

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20360391

研究課題名（和文） 船舶海洋構造物におけるリスク評価と余寿命便益評価に関する基礎的研究

研究課題名（英文） A Study on the Concept of Risk Analysis and Evaluation of Remaining Life Benefit for Ship and Marine Structures

研究代表者

川村 恭己 ( KAWAMURA YASUMI )

横浜国立大学・工学研究院・教授

研究者番号：50262407

研究成果の概要（和文）：

近年、構造物の健全性を評価維持するための手法として、従来の決定論的な手法ではなく、確率論的なリスク評価手法を元に安全性の評価が行われるようになってきている。このような背景から、本研究では、船舶海洋構造物のリスク評価に関する基礎的な手法の検討を行った。具体的には、(1)余寿命便益評価に基づく船舶海洋構造物のリスクベースの構造評価手法の開発、(2)構造システム全体の信頼性評価・リスク評価に基づく構造評価手法の検討、(3)汎用信頼性ソフトウェアと非線形有限要素法を用いたリスク評価手法の検討、(4)構造信頼性解析における構造強度に関する不確定性の推定、を行い、リスク評価に基づく船舶海洋構造物の健全性評価法の有効性を検討した。

研究成果の概要（英文）：

Recently, the risk-based approach, instead of traditional deterministic methods, becomes a powerful tool for safety assessment of ship and marine structures. In this study, elementary studies about risk assessment methods for ship and marine structures are carried out as follows: (1) A study on the risk-based assessment methods for ship and marine structures based on the remaining life benefit, (2) A study on the risk assessment methods based on system reliability approach, (3) Risk assessment and structural reliability analysis using commercial reliability software and non-linear finite element method, (4) Estimation of uncertainties of structural strength for structural reliability analysis. By these studies, availability of the risk-based approach for design and maintenance of marine and ship structures is discussed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2009年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
総計	8,400,000	2,520,000	10,920,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：リスク評価、余寿命便益、構造信頼性、船舶海洋構造物

## 1. 研究開始当初の背景

1989年のエクソン・バルデス号の事故や1997年のナホトカ号の折損事故に代表され

るように、船舶海洋構造物の事故は人命損失や環境破壊等を伴うため、社会的に大きな影響を与える可能性がある。このような構造物

の安全性、特に構造健全性を評価維持するための手法として、近年、様々な構造解析手法や、数値シミュレーションによる構造強度評価・寿命評価手法に関する研究が行われ、高度な健全性評価が可能になってきている。

一方、最近IMOでは、FSA(Formal Safety Assessment)手法の導入や、GBS (Goal-Based Standards)に基づいた新造船の設計建造基準の導入が進められている。これらの手法においては、従来の決定論的な健全性評価手法ではなく、確率論的なリスク評価手法を元に安全性の評価が行われている。このようなリスク評価手法においては、船舶における構造損傷・機器故障・各種事故等の様々な事象の発生を確率的に捉え、船舶にとって不都合な事態（事故）が発生する確率を定量的に評価し、それを元に構造健全性評価やその対策を考察することになる。

国内においても、上記のような国際的な動向を受けて、リスク評価に基づいた安全性評価に関する様々な試みが行われるようになってきている。しかしながら、従来から海洋構造物のリスク評価に積極的に取り組んできた欧米諸国と比較して、国内においてのリスク評価の適用例は少なく、現状ではその応用範囲に関する知見に乏しいと考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、以上のような背景から、リスク評価手法を構造健全性評価に応用するための要素技術を検討・提案することを目的として、下記のような基礎研究を行った。

- (1) 船舶海洋構造物のリスク評価と余寿命便益評価に基づく構造保全手法の開発
- (2) リスク評価に基づく冗長性を有する構造物の有効性に関する検討手法の開発
- (3) 信頼性ソフトウェアを利用した、システム信頼性評価法の検討と、非線形有限要素法による強度評価手法の確率的取り扱いに関する検討

一般に、バルクキャリアに関するFSAに代表されるような大規模なリスク評価の実行は、多数の専門家によって行われるものである。本研究は一研究者が行う研究であり、そのような大規模なリスク評価を行うことはできないが、リスク評価を元にした新しい考え方や、その要素技術について検討・提案することを目的とする。

## 3. 研究の方法

上記の(1)～(3)の項目について、具体的な研究方法を以下に示す。

- (1) 船舶海洋構造物のリスク評価と余寿命便益評価に基づく構造保全手法の開発  
本研究では、まず第一に、構造強度の確率

論的取り扱いの応用手法として、船舶海洋構造物のリスク評価と余寿命便益評価に基づく構造保全手法について検討する。図1に構造物におけるライフサイクルコスト(LCC)の考え方の例を示す。

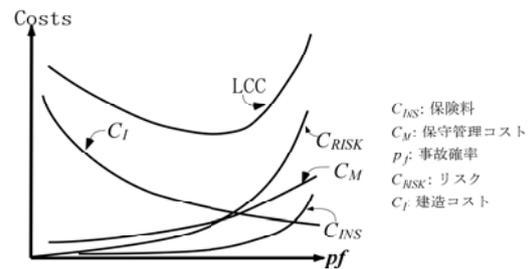


図1 ライフサイクルコスト(LCC)の概念

構造物のLCCは、初期建造コスト ( $C_I$ )、保守管理コスト ( $C_M$ )、保険料 ( $C_{INS}$ ) 及び、構造物が事故を起こした場合の事故リスク (期待される損失) ( $C_{RISK}$ ) から成ると考えられる。これらのコストは構造物の初期設計によって変化する。すなわち、より事故の起こる確率 ( $P_f$ ) の低い (強度の高い) 設計をすれば、事故リスク ( $C_{RISK}$ ) やメンテナンスコスト ( $C_M$ ) 等は下がるが、鋼材費などにより初期建造コスト ( $C_I$ ) は上昇することになる。よって、トータルなLCCを考えた場合、図中に示すように、ある強度 ( $P_f$ ) を持つような設計をした場合に、最も低コストとなる (LCCが最小になる) 最適な構造物の設計・建造が可能となると考えられる。本研究では、このようなLCCの考え方を船舶及び海洋構造物の保守管理に応用し、保守管理方法の違いによる余寿命便益の違いを検討することより、最適な保守管理法の立案手法を提案するとともに、その有効性を検討する。

- (2) リスク評価に基づく構造システム全体の検討手法の開発

現在、確率論的な考え方を構造健全性評価に応用する例として、構造信頼性評価が盛んに行われている。一般にこれらの構造信頼性評価においては、①ある局所的な構造の破壊モードを特定し、②そのモードにおける荷重と強度を確率的に取り扱い、③破壊確率を求める、という手順を用いている。このような従来の構造健全性評価では、それぞれの破壊モードにおける破壊確率を求めることはできるものの、その破壊モードが結果として全体の破壊 (事故) にどのような影響を与えるかを合理的に評価することが困難である。

従来より、欧米においては海洋構造物の複数の事故モードのリスク評価に関する検討が行われてきた。本研究では、これらの考え方を応用して、システムにおける構造物のリスクを評価する手法を検討する。

- (3) 信頼性ソフトウェアを利用した、システム信頼性評価法の検討と、非線形有限要素

法による強度評価手法の確率的取り扱いに関する検討

本研究の第3の目的として、信頼性ソフトウェアの構造健全性に関するリスク評価手法への適用を検討する。従来より、様々な確率モデルを実現した市販の信頼性評価ソフトウェアがあるが、ここでは、SwRI社とNASAにより開発されたNESSUSの利用を試みる。NESSUSの特徴としては、確率モデルを用いた破壊確率の計算機能だけでなく、有限要素法を利用した解析を用いて構造信頼性解析を行う機能が存在する。本研究では、この機能を用いて複雑な構造物のリスク評価を試みる。また、本研究では、従来計算コストが高く利用が不可能であった、非線形有限要素法による最終強度評価手法を信頼性評価の中に導入することを合わせて検討する。

#### 4. 研究成果

本研究の成果として以下の知見を得た。

(1) 余寿命便益評価に基づく船舶海洋構造物のリスクベースの構造評価手法の開発

本研究では、船舶及び海洋構造物の保守管理計画立案のための余寿命便益(RLB=Remaining Life Benefit)評価の考え方を検討し、船舶海洋構造物の保守管理のための手法を検討した。具体的には、まず第一に、船舶における余寿命便益評価のための定式化を行った。RLBは、対象構造物の検査情報から、運用する上で今後得られる収入(B<sub>RL</sub>)と、そのために必要となるコスト(C<sub>RL</sub>)の差を予測するものである。B<sub>RL</sub>は運航収入(B<sub>OPE</sub>)と売船利益(B<sub>RE</sub>)を考えた。また、C<sub>RL</sub>としては、運用コスト(C<sub>OPE</sub>)、保険コスト(C<sub>INS</sub>)、保守管理コスト(C<sub>M</sub>)等を考慮した。また本研究ではリスク(C<sub>RISK</sub>)としては、構造的事故リスクに着目した。すなわち、構造物は経年劣化により事故リスクが増加していくため、RLBの評価においては、構造強度の劣化を考慮して事故リスクを船齢ごとに評価し、現在から使用停止(廃棄)時の船齢までに期待されるコストの総和を考えた。また、構造強度や運航収入等は、保守管理計画によって変化するため、RLBが最大となる保守管理計画を立案することにより、低コストかつ低リスクな保守管理を行えることを示した。

また、本研究では第2に、余寿命便益評価に基づく海洋構造物の保守管理手法の検討を行った。具体的には、風力発電用の外洋上プラットフォーム構造の防食に関する保守管理プランの立案に関して、リスク評価および余寿命便益評価に基づいた検討手法の適用を試みた。この手法を用いて、各種塗装方

法と再塗装の計画を余寿命便益評価を用いて比較検討することにより、「初期コストが高くて再塗装の必要性の低い保守管理計画」が最も優れていることを示した。

(2) 構造システム全体の信頼性評価・リスク評価に基づく構造評価手法の検討

一般に、合理的な構造物のリスク評価を行う場合には、対象とする構造物の様々なリスクを評価する必要がある。本研究では、構造システム全体のリスク評価・構造信頼性評価を行う手法として、システム信頼性解析手法に基づく海洋構造物(洋上風力発電ファーム)のリスク評価を試みた。システム信頼性評価においては、まずはじめにFMECA(Failure Mode Effect and Criticality Analysis)を用いて、海洋構造物の各種ハザードを特定し、それらの発生頻度や影響度を評価し、重要な破壊モードの特定を行った。次に、ET(Event Tree)を用いて破壊シナリオを整理するとともに、それらのシナリオにおいて構造信頼性解析を用いた破壊確率の評価とリスクの評価を行った。さらに、各破壊シナリオにおける破壊確率の総和として、システム全体の破壊リスクを算定した。また、リスク評価結果に基づき、洋上風力発電ファームの設置海域の検討を行った。本研究では比較的少ない数の単純なシナリオの重ね合わせとして全体の破壊シナリオを想定したが、このようなシステム信頼性評価手法を検討することにより、より複雑な多数の破壊シナリオから成るシステムや冗長性を有する構造のリスク評価が可能になると考えられる。

ところで近年、リスクベースの設計手法(Risk-based Design)の必要性が提唱されるようになってきた。リスクベースの設計においては、上記で検討した構造の破壊によるリスクだけではなく、他の原因に基づく事故リスクや、環境に対する影響(環境リスク)を考慮することが必要であるとされている。これらの背景から本研究では、浮体式洋上風力発電システムの動揺・傾斜によるリスクの算定を行うとともに、CO<sub>2</sub>排出等による環境リスクを評価するための手法の調査・検討を行った。

(3) 汎用信頼性ソフトウェアと非線形有限要素法を用いたリスク評価手法の検討

一般に構造の破壊に関するリスク評価を行う場合には、構造信頼性解析を用いて破壊確率を評価する。破壊確率を計算する際には、一次信頼性解析(FORM)やモンテカルロ法など様々な計算手法が用いられる。これらの手法は、問題毎にプログラムを作成する必要があるため、その実装には大変手間がかかる

という問題がある。近年、このような問題を解決するために、汎用の信頼性解析ソフトウェアが用いられるようになってきた。本研究では、SwRI社により開発された信頼性解析ソフトウェア「NESSUS」を用いてリスク評価を行うことを試みた。具体的には、一様腐食による経年劣化を考慮したバルクキャリアのホールドフレーム構造の破壊確率をNESSUSを用いて算定した。NESSUSを利用することにより、線形有限要素解析を簡単に信頼性解析に導入することが容易となった。また、本研究では、溝状腐食を有するフレーム構造のリスク評価を行うために、非線形有限要素法を用いた構造強度解析を信頼性解析の中に導入した。具体的には、非線形有限要素法を多数実行し、あらかじめ構造応答の評価式（応答曲面）を構築することにより、構造信頼性解析を行うことができた。さらに本研究では、上記のような構造信頼性解析に基づくリスク評価を用いた構造評価手法を検討するとともに、それを用いて最適なホールドフレーム構造（寸法）の設計手法、及び保守管理計画の立案手法の検討を行った。

#### （４）構造信頼性解析における不確定性の評価について

「構造設計及び保守管理計画のリスク評価」においては、構造信頼性解析を用いた破壊確率を計算が必要となる。一般に、構造信頼性解析における破壊確率の値は、構造や荷重の不確定性の評価に大きく依存することが知られている。そのため、正確なリスク評価を行うためには、これらの不確定性を正しく評価することが必要となってくる。本研究では、上記で示した各種リスク評価の精密化を目的として、構造に関する不確定性の合理的な評価を試みた。具体的には、船体の防撓板における初期変形や材料特性、腐食衰耗、溶接残留応力等の各種不確定性要因が、強度の不確定性に与える影響を、非線形有限要素法を用いて推定した。さらに、これらの結果を用いて、不確定性のモデル化が破壊確率に与える影響について検討した。

上記のような研究により、リスク評価・余寿命便益評価を用いた船舶海洋構造物の新しい設計手法や保守管理手法の有効性を示すことができたと考えている。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

- ① Y. Kawamura, M. Miyazaki, Structural Optimization of the hold frame of a bulk carrier considering lifecycle

risk, *Advances in Marine Structures* (Guedes Soares & Fricke (eds), 2011 Taylor & Francis Group, London, Proc. MARSTRUCT 2011), pp691-698.

- ② 川村恭己、宮崎水樹、リスクを考慮した船舶のライフサイクル構造最適化の試みーバルクキャリアーのホールドフレーム構造を例としてー、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第10号、2010年11月、pp293-396 (CD-ROM).

- ③ Myo Myo Htun, Y. Kawamura, A Study On Uncertainties in the Strength of a Stiffened Panel for Structural Reliability Analysis, 日本船舶海洋工学会講演会論文集、第10号、2010年11月、pp289-292.

- ④ Y. Kawamura, Y. Sumi, Comparison of Two Different Hold Frame Structures of a Bulk Carrier Based on Structural Reliability Analysis, Proc. 11th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS 2010), 2010, pp. 1421-1431.

- ⑤ Shinta Tsukii, Yasumi Kawamura, Assessment of Environmental load for ships and marine structures -Calculation of the CO2 emissions for different types of tankers by LCA-, TEAM 2009 (The 23rd Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures), pp359-367.

- ⑥ 浅友紀、川村恭己、角洋一、村井基彦、洋上風力発電ファームの浮体構造物に対するシステムのリスク評価について日本船舶海洋工学会講演会論文集、第8号、2009、pp. 483-486.

- ⑦ 川村恭己、高橋基尚、山根昌晃、角洋一、有限要素法を用いたバルクキャリアのホールドフレームの構造信頼性評価、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第8号、2009、pp413-416.

- ⑧ R. Iwata, Y. Kawamura, T. Asa, M. Murai, A Study on a Method for Maintenance of Floating Platform Considering Remaining Life Benefit, TEAM 2008 (The 21st Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures), 2008, pp. 454-461.

- ⑨ Y. Kawamura, M. Nishimoto, Y. Sumi, A study on a method for maintenance of ship structures considering remaining life benefit, Analysis and Design of Marine Structures (Guedes Soares & Das (eds), Proc. Marstruct2009), pp. 279-289.

〔学会発表〕(計2件)

- ① 月井晋太、川村恭己、船舶海洋構造物の環境負荷量の算定とその評価法について-LCAを利用したタンカーのCO2排出量算定とその評価-、第21回海洋工学シンポジウム、OES21-116, pp. 1-6(CD-ROM), 2009年8月6,7日、日本大学理工学部 駿河台キャンパス.
- ② 松倉 力、川村恭己、浅 友紀、浮体式洋上風力発電システムにおけるリスクアセスメント-システムリスク算定に向けた動揺・傾斜によるリスクの推定-、第21回海洋工学シンポジウム、OES21-111, pp1-5(CD-ROM), 2009年8月6,7日、日本大学理工学部 駿河台キャンパス.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川村 恭己 (KAWAMURA YASUMI)  
横浜国立大学・工学研究院・教授  
研究者番号：50262407

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし