

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22246109

研究課題名(和文)船舶海洋構造物の durability 評価手法の高度化

研究課題名(英文)An enhanced method of evaluation for durability of marine structures

研究代表者

角 洋一 (SUMI, Yoichi)

横浜国立大学・工学研究院・教授

研究者番号：80107367

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,000,000円、(間接経費) 10,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、大波高時のスラミングに誘起されるホイッピングを考慮した疲労き裂の伝播に関して、実験および数値シミュレーションにより疲労き裂進展に及ぼす振動応力成分の重畳影響を明らかにした。残留応力下の疲労き裂進展の解明に関しては、溶接残留応力とともに過大荷重負荷やピーニング処理後の残留応力の算定法を開発し、残留応力影響を考慮した新しい疲労き裂管理概念を示した。腐食平板については、腐食面の表面形状のランダム性の表現法、腐食材の破断数値シミュレーション法とその実験的検証を行うとともに、経年腐食を考慮したリスクベース評価手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Fatigue tests and numerical simulation are carried out under slam-induced whipping stress, so as to clarify the effect of vibratory stress superimposed to wave-induced stress. The effect of residual stress is examined for the fatigue crack propagation under welding residual stress, especially after overloading. The effect of peening is also investigated by fatigue tests. Regarding corroded plates, a numerical method is proposed for the generation of a randomly corroded plate surfaces, and numerical simulation has been carried out for the fracture of corroded plates, which is verified by experiments. Finally, the strength of corroded marine structures is evaluated by a risk-based approach.

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：船舶工学 海上安全 長寿命化 構造材料 海洋工学

## 1. 研究開始当初の背景

船舶および海洋構造物の構造強度の生涯管理は、疲労き裂管理と腐食部材管理に尽きるといっても過言ではない。疲労き裂の管理は、航空機分野では、定期検査・点検により疲労き裂を発見し補修する耐損傷設計 (damage tolerant design) が取られることもあるが、海洋構造分野では、苛酷な検査環境のためこの概念をそのまま適用することは出来ない。本研究者は、疲労き裂発生の危険が予測される溶接部において、運用中に目視点検で発見される長さ 20-30mm 以上のき裂について、その後のき裂伝播を経路、寿命とともに高精度で予測可能なシミュレーション・プログラム (CP - System) を世界で初めて開発し、実用化研究を進めてきた。

本研究に関わる一連の研究では、遭遇海象の波浪頻度統計をもとに短期海象の狭帯域方向スペクトル波から構造応答関数を用いて導出される実働波浪荷重による疲労き裂伝播シミュレーションが可能な解析手法を提案しているが、本研究ではさらにスラミングに誘起されるホイッピングによる動的応力に対応する荷重時刻歴に対する疲労き裂伝播シミュレーション法の確立を目指した。特に、建造直後から構造体のライフサイクル全体にわたる寿命評価をすべく、表面き裂や微小内在欠陥などから成長する実働ランダム荷重下の疲労き裂に対してき裂面残留塑性域におけるき裂開閉口挙動の解析に基づく寿命計算を行うとともに対応する疲労試験を実施し、計算モデルの精密化を図る。また、板厚貫通後のき裂については、その後の伝播形態を含めた予測法を提案し、実験的に検証する。これらの結果に基づき、最終的には意図的にき裂伝播の遅延・停留による延命を狙ったピーニングなどの残留応力付与を含む新しい疲労き裂管理法の有効性を検討する。

現在、船舶海洋工学の分野では、新興国の

発展による海上輸送量の急激な増大、パナマ運河の拡幅に対応すべくコンテナ船の大型化が急ピッチで進行しており、過去に商船で使用されたことの無い 100mm 近い極厚板が使用されるようになってきた。一方、資源輸送分野でも、船舶からの温室効果ガス排出削減の対策として、低速・大型化のトレンドが予測されている。いずれも極厚板の溶接部欠陥検出技術と検査で見逃された疲労き裂の伝播問題に注目が集まる状況を生み出している。また、近年極地における LNG や原油等の資源開発に伴い、海洋構造物の疲労き裂の管理についても、低温環境下でのぜい性破壊の発生防止や発生したき裂の阻止 (アレスト) とともにその重要性が再認識されている。これら産業界の実際問題解決に資するべく「破壊管理設計」の概念を総合的に取り纏めることも本研究の目標である。

## 2. 研究の目的

船舶・海洋構造物の durability とは、供用中の疲労損傷や腐食に対して全体構造およびその構成部材が十分な残存強度と変形能を有することと定義できる。最近の超大型コンテナ船をはじめとする船舶の急速な大型化に伴う鋼板の厚板化は、構造設計を従来の疲労強度の知見の延長では判断できない未知の領域へ踏み込ませつつある。本研究では、実働波浪荷重に対する疲労強度評価法の高度化とその実験的検証および海水腐食をうけた構造部材の残存強度評価法を開発し、船舶・海洋構造物の durability の適切な管理のための学術的基礎を確立することを目的とする。

腐食については、腐食ピット成長の統計モデルや強度推定についての研究が、経年船の状態評価との関係で研究が進んでいる。しかし、船舶の衝突時などの残存強度に関わる腐食材の破断時の著しい変形能の低下は、その表面形状不整によることが知られているものの、その詳細なメカニズムは未解明のまま

である。本研究者らは、腐食材表面を精密数値加工により再現し、系統的な実験を行うことにより延性低下のメカニズムの本質を解明するとともに、対応する破断数値シミュレーション法の研究を行ってきた。本研究では、素材の真応力 ひずみ線図に基づく、腐食ピットをもつ平板の破断数値シミュレーション法を開発するとともに、各種腐食状態における腐食材の変形能評価法の基礎を確立する。特に、実験的に検証が困難な腐食材の強度・変形能の低下に関する寸法効果を数値シミュレーションにより明らかにする。

IMO(国際海事機関)の対応などを見ると、リスクベースの経年船強度管理が今後求められる方向にある。本研究では、申請者らが開発してきた船体構造保全情報データベースを前述の疲労・腐食に対する構造力学的な状態評価手法と結び付け、リスクベースの強度生涯管理システムを提案する。

波浪繰返し荷重下における疲労き裂伝播寿命算定の高精度化については、数 10 ミクロン程度の微小き裂から機能喪失に至るまでの寿命を評価するため具体的には、以下の事項を解明する。

スラミング・ホイッピング応力を含む疲労強度評価のための実船計測に基づく荷重時刻歴モデルの生成

き裂面残留塑性域層を考慮したき裂開閉口モデルによる寿命予測と疲労試験による検証

残留応力のモデル化とそのき裂伝播遅延効果の解明

上記のモデル化をもとに

ピーニングによる残留応力影響や、過大荷重作用後のき裂伝播の遅延、停留メカニズムを利用した新しい疲労き裂管理法の提案

腐食衰耗した構造の強度と変形能の評価については、以下の課題を解明する。

腐食表面形状の数値生成

腐食平板の強度と変形能を予測する 3 次元有限要素解析手法(大変形、弾塑性)の確立

疲労・腐食に対する構造力学的な状態評価に基づく経年船のリスクベースの強度生涯管理システムの提案

### 3. 研究の方法

本研究では、船舶海洋構造物の強度生涯管理法を確立すべく 3 次元き裂および貫通き裂に対してスラミング・ホイッピング応力を含む作用応力下でのシミュレーションに基づく疲労き裂伝播経路と疲労寿命の高精度算定手法を開発するとともに、結果の妥当性を実験により検証する。腐食衰耗した構造の強度と変形能については、大変形大ひずみ有限要素解析によりシミュレーションに基づき破断までの挙動を追跡し、実験では困難な腐食ピットを有する構造の強度と変形能を解明するとともに衝突など事故時の荷重による損傷状態の評価に適用可能な解析法を提案する。前述の疲労と腐食損傷のシミュレーションに基づき、経年構造の durability 評価法を確立する。研究分担者川村はリスクベース評価法の提案を、また民間の研究協力は、素材、製造、溶接後処理の分野で本手法の実用化に取り組む。研究代表者は、本研究の全体を統括した。

本研究における疲労研究の特色は、スラミング・ホイッピング等の動的荷重影響を含む実働荷重履歴に対する溶接部の 3 次元き裂(内部き裂、表面き裂)および貫通き裂の伝播解析手法をシステム化することである。さらに、シミュレーションに対応する荷重履歴を用いた疲労試験結果に基づき計算モデルの精密化を図った。

腐食平板の研究については、その強度を論じた研究は多いが、延性低下についての考究は極めて少ない。本研究の特色は、素材の真応力 ひずみ線図に基づく腐食材の破断数値シミュレーション法の確立と、実験による

検証である。これによって、腐食の程度が異なる実船の残存強度の合理的推定が初めて可能となる。

リスクベース強度生涯管理システムに関しては、船舶の経年劣化に伴う強度の予測とそれに基づいたリスク評価手法の確立が近年の重要な課題となっている。本研究では、主として腐食による経年劣化の構造強度への影響に着目し、腐食衰耗モデルの表現法を検討するとともに、腐食に伴う強度低下への影響やリスク評価を行うための構造信頼性解析手法について検討した。

#### 4．研究成果

本研究における疲労研究の成果は、スラミング・ホイッピング等の動的荷重影響を含む実働荷重履歴に対する溶接部の3次元き裂(内部き裂、表面き裂)および貫通き裂の伝播解析手法をシステム化したことである。さらに、溶接やピーニングによる残留応力影響下の疲労き裂伝播シミュレーション手法について疲労試験に基づいた計算モデルの精密化が図られた。

腐食平板の研究については、その強度を論じた研究は多いが、延性低下についての考究は極めて少ない。本研究の成果は、素材の真応力ひずみ線図に基づく腐食材の破断数値シミュレーション法の確立と、その実験による検証である。これによって、腐食の程度が異なる実船の残存強度の合理的推定が初めて可能となった。

リスクベース強度生涯管理システムについては、第一に、バルクキャリアのホールドフレーム構造を例として、経年腐食を考慮した構造の強度低下予測に基づいたリスク評価法を検討した。部材交差部における溝状腐食の影響をモデル化することにより、破壊リスクが高くなる可能性があることを指摘した。また、腐食モデルの高度化として、腐食面の表面形状のランダム性の表現法につい

て検討するとともに、ランダム性を有する腐食板の強度の不確定性について推定を行った。これらの手法は、リスク評価のための信頼性解析や構造応答の確率的評価に適用可能であると考えられる。

#### 5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

Y. Sumi, Fatigue crack propagation in marine structures under seaway loading, International Journal of Fatigue 査読有、58, 2014, pp.218-224. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.03.002

Y. Sumi, H. Yajima, M. Toyosada, T. Yoshikawa, S. Aihara, K. Gotoh, Y. Ogawa, T. Matsumoto, K. Hirota, H. Hirasawa, M. Toyoda and Y. Morikage, Fracture control of extremely thick welded steel plates applied to the deck structure of large container ships, Journal of Marine Science and Technology 査読有、18-4, 2013, pp.497-514. DOI: 10.1007/s00773-013-0222-5

T. Okawa, H. Shimanuki, Y. Funatsu, T. Nose, Y. Sumi, Effect of preload and stress ratio on fatigue strength of welded joints improved by ultrasonic impact treatment, Welding in the World 査読有、57-2, 2013, pp.235-241. DOI: 10.1007/s40194-012-0018-y

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, 査読有、18号, 2013, pp.91-99.

S. M. Ikhtiar Mahmud and Y. Sumi, Thickness effects on fatigue strength

of plates with semi-elliptical side notches and weld joints, 日本船舶海洋工学論文集 査読有、14号,2011, pp.19-26.

Muhammad Rabiul Islam, Y. Sumi, Geometrical effects of pitting corrosion on strength and deformability of steel rectangular plates subjected to uniaxial tension and pure bending, 日本船舶海洋工学論文集 査読有、14号, 2011, pp.9-17.

Y. Sumi and T. Inoue, Multi-scale modeling of fatigue crack propagation applied to random sequence of clustered loading, Marine Structures 査読有、24, 2011, pp.117-131.

DOI:10.1016/j.marstruc.2011.02.003

Y. Sumi M. Mohri and M. Nakamura, Crack paths in weld details under combined normal and shear loading, Engineering Fracture Mechanics 査読有、77, 2010, pp.2115-2125.

DOI:10.1016/j.engfracmech.2010.02.017

[学会発表](計 8件)

Y. Sumi, Fatigue crack problems in relation to the up-sizing marine structures, Proceedings of the 27th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, National Taiwan Ocean University, Keelung, 2013, pp.29-36.

Yuan Kuilin and Y. Sumi, Welding residual stress and its effect on fatigue crack propagation after over loading, Analysis and Design of Marine Structures, Taylor & Francis Group, 2013, pp.447-455.

Myo Myo Htun, Y. 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, 2013, pp731-738.

Y. Sumi, Some problems of fatigue crack propagation in marine structures under seaway loading, Proceedings of the International Conference on Crack Paths (CP2012), Gaeta, 2012, CD-ROM (12pages).

Muhammad Rabiul Islam, Y. Sumi, Geometrical effects on strength and deformability of corroded steel plates, Advances in Marine Structures, Taylor & Francis Group, 2011, pp.151-159.

Y. Sumi, H. Yajima, M. Toyosada, T. Yoshikawa, S. Aihara, T. Matsumoto, K. Hirota, H. Hirasawa, M. Toyoda and K. Gotoh, Overview of Japanese joint research project on safety-related issue of extremely thick steel plate applied to large container ships, Proceedings of PRADS 2010, Rio de Janeiro, 2010, pp.980-989.

Y. Sumi and T. Inoue, Experimental and computational studies on fatigue crack propagation under the effects of random sequence of cluster loading, Proceedings of PRADS 2010, Rio de Janeiro, 2010, pp.1366-1374.

Y. Kawamura and Y. Sumi, Comparison of two different hold frame structures of a bulk carrier based on structural reliability analysis, Proceedings of PRADS 2010, Rio de Janeiro, 2010, pp.1421-1431.

[図書](計 2件)

Y. Sumi, Mathematical and Computational Analyses of Cracking

Formation, -Fracture Morphology and  
its Evolution in Engineering Materials  
and Structures -, Springer, 2014,

282pages ISBN 978-4-431-54934-5.

角洋一、日本応用数理学会編、応用数理  
ハンドブック、朝倉書店、東京、2013、  
第I編現象の数理：亀裂進展経路分担執  
筆，pp.94-95.

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

角 洋一 (SUMI, Yoichi)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：80107367

### (2)研究分担者

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