示に関する研究”, 日本航海学会論文集, **109**, 133-140 (2003).
- 4) 南真紀子, 他, “AISを用いた協調型航行支援システムの検討”, 日本航海学会論文集, **120** (2009), 掲載予定.
- 5) H. Taguchi, S. Ishida, H. Sawada, M. Minami. “Model Experiment on Parametric Rolling of a Post-Panamax Containership in Head Waves”, *Proc. 9th Int. Conf. on Stability of Ships and Ocean Vehicles*, Vol. 1, p.147-156 (2006).
- 6) 大西世紀, 他, “ ^{252}Cf 核分裂中性子源を用いた遮へい透

過実験及び二次元離散座標計算コードによる輸送容器評価用断面積セット SFCX-J 33の適用性に関する研究”, 海上技術安全研報, **7**[3], 1-20, (2007).

- 7) N. Odano, *et al.*, “Development of Supporting System for Emergency Response to Maritime Transport Accidents involving Radioactive Material”, PATRAM 2004, (2004).

著者紹介

谷澤克治(たにざわ・かつじ)

海上技術安全研究所
(専門分野)船舶工学, 耐航性能, 波浪荷重

小田野直光(おだの・なおてる)

海上技術安全研究所
(専門分野)放射線工学, 放射性物質輸送工学

□ 目安箱への投書 □

2005年10月

日本原子力学会編集委員会

編集委員会は、読者・会員・投稿者・査読委員等からのご意見、ご提案を頂き、よりよい学会誌・論文誌編集活動を目指すべく、意見窓口「目安箱」を設けております。

- ・学会誌・論文誌の企画、編集、掲載記事・論文に関すること
- ・論文査読方針・審査方針およびシステムに関すること*
- ・新刊図書の書評の推薦

などについてのご意見・ご要望がございましたら、学会ホームページ <http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/publication/meyasu.html> または E-mail (宛先 aesj2005meyasu@aesj.or.jp) にてお寄せ下さい。編集委員会にて検討後、担当編集委員より回答させていただきます。

学会誌、論文誌の編集活動への皆様の積極的なご参加をお願いいたします。

*個々の査読コメント等に関するお問合せ、ご意見等については受け付けかねますのでご了承下さい。