

我が国海事技術政策への貢献を目指す 船舶設計学領域

大阪大学 大学院工学研究科
地球総合工学専攻 船舶設計学領域 教授 梅田 直哉

1. はじめに

筆者は、水産庁水産工学研究所安全性研究室長より、大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻船舶工学講座の船舶設計学領域の助教授に1999年4月転任し、教授に2016年4月昇任した。この機会に、船舶設計学領域の研究の方向について紹介させていただく。この研究室は、1973年に、船舶操縦性の解析に今も世界的に使われる「野本の方程式」の野本謙作教授(故人)担当の船体運動学講座として新設され、その後浜本剛実教授(現名誉教授)担当の運動制御学講座となり、大学院重点化とともに船舶設計学領域となり、長谷川和彦教授担当を経て、現在に至っている。この間主に、船舶の操縦性能や復原性能といった低周波数域の船体運動について制御工学的観点に着目して研究が行われてきた。

2. 背景

我が国は、国土にエネルギー・鉱物資源が乏しく、原材料を輸入してそれを加工して輸出する貿易立国であり、また食料の約6割も輸入に頼っている。そして四方を海に囲まれた島国であるため、その輸出入の99.7%(重量ベース)は海上輸送によっている。このため海上輸送が途絶えると経済が成立しないことは第二次大戦で実証済みであり、先の東日本震災時にも核汚染の風評により外国船舶の寄港忌避が一時的に発生したことも記憶に新しい。海上輸送を支える商船隊を自国で運用し、その技術的基盤である造船技術の競争力を維持することが我が国経済の基盤となっている。

我が国は1956年に英国を抜いてから2002年に韓国に抜かれるまでの約半世紀にわたって新造船建造量で世界1位の座を占め、我が国経済の基盤を支えるとともに船舶輸出により外貨を稼いできた。その後韓国も中国に抜かれ、現在は中国、韓国に次ぐ第3位の建造量であるが、我が国の現在の建造量は世界

1位当時のピークであった1975年頃と同程度である。これは近年経済のグローバル化のため世界の海上荷動き量が右肩上がり増加してきたためである。ごく最近の中国経済の減速のため、中国や韓国の船舶受注は急落しているが、我が国は図1のように踏みとどまっており、2015年では韓国を抜いて世界第2位となっている。この原因のひとつにはアベノミクスなどによる円安があるが、それ以外に船舶の技術力の高さを国際競争力につなげるような技術政策を我が国が取っているためともいわれている。

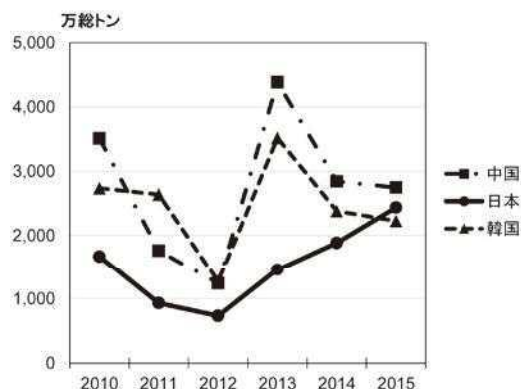


図1 最近の船舶受注量(国土交通省海事局資料)

船舶は、航空機同様に、国境を越えて全世界的に活動するため、その安全や環境の規制には1国の規制では意味がなく、国際条約によって統一的な規制が行われている。すなわち、タイタニック号沈没事故を受けて作られた海上人命安全条約やたびたびのタンカーによる油の流出事故を契機とする海洋汚染防止条約などである。国連の専門機関である国際海事機関(IMO)での国際交渉の結果としてこれらの条約は常に技術の動向に合わせて改正されており、改正されると条約締約国各国の国内法規がそれに従って改正されて実際の船舶にその規制が及ぶ。

このような国際的な船舶の安全・環境規制は、従来は経験則あるいは半経験則としての基準によって行われることがもっぱらであった。ところが、経済

効率の追求のスピードや環境意識の高まりから、経験則の改正に十分な事故経験の蓄積を待っていることが許されなくなってきた。このため物理則にもとづく第1原理による機能要件として安全・環境基準が作られるようになってきた。

3. 我が国の海事技術政策と大阪大学

このような科学的に策定される基準では、それにより船舶を建造、運航する際にも、技術力が要求され、その技術レベルが最終的な船舶の競争力を左右することになる。我が国の管海官庁（国土交通省海事局）は、このような新しい安全・環境基準の導入に対してIMOでの審議でイニシアティブを取る方針としている。これは、科学的な安全・環境基準の導入により世界の海上輸送が健全に発達することで我が国の経済の発展も期待できるためであり、そして世界1位を保持していた当時に培った技術力を我が国の産学がいまだ保持しているためでもある。すなわち、世界全体の発展に加えて、先行者利益（ファースト・ムーバーズ・アドバンテージ）も狙うという戦略であり、先の受注量逆転にも一定の効果をあげたとみる向きもある。

その一方、世界1位を明け渡した頃より、我が国の造船企業は統合により技術者を最小限に絞るなどの技術力の再構築を図っている。それとの関連もあって、我が国の船舶工学の学問を牽引してきた東京大学も学部レベルの船舶工学教育から撤退した。東京大学の撤退後、船舶工学の学部教育を続ける大学は、大阪大学、九州大学、横浜国立大学、広島大学、大阪府立大学、東海大学、長崎総合科学大学のみである。このため、我が国産学の船舶工学の技術力が我が国の官の積極的な政策にこれからも応えられるかといえば手放しに肯定できない状況にあるのも事実である。

大阪大学では、このような状況に対応すべく、国土交通省海事局長の要請（国海査第379号）を受ける形で、教育と研究の両面で新たな試みを2006年より開始した。教育面では、大学院博士前期課程で船舶工学における安全・環境規制関連科目を選択する履修メニューとして、「海事政策重点プログラム」を開始した。現行の博士前期課程では柔軟な履修を可能とするためそのような科目を履修せずとも船舶海洋工学コースでも修士（工学）の学位を取得できる

ようになっているためである。研究面では、そのようなプログラムを履修する大学院学生が修士論文などの研究テーマに船舶工学の安全・環境基準の策定を選ぶことを可能とする「海事戦略研究イニシアティブ」の設置である。この研究イニシアティブを受け皿として、船舶工学の安全・環境基準についての研究を受託研究や共同研究などとして引き受け、その成果となる新基準として学会やIMOに発信することが狙いである。特に、環境規制では狭義の船舶海洋工学の範囲を超える分野であることも珍しくないことから工学研究科の専攻横断型研究拠点のひとつとして指定のうえ援助を受けている。そしてこの二つの組織を両輪として、国の技術政策に貢献しようとしている次第である。船舶設計学領域はここに大きく貢献することを目指しており、本稿では筆者が准教授当時より取り組んできた研究より、その最近の具体例を挙げてご紹介したい。

4. 新しい船舶復原性基準（具体例その1）

船舶が船体に損傷を受けずに転覆するのは、荒天で波や風の外力の作用を受ける場合である。このような転覆を防ぐ能力を非損傷時復原性といい、IMOではこれまで1950年代までの事故統計をベースに経験的および半経験的な基準を定めている。この基準が現在の船舶には適用困難となりつつあることから、IMOは、第2世代非損傷時復原性基準として、主要な転覆モードごとに物理則に立脚した基準の策定を、2019年を目標に進めている。筆者など船舶設計学領域では、科研費のほか国土交通省外郭団体である日本財団や日本船舶技術研究協会などの外部資金により、2002年より研究を進めて、これらの基準案の提案を行ってきた。また、その検証実験の多くは、国立研究法人水産研究教育機構水産工学研究所の角水槽で実施した。

まず波による船体復原力変動に起因するパラメトリック横揺れに関しては、ポストパナマックス・コンテナ船のコンテナ流出事故を契機に、向波中のパラメトリック横揺れに関する研究が精力的に進められた。その中では、現象の明確化のために斜め向波状態も含めた長波頂、短波頂不規則波中での模型実験¹⁾を行うとともに、数値シミュレーションモデルの構築を行った。数値シミュレーションでは、フルードクリロフ仮説による復原力変動のみならず、造波流

体力の復原力変動への寄与や非線形性にもなう非エルゴード性も考慮して不規則向波中の模型実験結果を定量的に予測する段階に達している²⁾。以上の理解を踏まえて、現象の本質をつかむ簡易モデルの決定論的理論解析としての平均化法³⁾と波浪の統計解析を組み合わせた簡易基準を提案し2014年にIMOで原則合意された。

波乗り状態での操縦不能現象としてのブローチングに関しては、非線形力学系理論の応用として、追波中波乗り発生条件の解析的推定法⁴⁾や斜め追波中波乗り条件の数値的直接推定法⁵⁾を確立した。さらに、種々の模型実験でのブローチング計測例との比較により、操縦運動も考慮した数値シミュレーションモデルが精緻化されていった。その結果、規則波中のブローチングの発生条件⁶⁾の数値予測のみならず、不規則波中における発生確率⁷⁾についても確率論的な理論予測結果が実験による確率と一致するようになった(図2)。以上の理解を踏まえて、追波中波乗り発生条件の解析的推定法⁴⁾と波浪の統計理論を組み合わせた方法が簡易基準としてIMOで合意された。

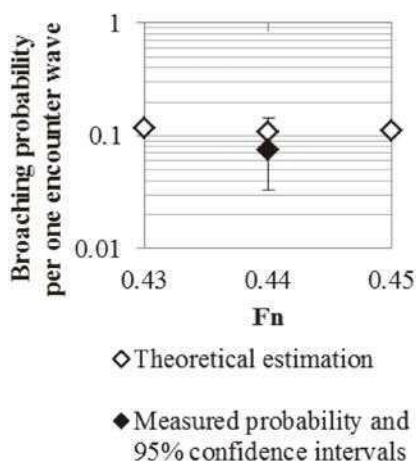


図2 不規則波中ブローチング発生確率についての実験と計算の比較例⁷⁾

追波中復原力喪失現象に関しては、その危険の速度依存性の説明には前後運動との連成のみならず操縦運動との連成が必要であることも実験的、数値的に指摘⁸⁾され、その点を踏まえた基準を提案し、IMOで簡易基準として2014年に原則合意された。

停船時不規則横波・横風状態(デッドシップ状態)の復原性に関して、復原力曲線を区分線形近似した転覆確率予測法の検討⁹⁾が進められ、時間領域シミュレーションモデルや不規則な風波中の模型実

験¹⁰⁾とも比較されている。この結果を踏まえた基準案が、IMOにおいて2015年に原則合意された。

5. 省エネ基準の下限を定める最低出力ガイドライン(具体例その2)

地球温暖化を防ぐための温室効果ガスの排出量削減が国連気候変動枠組条約により締約国それぞれに義務付けられているが、国際海運についてはIMOが海洋汚染防止条約の大気汚染防止について付属書の中で規制を定めている。具体的には、各船舶について1トンの貨物を1マイル運ぶのに要する二酸化炭素排出量を21世紀初頭の平均値より段階的に30%まで削減することを求めている。二酸化炭素排出量は推進機関馬力に比例するためこの規制は各船の燃費の規制に他ならない。ここでの問題点は機関馬力が設計船速の3乗に比例することからこの燃費指標は単純に設計船速を下げることで達成できることである。平穏な海面ではそれでも良いが荒天になると機関馬力の余裕がないと操船の自由を失い、海岸に座礁するという懸念が生じた。このためIMOは、安全上最低限必要な機関馬力を定めるガイドラインを作成することとした。先の燃費規制は許される機関馬力の最大値を定めるのに対し、このガイドラインを余裕をみて策定すると、燃費規制が成立しなくなる懸念も生じる。その場合、国際海運に対し国際社会から温暖化対策の課徴金を課されることにつながりうるので海運に頼る我が国としては避けたいところである。そこで、国土交通省海事局は日本船舶海洋工学会に協力を要請し、筆者らの船舶設計学領域はそのための学会研究委員会の設立を企画し、日本海事協会からの資金援助をいただき、委員会内では荒天下で必要な機関馬力の最低値を推定する計算法とその実験による検証を担当した。

機関馬力を推定する計算法としては、不規則な風や波を受ける船の平面運動の釣り合い状態を求め、そこでの局所線形化により運動の安定判別を行った。必要となる波の力や船体に働く流体反力の推定には、学会委員会内の広島大学安川教授、北海道大学芳村教授よりの協力を得た。そして運動が安定となる状態での機関馬力(BHP)が必要最小値となり、その状態でディーゼル機関のトルクリミット(P limit)以下であればよい。その計算例¹¹⁾を図3に示す。こ

ここでは前進速度ゼロでは有義波高 9 m まで船体の位置を保持でき、座礁の危険はない。天候のさらなる悪化を見越して風下陸岸から 4 ノットの低速で脱出することを要求すると有義波高 7 m がこの船についての限界となる。

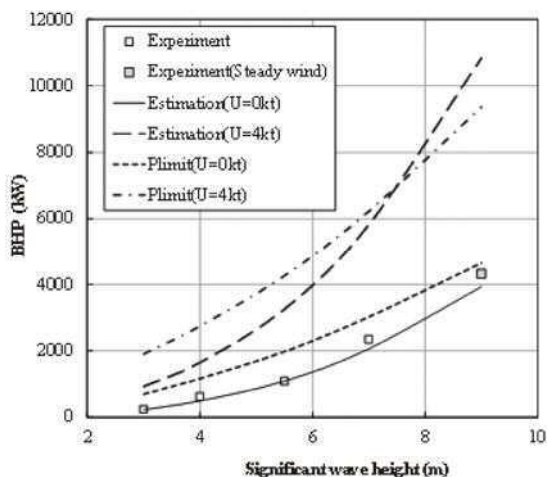


図3 ばら積み貨物船の風波中必要な最低推進馬力の推定とその実験的検証の例¹¹⁾

この計算法の実験的検証には、水産工学研究所の協力を得て、同所の角水槽で模型実験を実施した。水槽内に不規則な風と波を発生させ、その影響下で模型船が定点を保持するに必要な機関馬力を計測し、先の計算法の結果と比較した。図3に示すように両者の一致は良好である。そこでこの計算法が日本海事協会により我が国の多数のばら積み貨物船やタンカーに適用され、この計算法を簡易化したガイドライン案が我が国政府よりIMOに提案され、目下審議中である。

6. 船舶水中騒音が鯨類に与える悪影響を防ぐガイドライン (具体例その3)

海洋での人間活動が海中の生物、特に鯨類の生態に悪影響を与えているとの声が環境保護団体より高まっている。これを受けて、生物多様性条約のもとで、船舶水中騒音が鯨類に与える悪影響を防ぐガイドラインが作られようとしている。確かに船舶のスクリュー音、特にそのキャビテーション騒音の周波数域はヒゲクジラなどのコミュニケーションに使う水中音波の周波数域と重なっており、クジラ個体間のコミュニケーションが困難になると繁殖に悪影響を引き起こす可能性は直ちに否定できない。ただし、悪影響は周波数のみならず音圧レベルにも依存する

はずであるがその閾値についての科学的知見は十分でないとされる。その一方、我が国の最新鋭の船舶は前述の燃費規制をクリアするためにあらゆる技術を動員している。スクリュープロペラについてはその翼面積を小さくすることでプロペラの回転に要するトルクを小さくして燃費を上げている。その結果プロペラのキャビテーションは避けがたい状況となっており、どの程度のキャビテーション雑音まで鯨類への影響が無視できるかについてが我が国業界の重要関心事となっている。

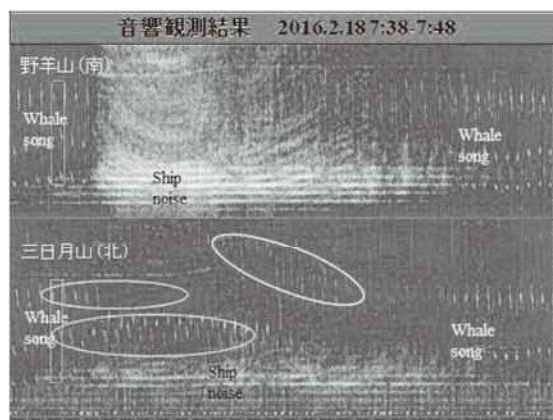


図4 小笠原父島で計測された船舶騒音とザトウクジラ鳴音のソノグラフ (縦軸：周波数、横軸：時間、色：音圧レベル)¹²⁾

そこで国土交通省海事局は、日本船舶技術研究協会の研究プロジェクトとして、実際の現場で船舶水中騒音とクジラの鳴音や行動を同時に記録することになった。筆者らの船舶設計学領域はその企画立案と研究総括を担当し、中央水産研究所、北海道大学水産学部、帝京科学大学などからの水中生物の専門家、海上技術安全研究所、東京海洋大学などのキャビテーションや水中音響の専門家の参画を得た。そして、2016年2～3月に、ザトウクジラの繁殖地である小笠原諸島父島にて現地調査を実施した¹²⁾。図4は、現地で水中マイクにより計測された記録の一例で、船舶通過時の騒音(図中の白く広がった領域)にも関わらずザトウクジラの鳴音(図中の短い縦線)が続いていることが読みとれる¹²⁾。なお、この通過船舶は父島と母島を結ぶ490総トンの定期貨客船であった。同様の調査を2017年2～3月に同じ場所で開催してデータ数を増やし、生物多様性条約締結国会議でのガイドライン策定に反映させるべく日本政府より文書提出の予定である。

7. おわりに

以上の例が示すように、我が国発の船舶安全・環境基準案の多くがIMOで採用されつつあり、その一部が船舶設計学領域からの発信でもある。IMOでの安全・環境基準になると、それ以降の国際航海を行うすべての船舶（軍用など一部を除く）はそれらの基準に基づき、設計、建造されていくことになる。さらに船舶設計学領域では、基準の策定のみならず、基準に合格するための具体的な設計や装置の考案についても研究を行っていることはいうまでもない。例えばパラメトリック横揺れを防ぐアンチローリングタンクの研究¹³⁾、燃費基準を満たすための可変ピッチプロペラと電気推進システムの最適制御¹⁴⁾などである。

以上の研究にあたり、ご指導とご理解をいただいている関係省庁、研究資金を提供いただいている関係団体、実験施設の使用などに研究協力いただいている関係研究機関の方々には篤く御礼申し上げます。そして、これらの研究実施に苦楽を共にした、この10数年間の卒業生各位と現在の学生諸君に今一度御礼申し上げたい。

参考文献

- 1) H. Hashimoto et al.: Experimental Study on Parametric Roll of a Post-Panamax Containership in Short-Crested Irregular Waves, in "Contemporary Ideas on Ship Stability and Capsizing in Waves", Springer, pp.267-276, 2011.
- 2) H. Hashimoto et al.: Prediction of Parametric Rolling in Irregular Head Waves, Proc. of ISSW, pp.213-218, 2011.
- 3) A. Maki et al.: Parametric Rolling Prediction in Irregular Seas Using Combination of Deterministic Ship Dynamics and Probabilistic Wave Theory, J. of Mar. Sci. and Technol, 16 (3), pp. 294-310, 2011.
- 4) A. Maki et al.: Analytical Formulae for Predicting the Surf-Riding Threshold for a Ship in Following Seas, J. of Mar. Sci. and Technol, 15 (3), pp.218-229, 2010.
- 5) N. Umeda et al.: Theoretical Prediction of Broaching in the Light of Local and Global Bifurcation Analysis, Int. Ship. Prog, 54(4), pp.269-281, 2007.
- 6) H. Hashimoto et al.: Broaching Prediction of a Wave-Piercing Tumblehome Vessel with Twin Screws and Twin rudders, J. of Mar. Sci. and Technol, 16 (4), pp.448-461, 2011.
- 7) N. Umeda et al.: Broaching Probability for a Ship in Irregular Stern-Quartering Waves: Theoretical Prediction and Experimental Validation, J. of Mar. Sci. and Technol, 21 (1), pp.23-37, 2016.
- 8) H. Kubo et al.: Pure Loss of Stability in Astern Seas-Is It Really Pure?-, Proc. of APHydro, pp. 307-312, 2012.
- 9) E. Maeda et al.: Theoretical Methodology for Quantifying Probability of Capsizing for a Ship in Beam Wind and Waves and Its Numerical Validation, 日本船舶海洋工学会論文集, 第15号, pp.227-235, 2012.
- 10) T. Kubo et al.: Total Stability Failure Probability of a Ship in Beam Wind and Waves: Model Experiment and Numerical Simulation, Proc. of STAB2012, pp.39-46, 2012.
- 11) S. Ohiwa and N. Umeda: Probabilistic Aspect on Minimum Propulsion Power Requirement Issue under Adverse Weather Conditions, Proc. of Design for Safety 2016, pp.127-131, 2016.
- 12) T. Akamatsu, et al.: An Attempt to Estimate Ship Noise Effect on Humpback Whales in Japan, J. Acoust. Soc. Am., 140 (4), Pt. 2, p.3021, 2016.
- 13) N. Umeda et al.: An Investigation of Different Methods for the Prevention of Parametric Rolling, J. of Mar. Sci. and Technol, 13 (1), pp.16-23, 2008.
- 14) H. Makino, et al.: Energy Savings for Ship Propulsion in Waves Based on Real-Time Optimal Control of Propeller Pitch and Electric Propulsion, J. of Mar. Sci. and Technol, 2017, in press.

(造船 昭和55年卒 57年前期)