

# 論文の内容の要旨

論文題目 機能要求に応じた船体構造設計のための疲労寿命推定法に関する研究  
(A study on the fatigue life evaluation for ship structural design complying with functional requirements)

氏 名 岡 正義

## 1. 序論

安全性や環境適合性に関する要求の高まりから、船舶や海洋構造物の設計における基準や規則の要求範囲は大きく広がりつつある。また、従来の経験則に基づく仕様要求から機能要求へ移行しつつある。この背景として、船舶や海洋構造物の機能の定量評価技術の進展がある。船の構造設計の分野では、国際海事機関（IMO）で目標指向型の構造基準（Goal Based Standards : GBS）[1] が採択されている。しかし、GBSでは機能要求が一部で取り入れられているものの、経験則をベースとした寸法要求等の規定も多く残っており、安全性能の定量評価技術に基づく指針という観点では完全なものではない。本論ではGBSの不十分な点を解消し、ルールへの機能要求項目拡張を目指して、それに必要な技術を確立することを目的とする。具体的には新たな疲労強度の評価法を示し、機能要求型のルールに用いる定量評価技術としての課題を論じる。

## 2. 船体構造設計の現状と課題

船の大型化に目を向けると、これに伴ってホイッピング振動による高周波の応力成分が、設計で考慮している出合い波の周波数帯の低周波応力に重畳することで、船体に作用する応力が増えると言われている。ホイッピングの構造強度への影響については、現在盛んに研究が行われているが、少なくとも疲労寿命については繰り返し応力が増えることで低下すると考えられ、その影響を定量的に示すことが、今後の大型船の安全確保のため重要な課題となっている。

本研究ではまず、実船で計測された図1に示すホイッピングが重畳した応力波形(RAW)と、ローパスフィルタで、スラミングとそれに続くホイッピング振動を除去した応力波形(LF)とを用いて疲労被害の解析を行った。その結果、図2（Onboard stress measurement）に示すように、マイナー則による疲労被害度において100%もの差が生じることを確認した。しかし、現在のところ、大型船で疲労損傷は発生しておらず、実態との乖離が生じている。この理由は、図2に示す現行の解析的手法での疲労被害の予測結果(Cal.)からも読み取れるように、設計で確保する安全余裕に収まっているからであるが、今後の大型化に対して、いつまでも

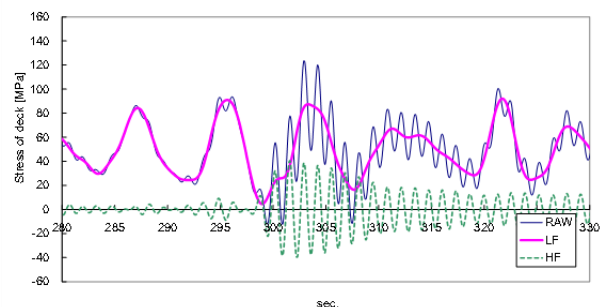


図1 実船の応力波形とフィルタ処理波形

安全である保証はないため、研究での説明が望まれている。

これまでの研究で、構造部材がスラミングのような過大荷重を受けると、き裂進展の遅延減速現象が起こることが分かっている。本論では、実態との乖離が起きている理由として、遅延現象によるき裂成長からみた疲労被害の低減があると考え、解析的手法を用いて、この影響の解明を試みることにした。

### 3. 疲労き裂伝播解析手法を用いた疲労寿命推定

#### 3.1 荷重履歴と解析プログラム

ホイッピングを対象として、き裂進展の遅延現象の影響を評価するには、実船の荷重履歴を用いて、き裂先端の非線形挙動を再現した疲労き裂伝播解析を行う必要がある。これまでの研究では、嵐への遭遇を考慮した荷重履歴（嵐モデル）[2]を用いて遅延現象を再現していたが、短期の海面については一様振幅のブロック荷重を用いており、ホイッピングを含むランダム荷重下での評価ができていなかった。そこで本研究では、北大西洋25年間に相当するランダム荷重をモデル化して作成し、これを用いて、疲労き裂伝播シミュレーションを行った。ランダム荷重のモデル化は、まず全船FE解析で求めた応力応答及び波スペクトルの線形重ね合わせによってLFの応力波形を作成し、次にホイッピングをモデル化した減衰振動波形を重畳させて、実船に相当するRAWの応力波形を作成した。作成したランダム応力波形を図3に示す。また、解析プログラムを用いて遅延現象を再現するため、豊貞らによって開発された「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」[3]をベースに、1サイクルごとに応力振幅が変動するランダム荷重下での計算が可能になるよう、プログラムを改良した。

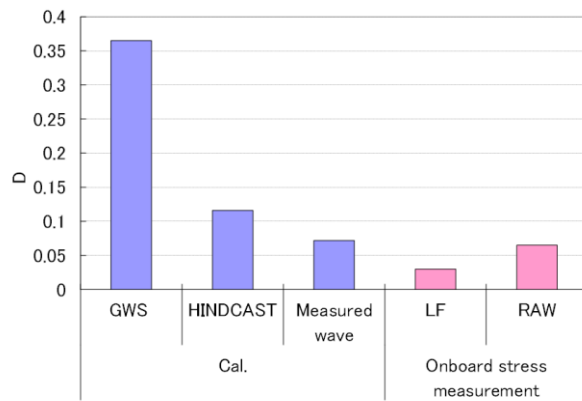


図2 実船計測(O.B.M)及び解析予測(Cal.)で求めた25年後の疲労被害度D

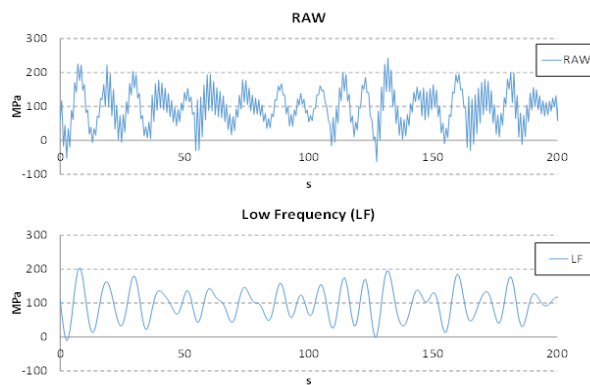


図3 作成したランダム応力波形

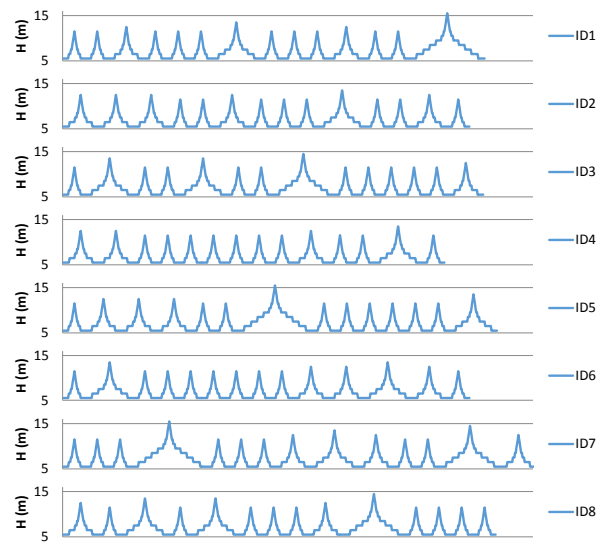


図4 北大西洋25年間を想定した嵐荷重

### 3.2 解析結果

#### 3.2.1 RAWとLFとの関係

北大西洋25年間に相当するランダム荷重履歴を用いて疲労寿命予測を行った。解析用に作成した嵐荷重を図4に示す。発現する嵐ランクの異なるID1～ID8の荷重パターンを用意した。マイナー則での解析結果を図5に、疲労き裂伝播解析の結果を図6にそれぞれ示す。いずれの評価法も、25年後の疲労被害におけるRAWとLFとの差は約30%となり、RAWとLFとの大小関係については評価法による違いは出なかった。

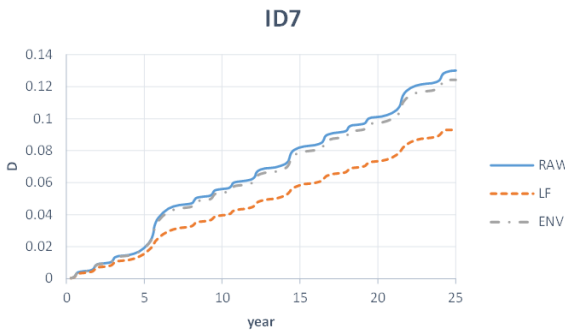


図5 複数の嵐荷重下での疲労被害度の時系列

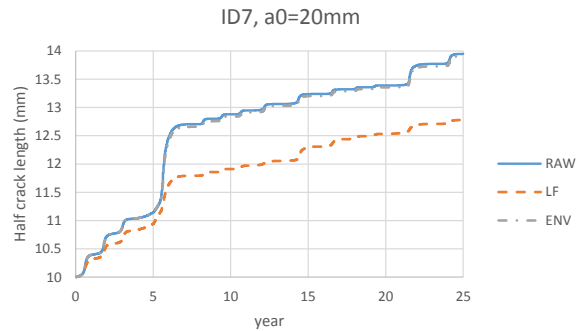


図6 複数の嵐荷重下での疲労き裂伝播曲線

#### 3.2.2 遅延現象の影響

図5と図6を比べると、マイナー則と疲労き裂伝播則とは、疲労被害の進行が異なっているのが分かる。この差が、き裂進展の遅延現象によるものである。一般にはマイナー則による疲労被害度Dと疲労き裂伝播解析によるき裂進展量 $\Delta a$ とは直接比較することができない。しかし、き裂先端に塑性域の形成が少なく遅延現象が生じにくい初期段階においては、Dと $\Delta a$ は比例関係で近似することが可能と考えられる。き裂先端における現在の塑性域が、過去の塑性域より前方に成長している場合、遅延現象は生じないといわれており、最初に遭遇する一つの嵐の期間は遅延が生じない状態に近い。そこで、最初の嵐の期間におけるDと $\Delta a$ の間には比例関係が成り立つと仮定して、Dを $\Delta a$ に置換えた。両者を比較した結果を図7に示す。遅延現象の影響は、図7の例では25年後で約180%と、前節で示したホイッピングの影響よりも大きく現れており、これによって損傷実態との乖離がほぼ埋まることが分かった。

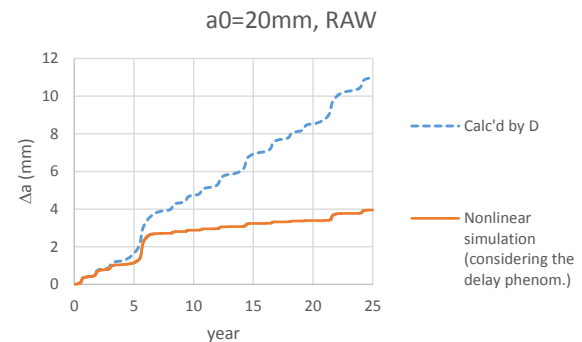


図7 D から $\Delta a$  への置換えによるき裂成長の比較

### 4. 構造信頼性解析からみた疲労寿命推定

遅延現象の他に、ホイッピングの影響を相殺している因子として、操船影響と言われる実運航での減速や針路、遭遇海象に伴う荷重の変化があり、これが疲労寿命を延ばす側に寄与している可能性が高い。操船影響については、実データを得るのが大変困難な状況であるが、構造設計の立場では、安全余裕の観点で操船影響がどの程度寄与するのかを大まかにでも把

握しておくことが重要である。そこで、船速、波向、遭遇する嵐のランクを変数としてモンテカルロ・シミュレーションにより構造信頼性解析を実施した。荒天下での減速を考慮した場合としない場合とで、疲労被害度の確率分布をそれぞれ求めた。波向については確率分布が確立していないため、一様分布の確率を与えた。25年後の確率分布を図8に、確率分布から求めた信頼性指標( $\beta$ )及び破損確率(Pf)[4]を表1に、それぞれ示す。現在の設計でみているLFで $V=3/4V_s$ の一定速の場合と比べて、実応力(RAW)で実船速(Variable)を考慮した方が破損確率は低くなり、ホイッピングによる疲労被害の増加分が、減速による疲労被害の低下分で相殺される可能性が高いことが示された。

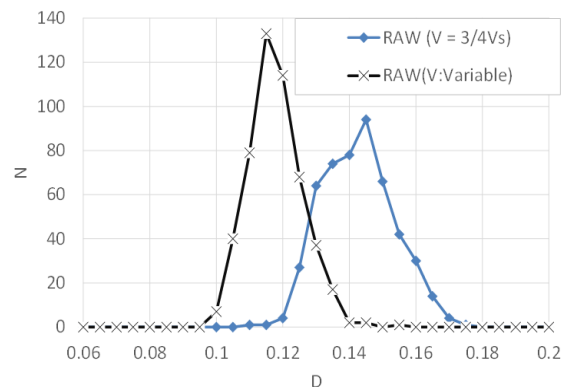


図8 25年後の疲労被害度の確率密度

表1 信頼性指標( $\beta$ )及び破損確率(Pf)

	V	$\beta$	Pf
RAW	3/4Vs	4.70	1.29E-06
	Variable	8.01	< E-16
LF	3/4Vs	7.37	8.69E-14

## 5. 結論

本論では、疲労き裂伝播解析手法を用いて、ホイッピングが重畳したランダム荷重履歴下での疲労き裂進展の評価を行った。その結果、遅延減速現象によるき裂成長の低下分が、ホイッピングによる疲労被害の増加分を上回る可能性が高いことが分かり、大型船で疲労損傷が発生していない現状を説明することができた。

今後の疲労寿命評価においては、本論でアプローチしたように、物理現象に即した定量評価が必要であり、GBSの機能要件に、「物理現象に則した評価法で疲労寿命を推定すること」と条件を加えることによって、より合理的なルール及び構造設計が実現できると考えられる。

## 参考文献

- [1] IMO/MSC87/26/Add.1/ANNEX1,RESOLUTION MSC.287(87) (adopted on 20 May 2010)
- [2] 富田康光他:波浪荷重の統計的性質と疲労強度評価のための波浪荷重のシミュレーション法(その3), 日本造船学会論文集 第177号 pp.381-390 (1995)
- [3] 構造物の疲労寿命予測, 共立出版, 2001年初版発行
- [4] 安藤清他, 船体構造信頼性の評価事例に関する一考察, 日本造船学会論文集 第166号 pp.325-334 (1989)