

海上輸送の安全・安心への取り組み



伊藤 博子
Hiroko Itoh

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所

海洋リスク評価系
副系長



岡 正義
Masayoshi Oka

構造安全評価系
構造解析研究グループ長

[専門分野] システム工学, [専門分野] 船体構造強度,
海上交通工学 波浪荷重

海上技術安全研究所では、課題解決型研究所として、①海上輸送の安全確保、②海洋環境の保全、③海洋の開発、④海上輸送の基盤的技術開発の4分野に関する行政・社会ニーズに即した課題に対して、研究者の豊富な専門的知見と質の高い技術力および大型研究施設を活用して的確なソリューションの提供を行ってきました。ここでは最近の海上輸送の安全確保への取り組みとして、多数の船舶の運航が関連する海上交通の安全性向上を目指す「推薦航路」に関する研究と個々の船舶の安全性向上を目指す「船体構造デジタルツイン」に関する研究を紹介します。

海上交通の安全・安心

— 推薦航路 —

従来の安全対策

船舶は多くの物資や人を一度に運ぶことができ、環境負荷が非常に低い優れた輸送手段です。世界の海上輸送量は年々増加しており、その中で日本は、世界の船腹量(海上輸送の能力)の9%にあたる商船隊をもつ海運国です。日

本の貿易量の99%以上(重量ベース)は海上輸送であり、国内輸送においても船舶が多く用いられることから、日本近海では船舶の交通量が非常に多くなっています¹⁾。

船舶の交通が多くなれば、衝突のおそれが増加します。東京湾、伊勢湾、大阪湾のような大都市近郊の海域、あるいは瀬戸内海や関門海峡のように狭

くて交通の要衝となる海域は混雑しており、昔から「ふくそう(輻輳)海域」とよばれています。そうした場所では、さらに地形や潮流といった環境的な要因が加わるなどして事故が頻発していました。

1973年(昭和48年)の海上交通安全法は、ふくそう海域の中に航路という通り道を定めて、向きや時間帯によって許される通り方を決めています。また、陸上の海上交通センターでは、そこを航行する船舶を見守り、必要に応じて情報を提供する活動が続けられてきました。このような手厚い安全対策により、ふくそう海域での事故は徐々に低減しています。しかし、航路を計画するためには海域の交通を調査して把握しなくてはなりませんし、船舶を見守り情報提供を行うためには正確な最新状況を把握しなくてはなりませんから、長い間、対応が可能な海域は、主要な観測手段であるレーダーや目視で監視できる海域に限られてきました。

準ふくそう海域の安全

2002年に国際海事機関で行われた

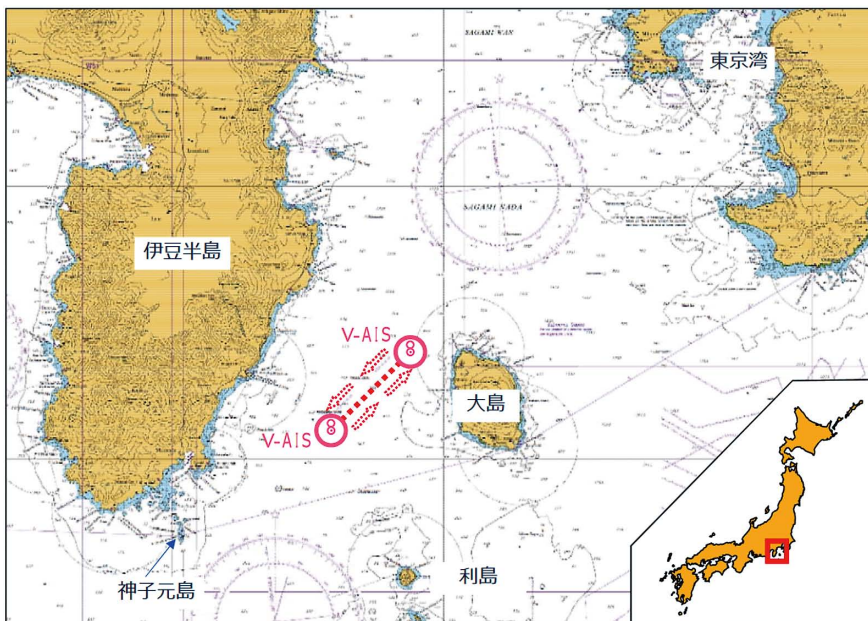


図1 伊豆大島西岸沖の推薦航路²⁾(海上保安庁提供)

海上人命安全条約の改正によって、国際航海をする300総トン以上の船舶、国際航海をしない500総トン以上の船舶、国際航海をするすべての旅客船に、船舶自動識別装置（AIS：Automatic Identification System）の搭載が義務づけられました。この装置は、VHF帯の電波によって、船舶に固有の番号や船名、位置、速力、針路、目的地といった船舶の属性と運航状態に関する情報を周囲に向かって発信するものです。

このAISを用いて、各々の船舶が自船情報をデジタル信号として送信するようになりました。電波は一般に数十キロ程度離れたところでも受信できるので、遠く離れた船舶どうしても相手の状態がわかります。さらに、電波は陸上や衛星に配した基地局でも送受信でき、各地で受信したデータを統合すれば世界中のAISを搭載した船舶の動静が簡単に把握できるようになりました。

船舶へのAIS搭載率向上とともに、これまでは観測が難しかった沿岸域でも、海上交通が混雑している様子が明らかになりました。海上保安庁は、東京湾の沖から石廊崎沖^{いろう}、伊勢湾沖、潮岬沖^{しおの}などを経て瀬戸内海に至る、ふくそう海域を結ぶ海域を「準ふくそう海域」とよび、第3次交通ビジョンの課題としてその安全対策を掲げました。とくに東京湾の南に広がる大島西方の海域は東京湾へ出入する船舶が互いに正面から行き会う様子が観察され、また実際にそのような形で出会った船舶の事故が多発していたことから、国内で初めて船舶の流れを整理する対策が検討されることになりました。

推薦航路の導入

伊豆半島と大島で挟まれるこの海域は、過去に航路が導入されてきたような狭い海域とは異なります。陸と島の距離は20キロ以上ありますし、水深は数百メートルと深く、浅瀬のような

地形的な影響もあまりありません。多くの船舶が航行するとしても、通航可能な幅は十分に広いといつてよいでしょう。また、ここは豊かな漁場でもあり、深海魚であるキンメダイなどの魚が盛んに行われています。漁では、漁船は一本の縄に釣り針のついた枝縄をつけて海中におろして魚をとるため、その間漁船は身動きがとりづらく、商船が近づくことを嫌います。漁船は漁港と漁場の間を往來しますから、漁船による交通もあり、この海域では漁船が関係する事故も発生しています。

商船の関係者も漁船の関係者も安全に

海が利用できることを望んでいます。日本海難防止協会は、これから導入される航路をどのように設定したら皆にとって良いかを話し合う有識者委員会を開催し、関係者の意思疎通と合意形成を図りました³⁾。海上保安庁と当所は、共同研究を行って、航行の自由度を生かすことができるよう推薦航路とよばれる中心線を用いた対面航行の方式を選定しました⁴⁾。そして、具体的な中央線の設置位置の案をいくつか出し、それぞれの案を導入した場合に、船舶の危険な出会いを現状と比較してどの程度減らすことができるか、そして商船がどの程度遠回りしなくてはならないかを、シミュレーションを

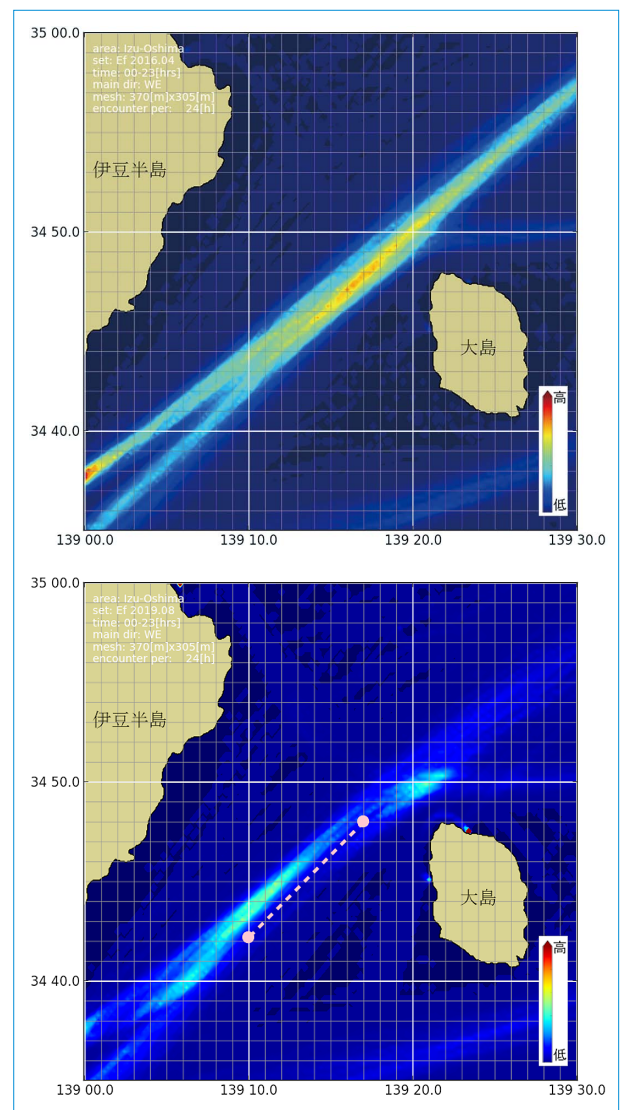


図2 東航船と西航船の遭遇頻度分布
(上：推薦航路導入前の様子(2016年4月), 下：導入後の最近の様子(2019年8月), 点線は推薦航路中央線)

用いて計算しました。委員会は、その結果を材料に検討を行い、最終的に選定する案を話し合いで図1のように決めました。

この海域は多くの国々の船舶が通航するため、推薦航路は国際海事機関に提案されました。そして採択を経て、2018年1月から運用されています。導入前後における安全性については、追跡調査が行われ、導入前と比較して正面方向からの出会いが抑制されていることが確認されています。図2は、導入前後における船舶の遭遇を細かい領域ごとに表したマップです。大島のすぐ西方で発生していた東航船と西航船の出会いが低減されていることや、現在でも遭

※地名は海上保安庁の海図に掲載する地名の表記方針に準じています。

遇が発生している場所がわかります。

追跡調査の結果は、別の海域で船舶交通を整理する方策を立案する際にも生かされています。現在、次の海域として、紀伊半島の南端にある潮岬沖の海域における船舶の流れを整理する方策が検討されています。

船舶の安全・安心 —船体構造デジタルツイン—

デジタルツインは、実空間にある物を、センサー計測や数値シミュレーションを用いてサイバー空間上に精緻に再現して将来の故障や変化を予測するもので、船舶分野では、機関の故障予知や燃費の評価、船体の余寿命予測などへの活用が期待されています。本節では、船体構造のデジタルツインについて説明します。

船体構造のデジタルツインと聞いてまずイメージするのは、船の疲労損傷や腐食衰耗の度合いを示す健全性評価だと思います。船体の健全性を正確に知ることは、メンテナンスコストの軽減あるいは売却価格の適正化に結びつくため、この機能への期待は高いと考えられます。大規模かつ複雑な構造体である船の健全性を限られた点数の計測データを元に推定するための技術開発が必要とされています。

一方、船の安全運航の観点からは、船体に作用する外力（荷重）と船体が持つ耐力（強度）の大小関係で決まる状態量の評価が必要になります。荒天を予測して危険な状態を回避するための運航支援機能、危険な状態でも安全にやり過ごすための操船支援を行う機能が必要になります。この機能は事故や損傷による油流出のリスク回避につながることから、当所のような中立機関が中心となり取り組んでいます。

また、船体構造デジタルツインの波及効果として、デジタルツインで蓄積

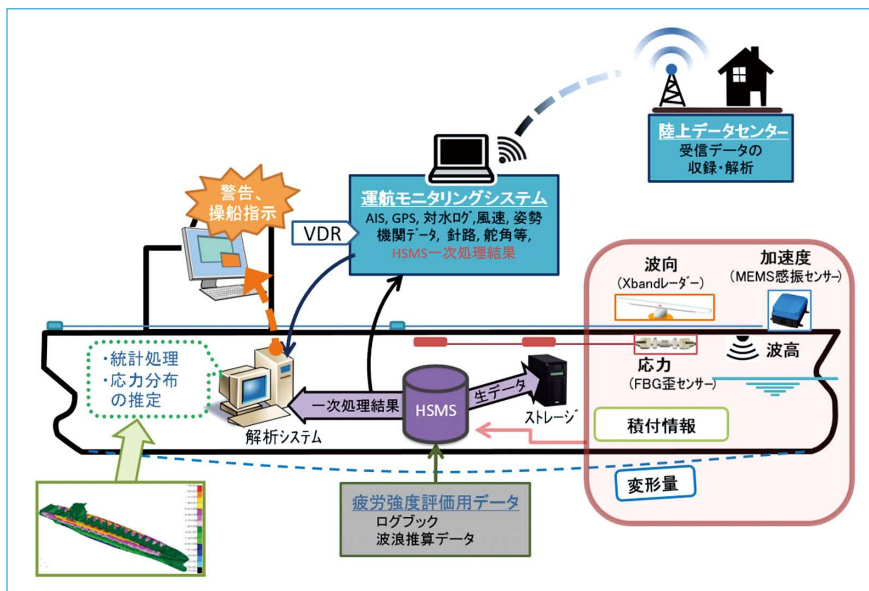


図3 統合型ハルモニタリングシステムの概念図

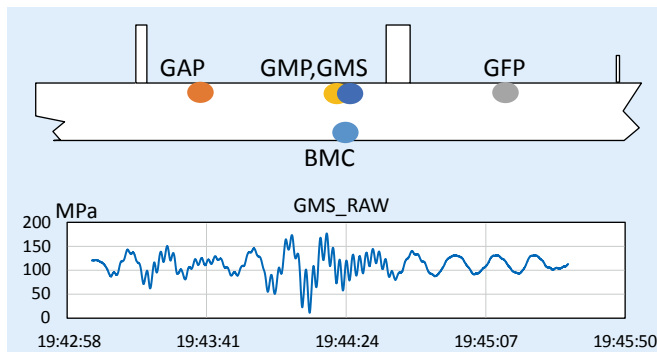


図4 14000TEU型コンテナ船で実施中のハルモニタリング
(上：歪センサー配置, 下：計測波形)

されたビッグデータを分析することによって船体設計上の不確定要素が徐々にわかるようになり、確率論に基づく船体設計や新しい設計規則の開発が期待されます。

当所では、以上に例示した機能をもつ船体構造デジタルツインの社会実装を目標に研究しています。そのためには、ハルモニタリングや数値シミュレーションの技術開発が必要になります。

ハルモニタリング

当所では、平成28年度より7か年計画で船体構造モニタリングシステムの開発に関する重点研究に取り組んでいます⁵⁾。重点研究で想定している統合型ハルモニタリングシステムの概念図を図3に示します。

この研究では、重大海難事故防止

を目的として、「実海域の波浪および船舶の状態監視（モニタリング）情報」に「船舶の構造応答特性など」および船陸間通信などを組み合わせ、操船者に対して、船速および針路決定などの操船判断に資するアドバイスを提供することを開発することを目指しています。またモニタリングで得られたデータを設計規則へフィードバックして、より合理的な設計規則の実現を目指しています。

当所は、日本郵船/MTIおよびジャパンマリンユナイテッドなどにおいて実施中のプロジェクト「14000TEU(20フィートコンテナ換算単位：コンテナ船の積載能力を示す)型コンテナ船でのハルモニタリングに関する共同研究」⁶⁾⁷⁾に参画しています。このプロ

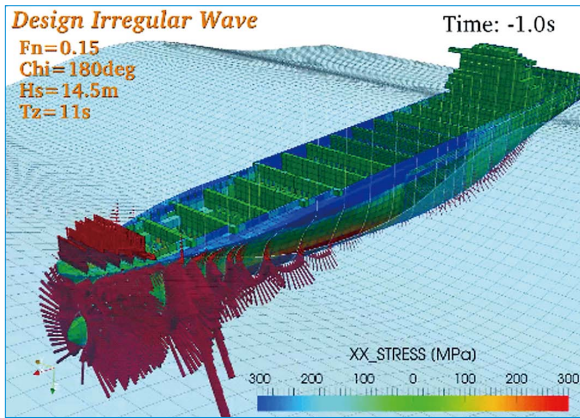


図5 波浪中シミュレーション
(ベクトル：水圧，コンター：応力)

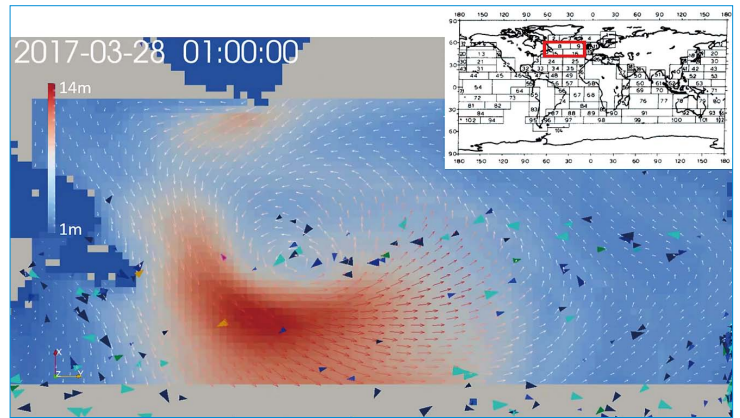


図6 北大西洋での船舶の遭遇海象
(マーカー：船の位置，コンター：波高，ベクトル：波向き)

プロジェクトでは連続建造された10隻の姉妹船でモニタリングを実施し、データ利用などについて検討を行っています。歪センサーの配置および計測波形の例を図4に示します。応力の時系列波形はホイッピング（高い波に当たって船体が振動する現象）が発生した例です。10隻の同型船において、船の運航情報を考慮して応力評価や疲労評価を行うことで、作用荷重に対する操船影響や、ホイッピングの影響を知ることができ、高精度な船体健全性評価を可能にしています。

シミュレーション技術

船体強度設計へのFEMなどシミュレーション技術の活用は汎用化しており、当所では、波浪荷重の予測と組み合わせ合わせた全船荷重構造一貫解析システム（DLSA：Direct Load and Strength Analysis）を開発しました。

図5にDLSAによる解析結果の例を示します。この例は非線形ストリップ法（波浪中での外力および船体運動を計算するシミュレーションプログラム）で運動・水圧を計算し、これを構造モデルに与えて構造解析を行い、波浪中応力応答を可視化した例です。コンターは船体長手方向の応力、船首部のベクトルは波から受ける圧力を表しています。現在、船体構造の崩壊解析を再現可能であるところまで開発が完成しています。

現状のハルモニタリングでは、図4に例示したように4～5点での応力計測が基本仕様となっています。長さが300mを超える船の状態量を得るには、計測点数が不十分であるため、数値シミュレーション技術を活用して不足した計測点数を補う技術の開発が求められます。波浪中での船体の応答から海象を逆算して全船応力のシミュレーションを行う手法や船体の主要な変形状態を基にして全船応力を推定する手法など、研究開発が行われています。また、船が出会う波とそのときの針路や船速および積載状態がわかれば、その情報を入力として数値シミュレーションを行うことで、全船応力を推定することができます。たとえば、近年、船舶へのAISの搭載義務化

（先述）によって、任意の船の位置情報がわかるようになりました。船の位置情報と波浪データとを紐付けることで、複数の船舶が嵐（図6の赤色のエリア）を回避する様子や遭遇した船の状況がわかります。遭遇した海象がわかれば、数値シミュレーションで応力値を得ることができるので、応力値に基づいて船体の安全性を評価することができます⁸⁾。

今後の展開

今後、船体構造デジタルツインの社会実装に向け、計測技術やシミュレーション技術など、各要素技術の高度化を行い、海運や造船、船級協会および大学などとの連携を図ることで、有効で利用価値の高いデジタルツインの実現を目指します。[RRR]

文献

- 1) 日本海事広報協会編：日本の海運 SHIPPING NOW 2019-2020, 日本海事広報協会, 2019
- 2) 海上保安庁：お知らせ, https://www.kaiho.mlit.go.jp/03kanku/ichigenka/pdf/suisenkoro_j.pdf (入手日：2019年10月10日)
- 3) 日本海難防止協会：伊豆大島西方海域における安全対策の構築に関する調査研究報告書, http://nikkaibo.or.jp/pdf/27_12.pdf (入手日：2019年10月10日)
- 4) 三宅里奈, 伊藤博子, 西崎ちひろ, 福戸淳司：海上交通シミュレーションシステムによる新しい航路指定の評価法の確立, 海上技術安全研究所報告, Vol.16, No.3, pp.268-282, 2017
- 5) 岡正義, 馬沖, 越智宏：船体構造モニタリングシステムの開発に関する研究, 平成30年度(第18回)海技研究発表会講演集, 2018
- 6) 平成29年度国土交通省 先進安全船舶技術研究開発支援事業「大型コンテナ船における船体構造ヘルスマニタリングに関する研究開発」, 2017
- 7) 米澤孝志：船会社における船体構造ヘルスマニタリングへの取り組み, Monohakobi Techno Forum 2017, 2017
- 8) 岡正義, 高見朋希, 馬沖：AIS データに基づく実運航船の波浪荷重推定—最大荷重に対する操船影響の評価法—, 日本船舶海洋工学会論文集第28号, pp.89-97, 2018