

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360383

研究課題名(和文)総合的リスクを考慮したライフサイクル構造評価手法に関する研究

研究課題名(英文)Lifecycle structural evaluation based on holistic risk assessment

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,200,000円、(間接経費) 3,060,000円

研究成果の概要(和文)：新しい時代における船舶海洋構造物の設計・建造・運用においては、安全性や利益を追求するとともに、ライフサイクルにおける環境負荷やそれに伴う社会的責任を考慮することが求められるようになってきた。このような背景から、本研究ではまず第一に、構造物の初期コストだけでなく、ライフサイクルにおける運用利益や破壊リスクを考慮した構造評価手法について検討した。また第2に、安全性に関するリスクだけでなく、環境影響に関する様々なリスク(総合的リスク)を考慮した構造評価手法と、それに基づいた構造最適化フレームワークを提案した。また、破壊リスク解析の際に考慮すべき不確定性評価の高度化手法についても合わせて検討した。

研究成果の概要(英文)：Recently, structural design of ships and marine structures considering various risks in the lifecycle of the structure has become more and more important. It is said that sustainability of ships and marine structures should be evaluated when the structure is constructed based on assessment of "holistic risk" which includes assessment of safety, environment, social responsibility and etc. Based on the concept of holistic risk evaluation, we proposed a framework of lifecycle structural optimization considering various risks such as failure risk and environmental risk. Also, in this study, we investigated the method to evaluate uncertainty of structures which is necessary for assessment of failure risks.

研究分野：船舶海洋工学、構造力学、CAE

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：総合的リスク 船舶工学 ライフサイクル評価 構造最適化 構造信頼性

## 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2002年のプレステージ号の事故のように、船舶の事故は人命損失や大きな環境破壊等を伴う。そのため、現在までに、構造健全性の評価維持を目的とした様々な構造強度評価手法の研究が行われてきた。特に最近では、IMOにおけるFSA手法(Formal Safety Assessment)の導入や、GBS(Goal Based Standards)の導入に伴い安全レベルアプローチ(SLA=Safety Level Approach)手法が議論されるなど、従来の決定論的な構造健全性評価手法ではなく、確率論的なリスク評価手法の導入が進められている。一方、最近の船舶設計の分野においては、ヨーロッパを中心に(広義の)リスクベース設計の概念が提唱されるようになってきている。例えば、欧州のSAFEDOORプロジェクトでは、タンカーの新しい設計を見出す手法として、従来の重量(建造コスト)を最小にするような設計ではなく、油の流出による環境破壊のリスクを最小にするような設計を考えるなど多目的な評価基準を設定し、新しい設計を見出す枠組みを提示している。以上のように、欧米においてはリスク評価を用いた新技術の検討が盛んに行われており、今後国内においても総合的なリスクの考え方を安全性評価や構造設計に生かす手法の積極的な検討が不可欠であると考えられる。

## 2. 研究の目的

以上のような背景から本研究では総合的なリスクを考慮したライフサイクル構造評価手法に関して以下の目的で研究を行なった。

まず、第一に、構造安全性評価におけるリスク評価の導入とライフサイクル構造最適化手法の検討を行った。具体的には、まず第一に、ライフサイクルコスト設計(LCC design)の考え方に基づいて、船舶の建造コストや運用・保守管理の評価手法を検討すると

ともに、事故リスク(構造強度に関する破壊リスク)の評価手法を検討する。そして、これらのライフサイクルにおける利益やコスト、及び破壊リスクを考慮した構造評価手法を検討する。さらに、それに基づいた構造最適化を試みる。また、破壊リスクの評価に関しては、従来の手法と比較して、より精度の高い評価が可能な、高度なモデル化方法を検討する。

本研究では、第2に総合的(Holistic)なリスクの評価手法と、それを用いたライフサイクル構造最適化手法の検討を行う。上記の研究背景で述べたように、新時代の設計においては、「事故に関するリスク」だけではなく、環境や社会的影響に関するリスクを考慮した構造設計の必要性、すなわちサステナブルデザインの必要性が議論されている。よって、本研究では、上記で示したコストや破壊リスクに加えて環境影響や社会的影響を構造評価に導入する手法を検討し、それを用いた構造最適化手法の検討を行う。

本研究では、上記の最適化手法の検討に加えて、最適化手法を実用的な大規模な問題に適用するための方法として、3次元プロダクトモデリングシステムを用いた最適化フレームワークの構築の可能性を検討する。

## 3. 研究の方法

本研究では、上記のコンセプトを実現するために、船舶を対象としたライフサイクル評価手法についてまず検討した。まず、ライフサイクルコストに関しては、初期建造コスト、保守管理コスト、保険料を評価する方法とともに、運用におけるライフサイクル便益の評価方法を合わせて検討した。また、事故を起こした場合の事故リスク(期待される損失)としては、構造信頼性解析を用いて年間あたりの船舶の縦曲げ破壊の確率を求め、それに事故の被害の期待値を乗じることによって、コストを指標としたリスク評価を導入した。

また、ライフサイクルを考慮することから、構造の経年劣化として腐食による板厚の衰耗を考慮し、構造強度の経年低下を考慮できるモデルとした。

本研究では、次に、このようなりスク評価指標を用いて、ライフサイクルを考慮した新しい構造最適化手法を検討した。具体的には、従来の建造費最小化とは異なるライフサイクル便益を目的関数として設定しそれを最大化するような構造最適化手法を提案した。またその際には、部材配置や構造寸法だけでなく、ライフサイクルにおけるメンテナンス計画を含めた様々な要因を最適化の目的関数へ導入するとともに、最適化問題を解くための遺伝的アルゴリズム手法の開発を行った。

次に、総合的(Holistic)なりスク評価手法の検討であるが、本研究では、従来行われてきた安全性に関する破壊リスクの評価に加えて、環境影響や社会的影響を構造評価に導入する手法を検討し、それを用いた構造最適化手法の検討を行った。具体的には、LCA手法を用いたCO<sub>2</sub>排出による環境インパクト評価や、海洋汚染防止条約における油流出の基準を用いた環境汚染の影響評価等をリスクとして導入することを検討した。また、それに基づいて様々なリスクを目的関数の中に導入して、総合的リスクを考慮したライフサイクル構造最適化を行い、従来の構造最適化との違いについて検討した。

破壊リスク評価の高度化に関しては、主として、腐食による経年劣化(板厚衰耗)に伴う強度低下の影響評価をより精度の高いものにするために、鋼板の腐食表面形状をランダム場により表現することを提案し、それに基づく強度の統計的性質の導出手法について検討した。具体的には、実腐食鋼板の表面形状の計測を行うことにより、その統計的性質を把握するとともに、それらを用いて腐食量の相関関数を求めた。そして、それらのデ

ータを用いてKL展開法によるランダム表面形状の表現を行った。さらに、これらの表現を用いて鋼板の引張強度の統計的性質がどのように変化するかを、非線形FEMを用いてPCE(Polynomial Chaos展開)近似した応答曲面を生成することにより評価した。

3次元プロダクトモデリングシステムを用いた最適化フレームワークの検討については、3次元プロダクトモデルシステムとしてAVEVAを導入し、それをベースに最適化を行えるかどうかを検討した。

#### 4. 研究成果

本研究では、総合的なりスク評価に基づく船舶の構造最適化支援のフレームワークを提案した。具体的には、LCB(ライフサイクル便益)を単一の目的関数とした最適化問題を定式化するとともに、様々なリスクをライフサイクルコストの一部として評価することにより、最適化戦略に応じた最適解の検討が可能にようにした。また、提案したコンセプトに基づく最適化の例として、ダブルハルタンカー中央断面のライフサイクル構造最適化を行った。具体的には、ライフサイクル便益(LCB)を最大化する最適化を、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて行った。また、リスクとしては、油流出リスク、CO<sub>2</sub>排出リスク、破壊リスク、を考慮できるようにするとともに、総合的リスクとしてそれらすべてのリスクを考慮した場合の最適化を行った。

最適化結果の概要であるが、油流出リスクやCO<sub>2</sub>排出リスクを考慮したLCB最大化問題においては、ロンジの寸法や本数が小さい解が得られ、建造費や運航費を低く抑える結果となった。また、すべてのLCB最大化問題では、二重船殻幅については制約条件を満たす中で最小となった。これは、二重船殻幅を小さく取ることにより、貨物倉が大きくなり運航収入が多くなるためである。次に、油流出リスクを考慮した最適化の結果については、

二重船殻幅の減少により油流出リスクは増加するが、本定式化では、それよりも運航収入の増加の影響が上回る結果となった。また、破壊リスクを考慮したLCB最大化問題においては、ロンジ・プレート寸法の比較的大きい解が得られた。すなわち、破壊リスクを考慮したために、強度が高くなるように他の最適問題の解と比べて大きな寸法となった。そして、最後に総合的リスクを評価したLCB最大化問題においては、破壊リスクのみを考慮した場合と、油流出やCO2排出リスクを考慮した場合との中間的な最適解とになった。

以上のように、本研究で提案した「リスク評価に基づいた最適化のフレームワーク」の考え方により、経済性・安全性だけでなく環境評価等を取り入れた総合的リスク評価に基づくバランスの良い最適化が可能になると考えられる。なお、構造最適化に関しては、各種リスクを目的関数として定式化した多目的最適化の結果の評価手法についても検討した。

次に、本研究で導入した各種リスクの評価に関してであるが、CO2排出リスクの評価については、EEDI指標を用いたペナルティーを導入するとともに、排出権取引価格を用いてコストに換算する方法を提案した。油流出リスクの評価においては、海洋汚染防止条約で定めている仮想油流出量の計算方法を基に、船舶の衝突・座礁時の油流出リスクを算出した。ただし、今回の衝突・座礁による油流出リスク評価手法においては、構造強度や部材寸法の影響を考慮することができないという欠点がある。そのため、構造部材の配置に応じた座礁時の損傷範囲の評価法についても検討した。今後はこのような構造強度に応じた評価を導入した高度な手法の導入が必要であると考えられる。

破壊リスク評価の高度化に関しては、主として、実腐食鋼板の表面形状を再現するシミュレーション手法を開発し、その有効性を示

した。また、それを基に、強度の統計的性質を推定する手法について検討した。その結果、強度の推定が可能であるが、対象とする鋼板が相関長さに比べて大きい時は、腐食面の凹凸を表現する高次のモードが影響するため、注意する必要があることがわかった。

3次元プロダクトモデリングシステムを用いた最適化フレームワークの検討については、本研究で開発した最適化プログラムとAVEVAによる形状モデルの間でデータのやりとりをする手法の検討を行った。最適化における設計変数から、プロダクトモデル内の部材データと寸法等の情報を生成するために、プロダクトモデルを表現するxmlファイルを用いた情報のやりとりを試みた。これにより、形状の引き渡しが可能となったが、最適化を行うためには、適切なパラメトリックな形状変更のアルゴリズムとそれを用いたデータ変換法の検討が必要であることがわかった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 9 件)

川村恭己, 大場義弘, 楓 侑馬, 総合的なライフサイクルリスク評価に基づいた構造最適化 - ダブルハルトンカーの中央断面構造への適用 -, 日本船舶海洋工学会論文集, 第19号, 採録決定済み, 2014. (査読有)

Myo Myo Htun, Y. Kawamura, M. Ajiki, A study on random field model for representation of geometry of corroded plates and estimation of stochastic property of their strength, 日本船舶海洋工学会論文集, 第18号, 2013, pp91-99. (査読有)

Myo Myo Htun, Yasumi Kawamura, A study on the method to estimate the stochastic property of the strength

of corroded plate by response surface method with polynomial chaos expansion, Proceedings of the PRADS2013, 20-25 October, 2013, CECO, Changwon City, Korea, pp731-738. ( 査読有 )

金谷洸希、川村恭己、多目的構造最適化における自己組織化マップを用いた評価手法の検討 - 船体中央断面の構造最適化への適用 -、日本船舶海洋工学会講演論文集、第16号、2013年5月、pp175-178. ( 査読無 )

Myo Myo Htun, Yasumi Kawamura, Masataka Ajiki, A study on random field model for representation of corroded surface, Analysis and Design of Marine Structures (G. Guedes Soares and J. Romanoff(eds), CRC Press/Balkema) (Proc. of MARSTRUCT 2013, Espoo, Finland, March 25-27, 2013), pp545-553. ( 査読有 )

Y. Kawamura, Y. Ohba, Y. Kaede, Lifecycle structural optimization of mid-ship of double hull tanker based on holistic risk evaluation, Analysis and Design of Marine Structures (G. Guedes Soares and J. Romanoff(eds), CRC Press/Balkema) (Proc. of MARSTRUCT 2013, Espoo, Finland, March 25-27, 2013), pp555-563. ( 査読有 )

Myo Myo Htun, Yasumi Kawamura, Masataka Ajiki, Random Field Model for Representation of Corroded Surface, 日本船舶海洋工学会講演論文集、第14号、2012年5月、pp183-186. ( 査読無 )

川村恭己、大場義弘、楓侑馬、総合的リスク評価に基づいたダブルハルタンカー中央断面のライフサイクル構造最適化について、日本船舶海洋工学会講演論

文集、第14号、2012年5月、pp161-164. ( 査読無 )

月井晋太、川村恭己、CO2排出削減を考慮したタンカーの輸送形態の最適化に関する研究、日本船舶海洋工学会講演論文集、第11号、2011、pp399-402. ( 査読無 )

[学会発表](計 2 件)

川村恭己、ランダム場を用いた腐食表面形状の表現について、日本船舶海洋工学会東部構造研究会、2013年4月23日、横浜国立大学.

Y. Kawamura, Lifecycle Structural Optimization of Ship Structures Based on Risk-based Approach, The 6th International Conference of the Port-city University League, Nov. 10, 2011, Shanghai, China (Hengshan Picardie Hotel).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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