

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560995

研究課題名(和文)ホイッピングの荷重順序を考慮した疲労寿命評価に関する基礎的研究

研究課題名(英文)A fundamental study on fatigue life evaluation taking the load sequence of whipping into account.

研究代表者

岡 正義 (Masayoshi, Oka)

独立行政法人海上技術安全研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：70450674

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：船の遭遇海象の順序をモデル化した嵐モデルと全船FE解析で求めた応力RAO(Response Amplitude Operator)に基づいて、大型コンテナ船の長期の応力履歴を作成し、25年後のき裂長を疲労き裂伝播解析でシミュレートした。き裂先端の塑性挙動に着目した結合力モデルによる疲労き裂伝播解析プログラムでき裂成長の遅延現象を再現し、任意のランダム波形が扱えるようプログラムを拡張した。これによってホイッピングの影響が疲労き裂長の観点で明らかになり、マイナー則による現在の疲労設計の安全性が明確になった。

研究成果の概要(英文)：The fatigue crack length at 25 years old was simulated using the fatigue crack propagation analysis inputted a long-term stress history of a large container ship based on the storm model and stress RAO(Response Amplitude Operator). In order to simulate the delay phenomenon of fatigue crack growth, the fatigue crack propagation analysis program based on cohesive force model focuses on the plastic behavior of the crack tip, and it was extended to be able to treat any random waveform. The effect of whipping on fatigue life becomes clear in terms of crack length, the safety level of the Minor's law which generally adopted as current fatigue design was clarified.

研究分野：船体構造強度、波浪荷重、構造解析、疲労強度、船体振動

 キーワード：疲労き裂伝播解析 嵐モデル ホイッピング マイナー則 大型コンテナ船 ランダム波形 応力履歴  
 構造信頼性解析

### 1. 研究開始当初の背景

ホイッピングは、波浪中の船体に生じる代表的な非線形荷重のひとつで、スラミング衝撃の後に発生する過渡的な振動応答である。ホイッピングによる繰り返し応力が、船の疲労寿命に影響を及ぼすことは、1980年代に運輸省（現国土交通省）で行われた異常海難防止システムの総合研究開発において指摘されたが、その当時の船に関しては、船体節振動による繰り返し応力の振幅レベルは、波浪による繰り返し応力に比べて低く、損傷を誘起する可能性は低いという見解の下、十分な研究が行われなかった。実際、これまでの船でホイッピングに起因した損傷は顕在化していないことから、この見解は間違っていないと考えられるが、近年のCO2削減要求や輸送需要の増加に応じた船の大型化に伴い、船体振動の応力レベルが高まってきたことから、未経験の損傷防止を図るため、ホイッピングの疲労寿命への影響の解明が求められている。

疲労寿命への影響は、ホイッピングの発現頻度、及び、ホイッピングによる荷重下でのき裂成長量に依存する。このうち発現頻度については、最近の研究プロジェクト[1]の中で、応募者が行った実船データ解析によって定量的な評価がなされた。一方、き裂成長量については、当該研究プロジェクト[1]で実施された疲労試験及び数値シミュレーションによって、荷重振幅の小さい波の重畳による疲労き裂伝播への寄与は少ないことが確認された。しかしながら、き裂伝播に寄与する実効的な荷重の閾値に対する物理的説明がついておらず、ホイッピングのように減衰する変動応力の作用順序の影響は評価されなかった。

また、船の疲労設計においては一般にマイナー則で評価されているが、マイナー則では損傷の状態が明確でなく、荷重順序の影響を考慮できないことから、その信頼性が問題となっている。そのため、設計の観点からホイッピングによる損傷を防止するため、疲労き裂伝播シミュレーションによる評価を行い、マイナー則の安全性を検証することが必要と考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、き裂先端の塑性域に着目した結合カモデルによる疲労き裂伝播解析プログラム[2]によって実現象に即した評価を行うことで、ホイッピングによる疲労寿命への影響を解明する。これと同時に将来的ニーズに対応して、高サイクル応力の作用順序を考慮できる実用的な評価法を開発する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 設定した課題

ホイッピングの疲労寿命への影響を解明するため、以下の2つの課題を設けた。

- ・荷重モデルの構築

- ・疲労き裂伝播解析プログラムの作成

#### (2) 荷重モデル

荷重モデルの対象部材は、大型コンテナ船の甲板部材とした。全船3D/FE解析で求めた甲板応力の応答関数[3]から逆フーリエ解析を行うことで、実海域での不規則応力波形を作成した。長期の波浪遭遇順序は、北大西洋の波浪テーブルに基づいて嵐モデル[4]を作成した。ホイッピングによる応力は、過渡減衰波形で与え、実船応力計測のデータを参考に、その作用レベル及び振動特性を与えた。ホイッピングの及び作用頻度は、越智らの提案したスラミングの発生確率に基づき与えた。作成した応力波形の例を図1に示す。図の中でRAWが実応力波形のモデル、LFがRAWからホイッピングの高次成分を除いた低周波成分、ENVがRAWの包絡線波形である。本研究では、これらの応力による疲労寿命を比較することで、ホイッピングの影響を評価した。

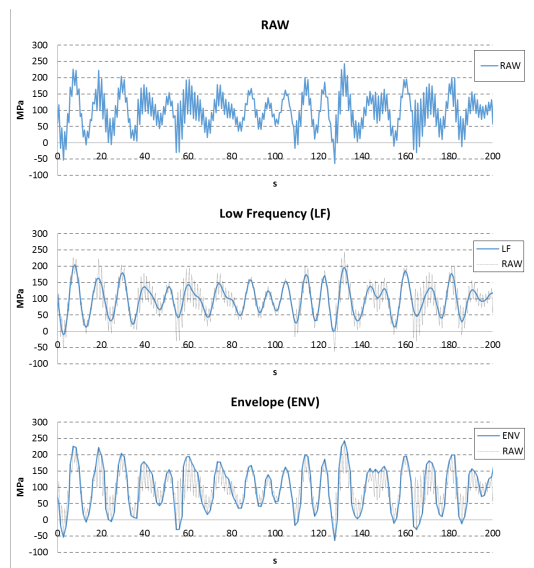


図1 作成した不規則応力波形

#### (3) 疲労き裂伝播解析

作成した応力波形を使用して、疲労き裂伝播解析を行った。ホイッピングのような過大な応力が作用した場合には、き裂進展の遅延減速現象が生じることが知られている[2]。この非線形現象を再現するため、本研究では、き裂先端の塑性域に着目した結合カモデルによる疲労き裂伝播解析プログラムをベースに検討を行った。ここで、提案されている疲労き裂伝播解析プログラムは、一般に一定振幅荷重を対象としていることから、不規則応力波形を扱いためにはプログラムの改良が必要になる。そこで、本研究では、後藤ら[5]が提案したアルゴリズムを踏襲して、不規則応力波形の解析を可能にした。開発したプログラムの検証結果を図2に示す。図2での疲労試験は北村らの報告[6]から引用した。また、疲労き裂伝播解析の材料定数のCとmは、後藤ら[5]が求めた値を使用した。

過渡応答荷重での試験結果に対して良好な推定精度が得られている。

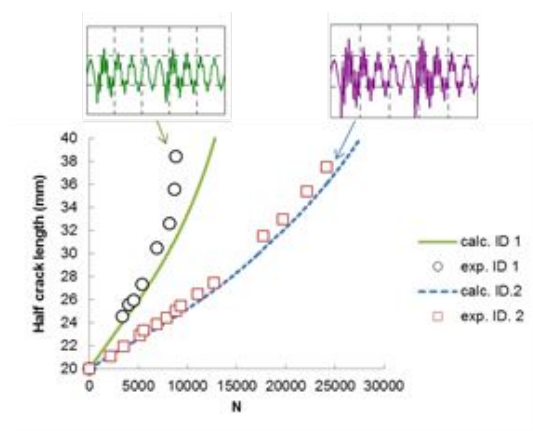


図2 疲労き裂伝播解析プログラムの検証例

#### 4. 研究成果

作成した荷重モデルを入力として、疲労き裂伝播シミュレーションを行い、ホイッピングの疲労寿命への影響を調べた。荷重モデルにおける船速は航海速力の3/4、平均応力は100MPa（引張）とした。疲労き裂伝播解析では、材料の降伏応力を460MPa、初期半長10mmの無限板貫通き裂の一樣応力とした。C及びmは、RPG規準[2]に従い、 $C=4.505e-11$ 、 $m=2.692$ （SI単位系）を使用した。

##### (1) 単独の嵐での評価

北大西洋での最大の嵐を対象として、疲労寿命評価を行った。

マイナー則での評価結果を図3に示す。横軸は経過時間、縦軸は累積疲労被害度(D)を表している。 $D_{RAW}/D_{LF}$ で表されるホイッピングの影響は、100%程度となりホイッピングの影響が大きいことを確認した。図4に疲労き裂伝播解析での評価結果を示す。縦軸は疲労き裂の成長量(a)を表す。最大荷重(hour=66h)の後にき裂進展の遅延減速現象が確認できる。RAW, LF, ENVの関係において疲労被害度とほぼ同様の傾向を示しており、単独の嵐ではマイナー則での評価が可能と考えられる。ホイッピングの影響は約50%とマイナー則よりも少ない結果が得られた。

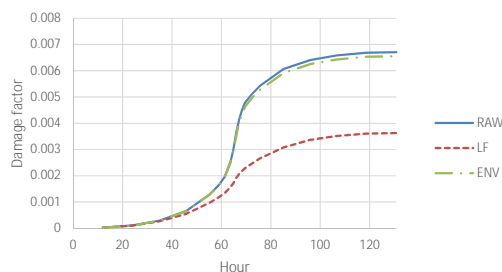


図3 マイナー則による疲労被害度のトレンド（単独の嵐）

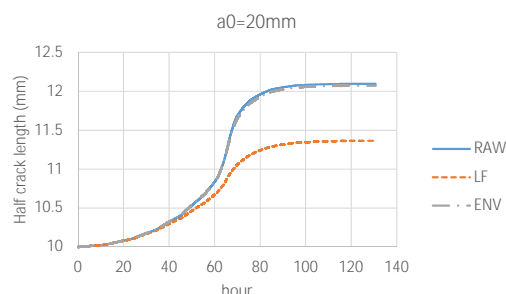


図4 疲労き裂伝播解析による疲労き裂進展のトレンド（単独の嵐）

##### (2) 複数の嵐での評価

25年間の期間を想定して、北大西洋で遭遇する嵐のランクを確率的に与えて遭遇海象履歴を作成し、長期の疲労寿命についてホイッピングの影響を調べた。

遭遇海象履歴のプロファイルの模式図を図5に示す。

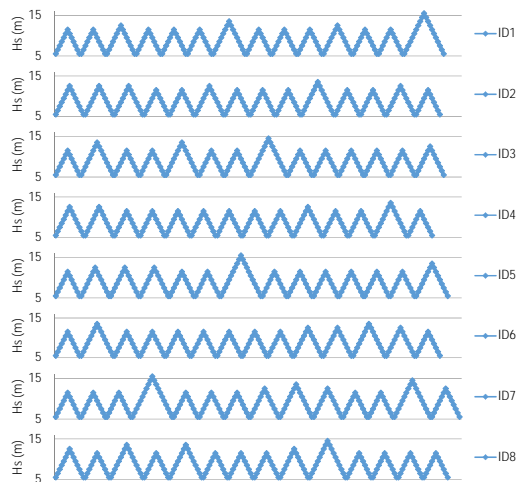


図5 遭遇海象履歴のプロファイル

マイナー則での評価結果を図6に、疲労き裂伝播解析での結果を図7にそれぞれ示す。疲労き裂伝播解析では、嵐による過大荷重で、き裂成長の加速・減速が生じ、マイナー則と比べて複雑なトレンドを示している。

25年後のD及びaを遭遇海象履歴のIDで比べると、図8,9の様になる。ホイッピングの影響は、マイナー則では30~40%、疲労き裂伝播解析では10~55%となった。単独の嵐と比べて評価法による差が少なくなった原因は、単独の嵐では最大荷重の後に遅延減速現象が生じたが、複数の嵐では過大荷重の作用するタイミングによって減速だけでなく加速現象も生じ、それらの相互作用によって非線形影響が少なくなったと考えられる。また、疲労き裂伝播解析ではばらつきが大きいのは、マイナー則では考慮されない加速減速現象の影響や、疲労き裂伝播解析で設定した平均応力、材料の降伏応力、初期き裂長等にも関係すると考えられる。

発生した嵐ランクと波との出会い角をランダムに与えてモンテカルロ・シミュレーションを行い、構造信頼性解析を行った。モンテカルロ・シミュレーションで得られたD及びaの確率分布を図10,11に、各々の確率分布から求めた信頼性指標を表1,2にそれぞれ示す。表にはから求めたホイッピングの影響も示している。ホイッピングの影響は、限界状態(aCR)によって異なることが分かった。

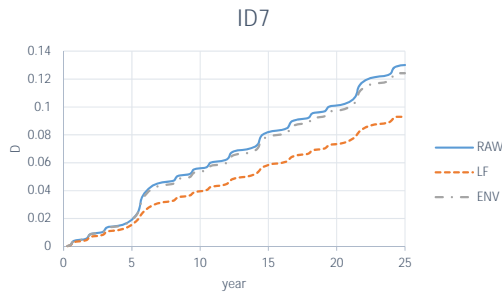


図6 マイナー則による疲労被害度のトレンド(複数の嵐)

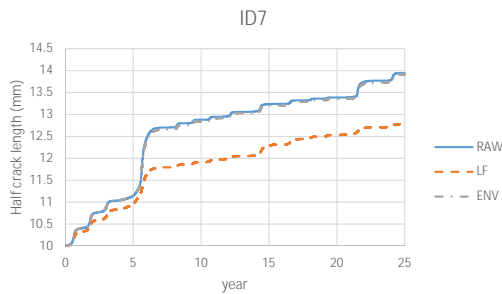


図7 疲労き裂伝播解析による疲労き裂成長のトレンド(複数の嵐)

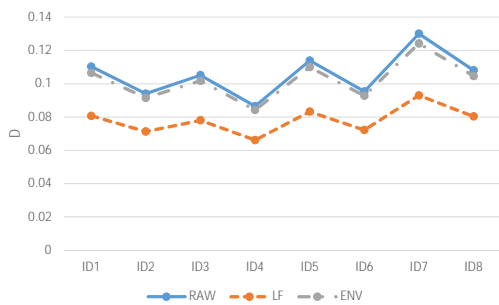


図8 25年間の遭遇海象履歴毎の疲労被害度

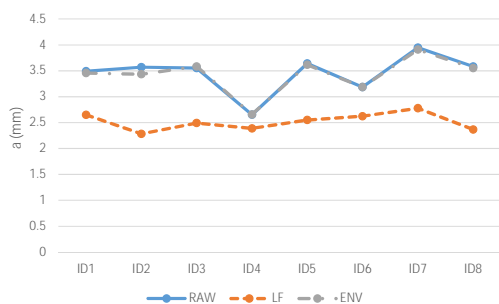


図9 25年間の遭遇海象履歴毎のき裂成長量

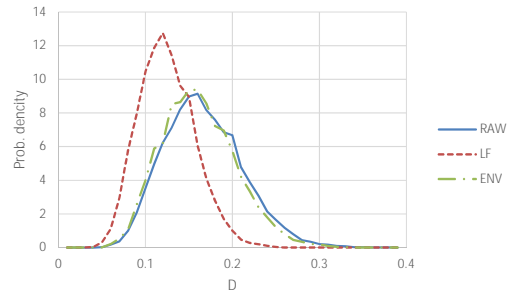


図10 25年後の疲労被害度(D)の確率分布

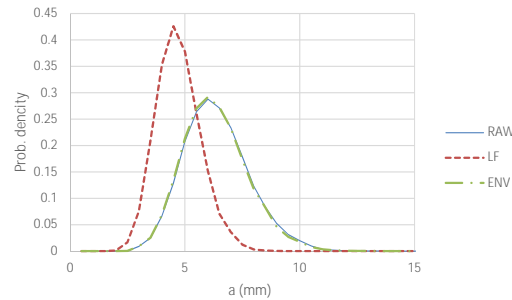


図11 25年後の疲労き裂進展量(a)の確率分布

表1 限界疲労被害度(DCR)に応じた信頼性指標(β)及びホイッピングの影響度

D_CR	1	0.8	0.6	0.4	
β	RAW	7.4	6.5	5.4	3.8
	LF	8.9	8.0	6.8	5.2
	ENV	7.6	6.7	5.6	3.9
Effect of whipping	21%	23%	27%	37%	

表2 限界疲労き裂長さ(aCR)に応じた信頼性指標(β)及びホイッピングの影響度

ΔaCR(mm)	40	30	20	10	
β	RAW	8.3	7.1	5.3	2.3
	LF	10.4	9.1	7.2	3.9
	ENV	8.4	7.1	5.4	2.3
Effect of whipping	25%	28%	35%	71%	

### (3)まとめ

この研究によって、ホイッピングが船体の疲労寿命に及ぼす影響が、き裂成長の観点から明らかになり、現在のマイナー則に従う疲労設計の安全性を確認することができた。

本研究を通じて、ホイッピングを含む長期荷重履歴の作成プログラム及び、き裂進展の加速・減速現象を再現可能でかつ任意のランダム波形に対応した疲労き裂伝播解析プログラムが成果として得られた。これによって、高サイクル応力の作用順序を考慮した疲労寿命評価が可能になった。また、作成したプログラムを軸に構造信頼性解析を行うシステムを構築したことで、これまで定量的に扱

えなかった操船や工作等に関する不確定因子を設計で考慮することが可能になった。

以上の成果によって、船舶の疲労設計の高度化が実現し、今後の大型船や新形式船の安全性確保に繋がると考えられる。

#### <引用文献>

[1] (一財)日本船舶技術研究協会 超大型コンテナ船の構造安全対策の検討に係る調査研究報告書, 2009

[2] 豊貞雅宏, 丹羽敏男, 構造物の疲労寿命予測, 共立出版, 2001年初版発行.

[3] Oka, M. et al : A fatigue design for large container ship taking long-term environmental condition into account, Proceedings of 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2011), Rotterdam, the Netherlands, June19-24, 2011.

[4] 河邊寛他: 船体構造部材の疲労強度評価のための嵐モデルについて, 日本造船学会論文集 第193号(2003), pp.39-47.

[5] 後藤浩二他, 複数周波数成分を有する重畳応力条件下における疲労き裂伝播挙動解析, 日本船舶海洋工学会論文集 第17号, 2013年6月, pp.75-81.

[6] 北村欧他, 高-低周波重畳応力作用下における疲労き裂伝播試験の一考察, 日本船舶海洋工学会講演会論文集第14号, 2012.5, pp.13-16.

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

岡正義, 丹羽敏男, 高木健, ホイッピングが長期疲労寿命に及ぼす影響について, 日本船舶海洋工学会平成27年度春季講演会講演論文集, 査読無, 第20号, 2015, 475-478

岡正義, 丹羽敏男, 高木健, ホイッピングを考慮した疲労強度評価に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 査読有, Vol.21, 2015

Masayoshi Oka, Toshio Niwa, Ken Takagi, A Study on the effect of hull girder vibration on the fatigue strength, Proceedings of Analysis and Design of Marine Structures 5th International Conference on Marine Structures, 査読有, 5<sup>th</sup>, 2015, 293-300

岡正義, 丹羽敏男, 高木健, 構造信頼性解析における疲労強度推定法の検討 日本船舶海洋工学会平成26年度秋季講演会講演論文集, 査読無, 第19号, 2014, 263-266

岡正義, 丹羽敏男, ホイッピングによる振動応力を考慮した疲労寿命評価法, 海上技術安全研究所研究発表会講演集, 査読無, 第14

回, 2014, 62-69

岡正義, 丹羽敏男, 高木健, ホイッピングを考慮した疲労寿命評価に関する研究, 日本船舶海洋工学会平成26年度春季講演会講演論文集, 査読無, 第18号, 2014, 497-500

〔学会発表〕(計2件)

岡正義, 船体のホイッピング振動を考慮した疲労強度評価, 日本マリンエンジニアリング学会 材料工学研究委員会, 2014年08月22日

岡正義, 船体のホイッピング振動を考慮した疲労強度評価, 日本材料学会 信頼性工学部門委員会, 2014年08月22日

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

岡 正義 (Masayoshi Oka)  
国立研究開発法人海上技術安全研究所 構造安全評価系 構造解析研究グループ グループ長

研究者番号: 70450674

##### (2) 研究分担者

丹羽 敏男 (Toshio Niwa)  
国立研究開発法人海上技術安全研究所 構造基盤技術系 保守管理技術研究グループ グループ長

研究者番号: 10208267

##### 高見 朋希 (Tomoki Takami)

国立研究開発法人海上技術安全研究所 構造安全評価系 構造解析研究グループ 研究員

研究者番号: 50586683

##### (3) 連携研究者

##### (4) 研究協力者

高木健 (Ken Takagi)  
東京大学大学院新領域創成科学研究科海洋技術環境学専攻 教授