

令和 元年 10 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02432

研究課題名(和文) 間欠の高周波重畳荷重を受ける溶接継手疲労寿命評価法の開発

研究課題名(英文) Development of Fatigue Assessment Method for Welded Joints subject to Intermittently Hull Vibration Superimposed Wave Loadings

研究代表者

大沢 直樹 (OSAWA, NAOKI)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：90252585

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 27,300,000円

研究成果の概要(和文)：流力弾性解析により大型コンテナ船が遭遇するホイッピング重畳応力波形が以下の特徴を持つことが判った：スラミングは基本波4～5波に1回発生する；スラミング応力範囲は基本波応力範囲と同程度である；応力波形は波高によらず概ね相似である。上記特徴を備えた標準ホイッピング重畳応力波形を定式化した。標準波形を溶接継手に高速に負荷できる動電型疲労試験装置を開発した。標準波形を使用した定常・間欠ホイッピング重畳疲労試験を実施し、定常ホイッピング重畳時の溶接継手疲労寿命はRainflow法で推定できるが、間欠重畳時はRainflow法が安全側の推定を与えるとの結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、今日一般的なウェザールーティングに従う大型コンテナ船が遭遇する弾性振動重畳応力波形の統計的性質が初めて明らかになった。さらに、この特性を再現できる標準ホイッピング重畳応力波形が定式化され、標準波形を高速・正確・低コストに溶接継手試験体に負荷できる動電型疲労試験装置も開発された。これにより、超大型コンテナ船の安全性評価で喫緊の課題となっている、船体弾性振動を考慮した疲労強度評価法を構築するための系統的疲労試験が初めて可能になった。本研究に引続いて、多様な応力波形での追加試験実施が望まれるが、その際は開発した動電型疲労試験装置の高速性・経済性が大いに役立つと期待される。

研究成果の概要(英文)：From hydro-elasticity analysis results on slamming impact's occurrence frequency and its peak stress range, the characteristics of whipping superimposed stress waveform experienced by a large container ship can be simplified as a) the slamming impact occurs once in every 4 to 5 Primary Wave (PW) cycles; b) the maximum stress range due to slamming impact can be comparable to the PW stress range; c) the waveform show approximately similar waveform regardless of significant wave height. The 'reference whipping superimposed waveform', which emulates the simplified waveform, has been proposed. The Electric Exciter (EE)-driven fatigue testing machine, which can apply this 'reference waveform' to welded joints at high speed, has been developed. It is found that the fatigue life of welded joints under constantly whipping superimposed loadings can be predicted by RainFlow Cycle Counting (RFCC) method, while RFCC led to conservative estimates for intermittently superimposed cases.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：疲労 溶接継手 船体弾性振動 流力弾性解析 動電型疲労試験装置 レインフロー法 コンテナ船

## 1 研究開始当初の背景

近年、船舶の大型化に伴う船体固有振動数の低下により、弾性振動の重畳が疲労強度に及ぼす影響が無視できなくなっている。弾性振動影響を考慮した疲労設計法を確立するためには、実機が遭遇する重畳波形を用いて溶接継手の疲労試験を実施する必要がある。しかし、油圧疲労試験機を使用すると試験実施に許容限度を超えた時間と運転費用(電気料金)が必要になる。

大沢ら(2015)は、回転偏心錘り(Eccentric Mass)を駆動源とする疲労試験装置(EM 試験装置)を開発してスプリング間欠重畳疲労試験を実施し、間欠重畳時に疲労き裂発生寿命が延伸する現象を見出した。しかし、大型コンテナ船で重要なホイッピング重畳については系統的疲労試験を実施できなかった。既往研究では、短時間の実船計測波形が油圧試験機で繰返し負荷され、実船が遭遇するホイッピング波形の統計的特性を再現した間欠重畳疲労試験の例はない。

## 2 研究の目的

a) 荒天避航と海象発現順序を考慮した、大型コンテナ船の流力弾性シミュレーションを系統的に実施し、実船が遭遇するホイッピング重畳応力波形の統計的性質を精査し、疲労試験で負荷する応力波形を選択する;b) 任意の弾性振動重畳応力波形を、高速かつ低コストで負荷できる、疲労試験機を開発する;c) 開発した新試験装置により a)で選択した間欠重畳波形を用いて溶接継手の間欠ホイッピング重畳疲労試験を実施する;d) 間欠ホイッピング重畳応力波形の特徴と疲労寿命の関係を調べる。

## 3 研究の方法

(1) a) Tamaru (2016), Luis et al. (2017)の手法により荒天避航を考慮した海象時刻歴を生成する;b) Iijima et al.(2018)の非線形流力弾性計算コード SODDAC により、a)で遭遇する各海象でホイッピング重畳応力時刻歴を計算する;c) b)の応力時刻歴のスラミング衝撃発生頻度・スラミング衝撃強度等の統計量を評価し、統計量と海象・運航パラメタの相関を調べる;d) ホイッピング重畳海象を代表する応力波形と、非重畳海象を代表する応力波形を定め、疲労試験の荷重条件を定める。

(2) 大出力・高速の動電型起震機を駆動源とするEE 試験装置を製作する。試験体歪およびロードセル出力で制御し、歪制御時は光ファイバセンサによりノイズ・ドリフトの影響を抑制する。

(3) 予備試験として(2)で製作したEE 試験装置により、(1)で決定した応力波形を負荷して定荷重振幅、定常ホイッピング重畳、間欠ホイッピング重畳試験を実施する。比較のため(1)の応力波形を油圧試験装置で負荷する試験も実施する。試験結果を分析してホイッピング間欠重畳応力波形の特徴と疲労寿命の関係を調べる。

## 4 研究成果

### 4.1 6500 TEU コンテナ船が遭遇する船体弾性振動重畳応力波形

解析対象は満載状態の 6500TEU コンテナ船 ( $L \times B \times D_{d=}$  280×43×26\_14 m)である。船速低下は JASNAOE P-27 研究委員会が使用した特性曲線で評価した。北大西洋を大圏航路(GCR)最小時間ルーティング(MTR)に従って 1 年間航行する間の、1 時間毎の遭遇海象・進路・船速時刻歴を、日本気象協会 hindcast データを用いて、出航日をずらしながら多数生成した。

評価対象は船体中央部上甲板ロンジである。縦曲げ応力波形をFFTフィルタで基本波(PW), 弾性振動(HV, 図1の青線)成分に分離した。HV波形について以下を解析した: HV波形極小~極大応力範囲 $\Delta S_{PK}$ の時刻歴(図1オレンジ線)を描く; 閾値を上回る極大値 $\Delta S_{SLAM}$ とその発生時刻の順列;  $\Delta S_{SLAM}$ の統計量と発生間隔。閾値は $\Delta S_{PK}$ の標準偏差の1.5倍とした。

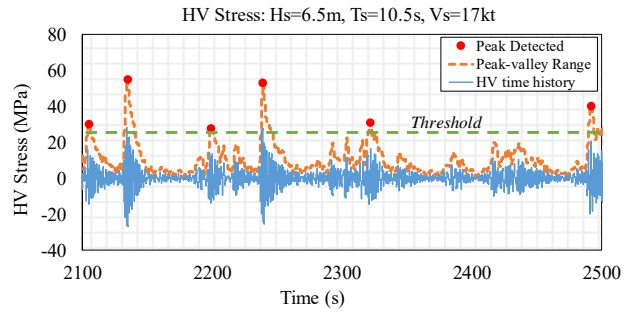


図1. スラミング衝撃検出の例.

隣接するスラミング衝撃間の平均PW波数を $C_{wh}$ と書く。 $\Delta S_{SLAM}$ の計算結果を分析した結果, MTR航路で, 船速低下が生じない限界船速, かつ有義波高 $H_s > 5.5m$ の条件では波高 $H_s$ によらず $C_{wh}$ が0.15~0.20に収れんすることが分かった。PW応力範囲を $\Delta S_{PW}$ と書く。 $C_{wh}$ の分析と同じ条件では $\Delta S_{SLAM}$ と $\Delta S_{PW}$ の比が $H_s$ によらず概ね一定であることが分かった。

以上より, ホイッピング重畳疲労試験用応力波形の要件として以下を提案した: PW(正弦波)4~5波につき1回のスラミング衝撃発生; PW応力範囲と衝撃応力範囲が同程度; PW被害度と重畳時被害度の比が流力弾性解析結果波形とほぼ同じ; 一つの波形をスケーリングして疲労試験を実施する。

#### 4.2 動電型ホイッピング重畳疲労試験装置の開発

EM試験装置の問題点は, 高速動作が可能なデジタル制御大出力動電型起震機(EE)で駆動することで解決できる。開発したEE試験装置には, 加振力3920N動電型振動発生機(旭製作所R-3030)と電力増幅器(旭製作所APD-5000)を使用した。装置を図2に示す。

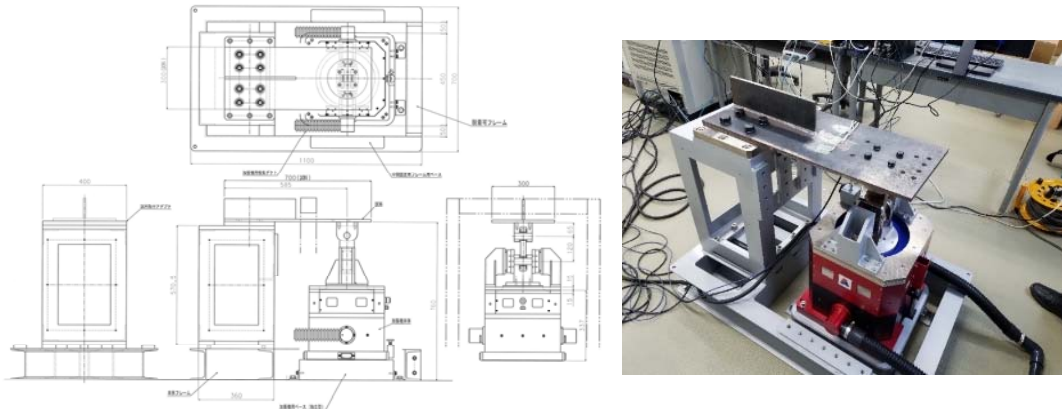


図2 動電型(EE-Driven)疲労試験装置

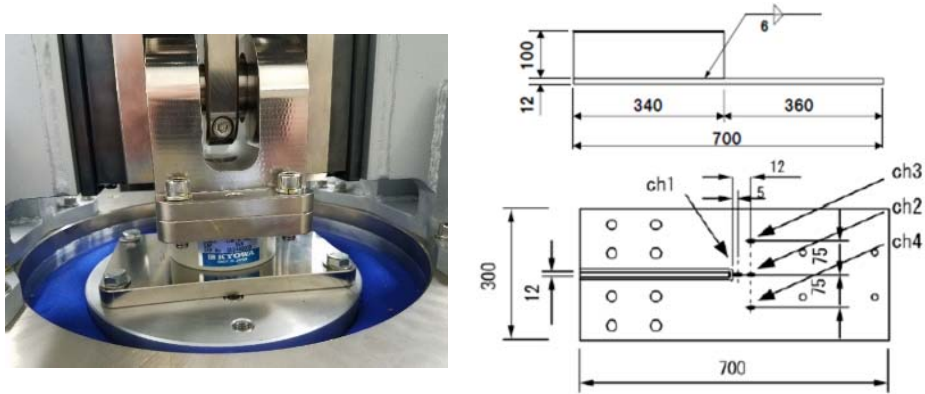
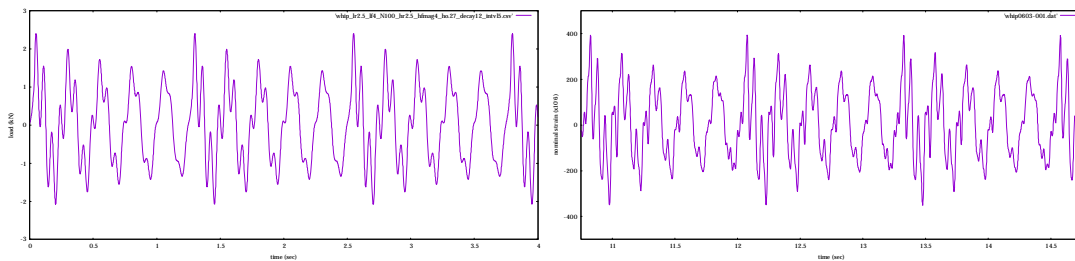


図3 ロードセルと試験体・歪センサ位置



(a) 目標波形

(b) 公称歪出力

図4 ロードセル制御時の目標波形と公称歪出力の比較

試験体は大沢ら(2015)と同じ図3に示す板厚12mmの面外ガセット継手を使用した。起震機の駆動ロッド基部にロードセルを取付けた(図3)。試験機の制御は公称歪(図3のCh3, 4)光ファイバ出力またはロードセル出力を制御信号として行った。油圧疲労試験では駆動ロッドを試験体上面に取付けて油圧アクチュエータに連結した。ロードセル出力制御の目標波形と公称歪出力の間に、図4に示す良好な線形性が得られたので、本試験はロードセル出力制御で実施した。開発装置は試験体に溶接止端公称応力200MPa以上のホイッピング重畳応力波形を高速に負荷でき、油圧試験装置の1/40~1/10の電気料金で疲労試験を実施できる。

#### 4.3 ホイッピング重畳疲労試験

疲労試験では、図3 Ch1の止端5mm位置ホットスポット歪範囲の65%drop寿命を疲労寿命 $N_B$ とした。定荷重疲労試験では、EE試験装置、油圧装置の何れも大沢ら(2015)のEM試験装置の結果とよく一致した。ホイッピング重畳疲労試験では位相差・PW波・振動波振幅比を調整して生成した3種類の波形を負荷した。波形の例を図4(a)に示す。これら波形は4.1節の標準波形の条件を満足する。公称応力範囲が72.2~118MPaになるよう図4(a)の波形をスケールリングして定常ホイッピング重畳疲労試験を実施した。また、一定回のPW繰返し数だけ重畳波形を負荷した後に、定振幅正弦波を負荷することを反復する間欠ホイッピング重畳疲労試験を実施した。何れの負荷条件でも、同一応力波形を負荷した油圧試験結果はEE試験機による結果のばらつき範囲に入った。これにより本研究で開発したEE試験装置は、油圧試験装置と同等な試験が高速・低コストに実施できることが示された。

重畳期間PW負荷回数=正弦波負荷回数=1/ $N_B$ , 重畳時Rainflow等価応力範囲=正弦波応力範囲の

場合の、EE 試験装置で得た等価応力範囲と PW 負荷回数との関係を図 5 に示す。図では定常重畳、間欠重畳とも Rainflow 法推定値より疲労寿命が延伸する傾向が示されている。破断時被害度  $D_{rf}$  は定常重畳時は 0.735~2.296 (平均 1.168)、間欠重畳時は 1.00~2.172 (平均 1.592) で寿命の延伸率は同等であった。この傾向は、本研究で実施した試験条件で共通してみられた。

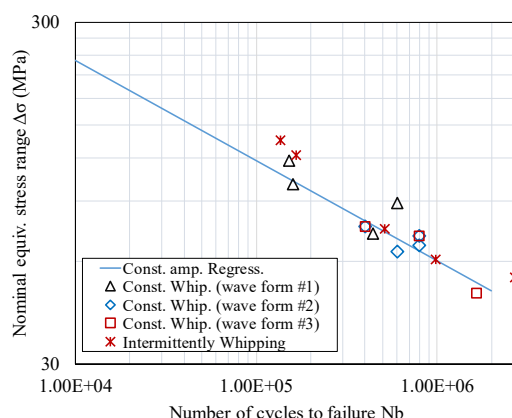


図 5 ホイッピング重畳(定常・間欠)疲労試験結果

大沢ら(2015)の EM 試験装置による間欠スプリング重畳疲労試験では、間欠重畳試験

の場合のみ  $D_{rf}$  平均が 2.60 になる大幅な寿命延伸が見られた。本研究で EE 試験装置により同一条件で 4 体を追試したところ、 $D_{rf}$  平均は 1.32 となり EE 試験装置によるホイッピング重畳試験結果と同程度になった。これは、EM 試験装置による疲労試験では、装置固有の問題で疲労寿命が本来より延伸していた可能性を示唆している。

本研究では実船が遭遇する、応力波形パターンが時間とともに変化する複雑な荷重条件を網羅した試験は実施できなかったため、引続き多様な応力波形を使用して疲労試験結果の蓄積に努める必要がある。また、EM 試験装置による試験結果のさらなる追試も必要である。本研究で開発した EE 試験装置の高速性・正確性・経済性は、今後の研究に大いに役立つと期待される。

## 5 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

1. Naoki Osawa, Luis De Gracia, Kazuhiro Iijima, Norio Yamamoto, Kyosuke Matsumoto, “Study on Fatigue Strength of Welded Joints Subject to Intermittently Whipping Superimposed Wave Load” Proceedings of International conference proceeding on Practical Design of Ships and Other Floating Structures 2019, in printing (2019)(査読付)
2. Luis De Gracia, Naoki Osawa, Kazuhiro Iijima, Toichi Fukasawa, Hitoi Tamaru, “A Study on the Stochastic Aspects of the Whipping Vibrations in a Container Ship” Proceeding of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 3, V003T02A027 (2018) (査読付)
3. Luis De Gracia, Hitoi Tamaru, Naoki Osawa, Toichi Fukasawa, “A Study on the Influence of Weather Routing on the Preciseness of Ship Structure's Fatigue Assessment” Proceeding of the 27th International Society of Offshore and Polar Engineers Conference, IV, 957-963 (2017)(査読付)

[学会発表] (計 3 件)

1. Luis De Gracia, Naoki Osawa, Kazuhiro Iijima, Norio Yamamoto, Hector Ruiz, “A Study on the Fatigue Damage Estimation with the consideration of Wave-induced Vibrations” 日本船舶海洋工学会講演論文集, 27, 445-449 (2018)

2. Luis De Gracia, Naoki Osawa, Kazuhiro Iijima, Toichi Fukasawa, “A Study on the effect of the Stochastic Characteristics of Whipping Vibrations in a Container Carrier” 日本船舶海洋工学会講演論文集, 25, 353-357 (2017)
3. Luis De Gracia, Naoki Osawa, Kazuhiro Iijima, Toichi Fukasawa, “A Study on the Stochastic Characteristics of Wave Load Sequences including Whipping Vibrations in a Container Ship” International conference proceeding of the 31st Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures (TEAM 2017), 780-785 (2017).

[図書](計0件)

[産業財産権]

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

[その他]

なし.

## 6 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：田丸人意

ローマ字氏名：Hitoi Tamaru

所属研究機関名：東京海洋大学

部局名：海洋科学技術研究科

職名：准教授

研究者番号(8桁):00361808

研究分担者氏名：飯島一博

ローマ字氏名：Kazuhiro Iijima

所属研究機関名：大阪大学

部局名：工学研究科

職名：教授

研究者番号(8桁):50302758

研究分担者氏名：堤成一朗

ローマ字氏名：Seiichiro Tsutsumi

所属研究機関名：大阪大学

部局名：接合科学研究所

職名：准教授

研究者番号(8桁):70344702

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名:ルイス デ グラシア

ローマ字氏名:Luis De Gracia