

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 21 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420829

研究課題名(和文) 実海域での運航を考慮した船体疲労強度設計のための設計海象・設計荷重に関する研究

研究課題名(英文) On the design sea state and the design load for the fatigue strength of ship structure taking account of actual operation

研究代表者

深澤 塔一 (FUKASAWA, TOICHI)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80143171

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：船体疲労強度設計に「設計海象」という考え方を導入する場合、船体最終強度のようにいくつかの海象に絞ることはできないため、すべての海象を考慮しなければならない。本研究では、まず、疲労強度に有意であると考えられる短期海象をモデル海象として抽出し、疲労強度に有意となる短期海象の特定を行った。次に、実際の船舶が航行する太平洋・大西洋航路を対象として、大圏航路を航行した場合と最短時間航路を航行した場合における疲労被害度を求め、航路の違いが疲労強度にどのように影響するかを、海象と荷重の観点から検討した。これらの結果を比較することにより、船体疲労強度設計のための設計海象および設計荷重に関する考察を行った。

研究成果の概要(英文)：When introducing the concept of "Design Sea State" to the fatigue strength design of ship structure, all the sea states must be considered because it is not possible to narrow down to some easily like the ultimate strength design of ship structure. In this research, several short-term sea states are firstly extracted as the model sea state, which are considered to be significant in fatigue strength of the ship, and the short-term sea states which are significant for fatigue strength are specified. Then, fatigue damage factors are calculated for the actual Pacific / Atlantic routes in case of sailing in the Great Circle Route and in the Minimum Time Route, and the difference of fatigue damage in each route is investigated from the viewpoint of sea state and sea load. Comparing these obtained results, the Design Sea State and the Design Load for the fatigue strength design of ship structure are discussed.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：船体構造設計 疲労強度 設計海象 ウェザールーティング 応力頻度分布 疲労被害度

## 1. 研究開始当初の背景

船体構造設計においては、船舶の安全性をより高めるための基本的な考え方として、IMO が提唱する GBS (Goal-Based new ship construction Standard、船舶建造における目的志向型基準) に基づき、IACS (International Association of Classification Societies、国際船級協会連合) が Robust Ship (頑丈な船) を目指す共通構造規則 CSR (Common Structural Rules) の検討を開始し、2005 年には油タンカーとばら積貨物船に対する規則をリリースした。その後、CSR におけるタンカー規則とバルカー規則の整合化が検討され、2009 年から HCSR (Harmonized Common Structural Rules、調和共通構造規則) の検討が始まり、2012 年から業界へのヒヤリングが実施され、2015 年 7 月 1 日付で、ばら積貨物船および油タンカーのための共通構造規則(CSR BC & OT)が施行された。

GBS/CSR の目的は、船舶の安全性向上と環境保全のために、構造規則の統一を目指すものであるが、これらの規則は、過去に建造された船の性能実績を基に作成されているため、近年大型化が顕著であるコンテナ船や、今後計画されている環境・エネルギー問題に配慮したさまざまな新形式船に対しても適用可能であるかについては、検討すべき点が多々残されている。特に、船体疲労強度に関して言えば、船級協会規則はマイナー則 (Palmgren-Miner rule) をベースに構築されているが、この理論は線形重ね合わせの考え方に基づいているため、実際の非線形な疲労き裂の発生予測に対して、膨大な過去の蓄積データを用いて線形化のためのキャリブレーションを綿密に行っているのが現状である。したがって、船の形式がこれまでと異なる場合には、必ずしも過去の蓄積データが適用できないため、マイナー則による推定法では精度の高い設計はできないと考えられる。

船体構造に作用する荷重は本質的に非線形であり、かつ疲労き裂の発生・伝播は荷重の発現順序に大いに依存する。さらに、スラミング等の衝撃荷重によって生ずるホイッピングや、比較的静穏な海域でも発生するスプリングングといった船体縦曲げ振動の疲労強度に対する影響の重要性を指摘する動きも高まっている。また、船がどの海域をどの方向にどのような船速で航行したかによって、疲労き裂の進展は異なってくるが、現在、このような海象や操船の影響が船体疲労強度にどのような影響を及ぼすのかについては、ほとんど解明されていない。

したがって、今後さまざまな新形式船が出現するであろうことに鑑み、船体疲労強度設計においては、「実際の運航形態に即した環境条件を考慮に入れて船体疲労強度設計を精度よく行うために、船が航行する海象や操船方法による荷重の違いを明らかにし、精度

の高い疲労強度評価法に適合した設計荷重を提案すること」が急務である。

## 2. 研究の目的

前出のような背景に鑑み、本研究では、既存船等の過去に蓄積されたデータのフィードバックによるところが大きかったこれまでの船体疲労強度設計に代わり、より安全で信頼できる船体構造設計を行うために、理論的バックグラウンドの確かな疲労強度推定法について検討した。具体的には、船体疲労強度設計において海象・操船影響を考慮した荷重推定法とそれによる疲労強度評価法を検討するために、実海域での運航を考慮して設計海象・設計荷重について考察した。

船体構造の疲労強度を推定する場合、現在ではマイナー則と呼ばれる線形重ね合わせ理論に基づく累積被害則が用いられている。マイナー則を船体疲労強度推定に用いる場合、船体に作用する応力の長期分布の特性により、発現確率  $10^{-2}$  程度の小振幅で発現頻度が多い応力成分が最も大きな影響を及ぼすことが明らかになっている。しかしながら、実際の船体疲労き裂は、比較的大きな応力成分により顕著に進展し、かつ荷重の作用順序に依存する非線形な挙動をするため、マイナー則を船体構造設計規則に用いる場合は、通常、過去に蓄積されたデータとのキャリブレーションが必要不可欠となる。したがって、過去のデータの無い新形式の船舶に対する疲労強度を推定するためには、マイナー則のような線形累積被害則ではなく、き裂の非線形挙動をも表現できるき裂伝播則を用いることが必要となる。しかしながら、このようなき裂伝播シミュレーションは、荷重の時刻歴に大きく依存するため、荷重の詳細が明確でない現在、構造設計に適用できる状況にはない。

本研究では、このき裂伝播則を船体構造設計に適用すべく、船体疲労き裂伝播解析のための設計海象および設計荷重について検討を行った。船舶は、その一生においてさまざまな海象に遭遇するが、船体構造設計では、波の統計的性質が一定時間変化しない短期海象というものを定義し、それらを重ね合わせることによって船の長期にわたる発生応力を調べる方法が用いられる。船体の最終強度を考える場合、一生のうちに一度だけ発現するような  $10^{-8}$  の発現確率の最大荷重を検討すればよいので、それが発生すると仮定できる海象・荷重を設計海象・設計荷重とすることができる。しかしながら、疲労強度に関しては、様々な発現確率の応力が影響するので、設計海象 1 つに限定できない。したがって、本研究では、船体疲労強度に関して、まず、短期海象ごとの非線形船体応答シミュレーションを行い、得られた応力時刻歴から各短期海象の疲労強度に対する寄与度を求め、これらを基に船の一生の疲労強度を簡便かつ精度よく求めることができるような海象設

定法について検討を行った。さらに、船舶の運航航路の影響を検討するために、ウェザールーティングを用いて最短時間航路を求め、大圏航路と最短時間航路において非線形船体応答シミュレーションを行い、得られた応力時刻歴から疲労被害度を求め、ウェザールーティングの疲労強度への影響について検討を行った。

### 3. 研究の方法

本研究で計算対象とした船舶は、船長 280.0 m、船幅 42.8 m、型深さ 24.5 m、喫水 14.2 m の 6000 TEU 相当の仮想的ポストパナマックスコンテナ船であり、船体の弾性振動を考慮するために、船体を一本の弾性梁として扱った。シミュレーションには、非線形ストリップ法に基づいた波浪中船舶の非線形応答計算プログラム TSLAM を用いた。TSLAM では、スラミングによって誘起される弾性振動を含む荷重・応答の非線形性を考慮することが可能である。

本研究の内容は、短期海象の疲労強度に対する寄与度の解析と、ウェザールーティングの疲労強度に対する影響の検討の 2 つに分けられる。

#### (1) 短期海象の疲労強度に対する寄与度

ここでの研究では、IACS が公表している北大西洋の長期波浪発現頻度分布表に現れるすべての短期海象において非線形船体応答シミュレーションを行い、得られた船体中央断面における縦曲げモーメントの時系列から縦曲げ応力のピークを算出し、レインフロー法を用いて応力振幅とその繰り返し回数を求め、縦曲げ応力範囲 (stress range) の発現確率をワイブル分布で近似した。なお、計算においては、船速を 15.27 knots とした。

今、短期海象の発現確率を  $p(H_s, T_z)$  と表すと、1 つの短期海象中で、ある応力範囲  $\alpha_{cr}$  の超過確率は、以下の式によって求めることができる。

$$Q(\sigma_{cr}, H_s, T_z) = p(H_s, T_z) \exp \left[ - \left( \frac{\sigma_{cr}}{\alpha} \right)^\beta \right]$$

ここで、 $H_s$  は有義波高、 $T_z$  は平均波周期であり、 $\alpha$ 、 $\beta$  はワイブル分布における尺度パラメータと形状パラメータである。

#### (2) ウェザールーティングの影響

ウェザールーティングとは、自然環境の中でより安全で経済的な航路を選定する技術のことであるが、ウェザールーティングを行うためには、航海期間において、風、波、海流など、船舶運航に大きな影響を与える外乱の情報を正確に予測する必要がある。これらはまとめて気象・海象予測と呼ばれ、現在、主要国において様々なデータを統一し、データ値をそれぞれの項目毎に GPV (Grid Point Value) として提供している。

本研究では、これらのデータを基に、等時間曲線法を用いて最短時間航路を求めた。す

なわち、出発地から目的地に向けて大圏航路を求め、GPV データから周囲の波の情報を計算し、大圏航路の向きを基準に左右 0.5 度毎に 40 方位に 1 時間航行したとして 1 時間後の位置を求める。これを繰り返すことによって 24 時間後までの位置を求めると 1 つ目の等時間曲線が得られる。得られた等時間曲線の各点から目的地までの大圏航路を求め、大圏航路の方向を基準に左右 80 方位に初めの等時間曲線を求めた時と同様に 24 時間後に到達できる点を求める。なお、ウェザールーティングの航路の選定には、対象海域を航行する船舶が船体に受ける波浪から速力がどの程度低下するのか推定する必要があるので、本研究ではこれまでに発表されている船長 244.8 m、平水中速力 21.8 knots のコンテナ船の波浪中速力曲線を修正して用いた。

### 4. 研究成果

#### (1) 短期海象の疲労強度に対する寄与度

波の統計的性質が一定時間変化しない短期海象の継続時間を 3 時間と仮定すると、船の一生における一つの短期海象との遭遇確率は、船の寿命を 25 年として、以下のように見積もることができる。

$$q = (3 \text{ 時間}) / (25 \text{ 年} \times 365 \text{ 日} \times 24 \text{ 時間}) \\ = 1.37 \times 10^{-5}$$

これより、一つの船が一生に遭遇する短期海象の総数は 100000 のオーダーとなることがわかる。この数字を用いて、前出の方法によって得られた北大西洋の波浪発現頻度表にあるすべての短期海象における応力範囲の発生確率より、それぞれの短期海象の応力範囲に対する寄与度を整理した。

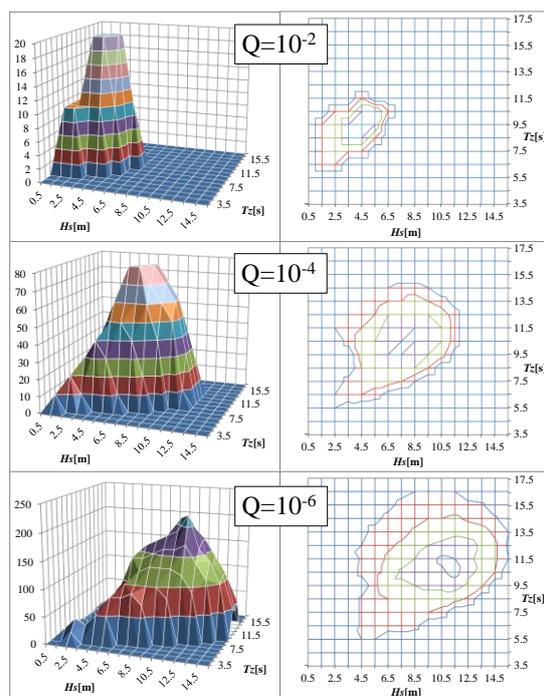


図 1 応力範囲の発生確率への短期海象の寄与度

図1は、応力範囲の発生確率  $10^{-2}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-6}$  に対する短期海象の寄与度を示す。図からわかるように、応力範囲の各発生確率における支配的な短期海象は、確率が小さくなるにつれて、より低い有義波高のものからより高いものへと変化している。一方、発生確率が変わっても支配的な短期海象の平均波周期はあまり変化しないが、確率が下がるにつれて平均波周期はわずかに増加することがわかる。

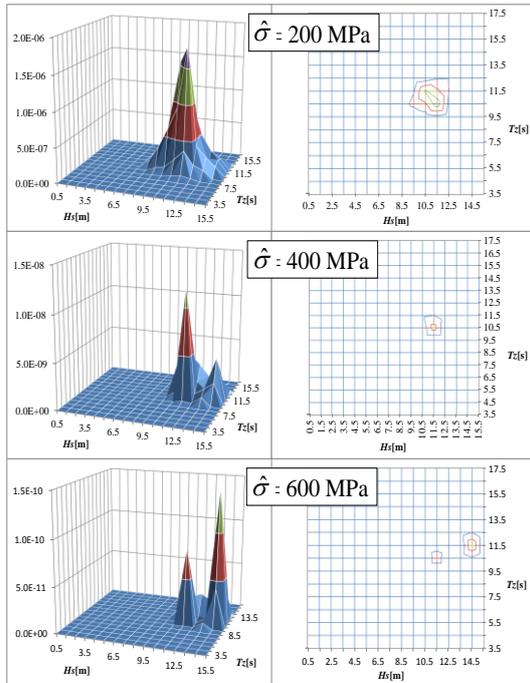


図2 応力範囲レベルへの短期海象の寄与度

一方、図2は、200 MPa、400 MPa、600 MPa の各応力範囲レベルに対する短期海象の寄与度を示す。図から、有義波高  $H_s = 11.5$  m および平均波周期  $T_z = 10.5$  s の短期海象の寄与度が、応力レベルに係らず、比較的大きくなっていることが分かる。

図1、図2から、応力範囲のある発生確率に影響を与える短期海象は有義波高とともに変化するものの、大きな応力範囲に有意となる短期海象はいくつかに絞ることができることが分かった。すなわち、応力範囲の各発生確率に対して支配的となる短期海象は、有義波高については低いものから高いものまでばらつくが、平均波周期については、発生確率ごとに若干は変化するものの、大きくは変わらず、特定の値に留まる。また、有義波高 11.5 m で平均波周期 10.5 s の短期海象が、どの応力範囲の発生確率に対して、高応力領域において、応力範囲に対して比較的大きな影響を及ぼす。これらの結果から、疲労強度を検討する場合でも、すべての海象を対象とするのではなく、いくつかの海象を対象を絞ることができることが判明した。

## (2) ウェザールーティングの影響

今回検討を行った航路は、北太平洋においてサンフランシスコ沖 (SF: 北緯 38 度、西経 123 度) と東京湾湾口 (TY: 北緯 34 度 40 分、東経 140 度) との間を航行するものと、北大西洋においてビショップロック (BR: 北緯 50 度、西経 5 度) とフロリダ沖 (FL: 北緯 35 度 30 分、西経 72 度 40 分) との間を航行するものとした。船舶の操船法として、通常の大圏航路 (GCR: Great Circle Route) と最短時間航路 (MTR: Minimum Time Route) の2つを考え、出発日を同日同時刻に設定し、最短時間航路は遭遇海象と航行データを用いて前述の等時間曲線法により求めた。使用したデータベースは、緯度経度 2.5 度毎の各グリッド上の風と波の値で、データが入力されていない海域 (大陸、北緯 60 度以上および北緯 30 度より南側の太平洋) については航行不可能海域として処理した。

疲労被害度の検討に用いた航海結果は、疲労強度への影響が大きいのと思われる 10 年間分 (3652 航海) の同時刻に出発させた航海の中から極端に荒れた海象の出現が見られた 1 航海をそれぞれに選択した。その出発日 (出発時刻はいずれも 12:00) と航行時間を下記に示す。

<u>SF → TY (2008 年 2 月 3 日 発)</u>	
GCR : 227 時間	MTR : 204 時間
<u>TY → SF (2009 年 12 月 1 日 発)</u>	
GCR : 217 時間	MTR : 201 時間
<u>BR → FL (2003 年 1 月 17 日 発)</u>	
GCR : 170 時間	MTR : 148 時間
<u>FL → BR (2009 年 12 月 19 日 発)</u>	
GCR : 144 時間	MTR : 137 時間

これより、最短時間航路の航行時間が大圏航路に比べて半日程度短いことが分かる。これは以下の理由による。高波高に遭遇すると船速が大きく低下するが、同じ高さやそれ以上の波高と遭遇しても、船と波との出合角を正面波から斜め波に変化させることによってほとんど船速低下を起こさないように操船できる。最短時間航路では、このように高波高を避け、船速を低下させないように航行するため、航行時間が短くなった訳である。

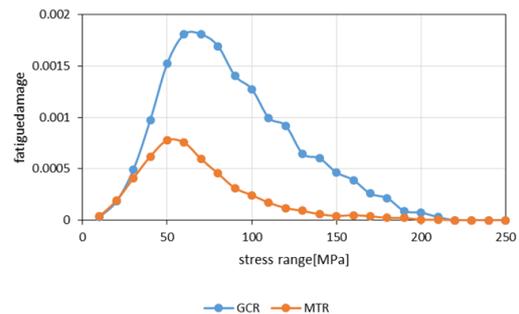


図3 応力範囲ごとの疲労被害度 (SF→TY: 2008 年 2 月 3 日 発)

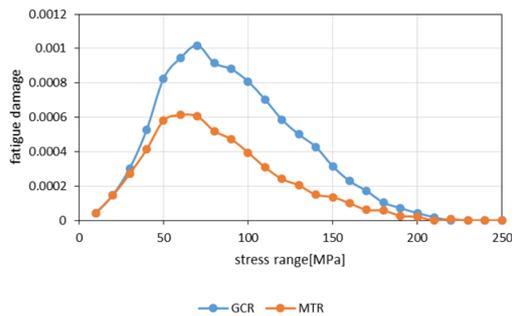


図4 応力範囲ごとの疲労被害度  
(TY→SF: 2009年12月1日発)

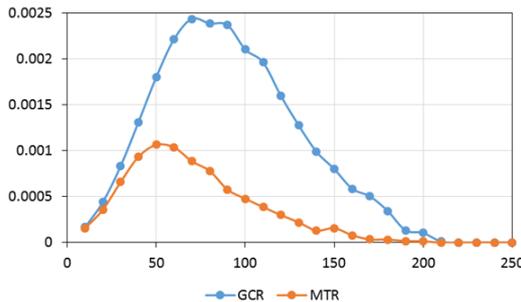


図5 応力範囲ごとの疲労被害度  
(BP→FL: 2003年1月17日発)

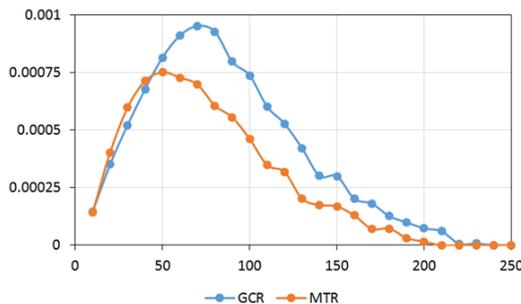


図6 応力範囲ごとの疲労被害度  
(FL→BR: 2009年12月19日発)

図3～6に各航路における応力範囲ごとの疲労被害度の値を示す。どの航路も50～150MPaの間で大圏航路の値の方が最短時間航路のものを大きく上回り、疲労強度への影響が大きいことが分かる。これらを積分した1航海分の疲労被害度を以下に示す。

SF → TY (2008年2月3日発)

GCR : 0.0159    MTR : 0.0050

TY → SF (2009年12月1日発)

GCR : 0.0096    MTR : 0.0054

BR → FL (2003年1月17日発)

GCR : 0.0244    MTR : 0.0083

FL → BR (2009年12月19日発)

GCR : 0.0097    MTR : 0.0072

これより、大圏航路の方が最短時間航路より、北太平洋ではサンフランシスコ沖から東京湾湾口に向かう航路で3.18倍、東京湾湾口からサンフランシスコ沖に向かう航路で1.78

倍、北大西洋ではビショップロックからフロリダ沖に向かう航路で2.94倍、フロリダ沖からビショップロックに向かう航路で1.35倍、疲労被害度が大きくなった。この結果から、一般的にも最短時間航路を航行の方が大圏航路を取るよりも疲労強度的に有利であると考えられる。したがって、荒れた海象が多く出現するような航路では、ウェザールーティングによって最短時間航路を選択することによって、航行時間の短縮のみならず、疲労被害度を軽減できると言える。

以上のように、本研究で用いた手法によって疲労強度に重要となる海象を明らかにし、それらをいくつかに絞ることができることが分かったので、これらの海象中で非線形船体応答シミュレーションなどを行い、具体的に荷重の時刻歴を計算すれば、き裂伝播則を船体疲労強度設計に適用することが可能となることが判明した。

#### 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2件)

- ① 立花雅樹、門田一輝、深沢塔一、田丸人意、コンテナ船の疲労被害度に対するウェザールーティングの影響について、日本船舶海洋工学会講演会論文集、査読無、23巻、2016、115-116
- ② T.Fukasawa、K.Kadota、Research on the method for determining significant short-term sea states for fatigue strength of a ship、29th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures、査読無、2015、14-19

[学会発表] (計2件)

- ① 立花雅樹、門田一輝、深沢塔一、田丸人意、コンテナ船の疲労被害度に対するウェザールーティングの影響について、日本船舶海洋工学会、平成28年秋季講演会、岡山、2016年11月21-22日
- ② T.Fukasawa、K.Kadota、Research on the method for determining significant short-term sea states for fatigue strength of a ship、TEAM2015、Vladivostok、Russia、12-15 October 2015

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

深澤 塔一 (FUKASAWA、Toichi)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80143171

(4)研究協力者

門田 一輝 (KADOTA、Kazuki)

立花 雅樹 (TACHIBANA、Masaki)