

令和 4 年 4 月 19 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21048

研究課題名(和文) 応力拡大係数の評価を不要とする疲労亀裂伝播則の構築

研究課題名(英文) Establishment of fatigue crack propagation law without stress intensity factor as parameter

研究代表者

後藤 浩二 (Gotoh, Koji)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：60274487

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では応力拡大係数をパラメータとせずに疲労亀裂伝播履歴を推定可能な手法の構築を目的とした。得られた成果は以下の通りである。

(1) デジタル画像相関法により、疲労亀裂伝播試験中の亀裂先端近傍に生じる繰返し塑性域寸法を測定し、これと疲労亀裂伝播速度の関係を調査した。また、繰返し塑性仕事をパラメータとする疲労亀裂伝播則の成立を確認した。(2) (1) で得た伝播則を弾塑性FE解析に実装させ、リメッシング処理を活用して疲労亀裂伝播シミュレーションを可能とした。(3) FE解析による亀裂成長履歴の推定精度改善を目的に、繰返し負荷かつ亀裂先端近傍の高ひずみ集中条件にも適用可能な応力～ひずみ関係を測定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

疲労亀裂伝播則は応力拡大係数範囲をパラメータとするParis則が提案されて以降、これの改善によってのみ発展したが、本研究の成果は破壊力学パラメータを不要とする疲労亀裂伝播則の可能性を示唆しており、学術面における独自性が極めて大きい。また、亀裂進展に伴う破壊力学パラメータの計算を不要し、通常の構造設計段階において得られる情報のみで疲労亀裂成長を評価できるため、社会インフラの疲労強度評価を簡潔かつ高精度に実施可能となり、社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study was to develop a method to estimate fatigue crack growth history without using the stress intensity factor as a parameter. The results obtained are as follows.

(1) The cyclic plastic zone dimensions near the crack tip during fatigue crack propagation tests were measured by digital image correlation, and the relationship between these dimensions and fatigue crack propagation rate was investigated. The establishment of a fatigue crack propagation law with cyclic plastic work near the crack tip as a parameter was also confirmed. (2) The propagation law obtained in (1) was implemented in an elasto-plastic FE analysis to enable fatigue crack propagation simulation with the aid of utilising a remeshing process. (3) To improve the accuracy of crack growth history estimation by FE analysis, a stress-strain relationship was measured that is applicable to cyclic loading and high strain concentration conditions near the crack tip.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：疲労 疲労亀裂伝播則 両振り塑性仕事 応力拡大係数 構造・材料

### 1. 研究開始当初の背景

現在の疲労亀裂伝播挙動の評価法は、破壊力学パラメータである応力拡大係数範囲 ( $\Delta K$ ) をパラメータとする Paris 則等を用いることが常識である。 $\Delta K$  は試験片ベースでは種々の評価式が提案されているため簡便に計算できるが、実構造物中に存在する亀裂に対する  $\Delta K$  は通常の応力解析だけでは求められないため、亀裂先端近傍の応力～ひずみ場を考慮した別パラメータ (例えば J 積分) の計算を追加実施しなければこれを同定できないという問題があった。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究は、通常的设计段階で利用される応力解析の結果のみを活用して疲労亀裂伝播現象を定量的に考慮できる、革新的な疲労亀裂成長手法の構築の足がかりを得ることを目的とした。具体的には、疲労亀裂伝播は亀裂先端近傍で消費される両振り塑性仕事を駆動エネルギーとしているとの立場に立ち、この両振り塑性仕事そのものもしくは両振り塑性域寸法をパラメータとする疲労亀裂伝播則を検討する。

(2) 一方、繰返し負荷を受ける亀裂先端近傍に生じる両振り塑性域寸法や塑性仕事の測定は非常に困難であったため、弾塑性 FE 解析で推定されるこれらの物理量の妥当性を実験により確認できなかった。しかしながら、最近の計測技術及び数値解析技術の進歩はこの問題を解決できるレベルにまで進歩している。そこで、亀裂先端近傍で生じている塑性仕事をパラメータとする亀裂成長則の成立可能性を検討した。

(3) 加えて、繰返し負荷条件下における応力～ひずみ場の計算に関する精度向上のためには、弾塑性 FE 解析に入力する真応力～真ひずみ関係も繰返し負荷に対応し、かつ適用可能なひずみ範囲ができるだけ大きなものとする必要がある。そのため、繰返し負荷条件下における真応力～真ひずみ関係の測定も実施する。

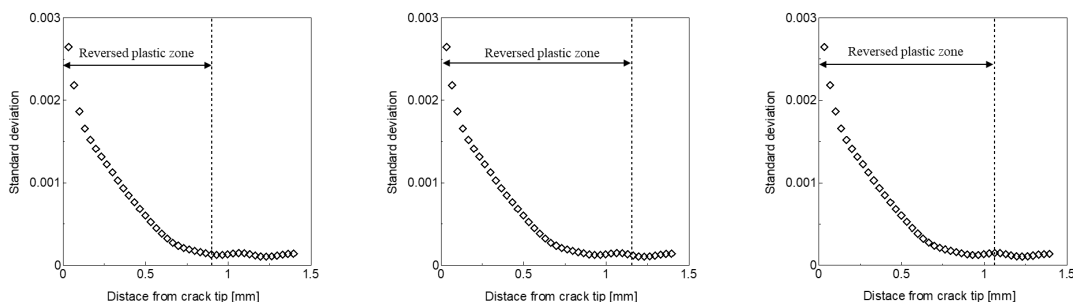
### 3. 研究の方法

(1) 繰返し負荷条件下における亀裂先端近傍に生じる繰返し塑性挙動に関しては、デジタル画像相関法 (DIC 法) を利用して、繰返し塑性域寸法の測定を試みた。中央貫通亀裂入り試験片の測定面に DIC 法の画像測定に必要な下処理を施し、繰返し負荷過程中的亀裂先端近傍におけるひずみの変化履歴を計測し、この結果に対して除荷弾性コンプライアンス法を適用して、サイクルごとの荷重～塑性ひずみ関係 (ヒステリシスループ) を取得した。ヒステリシスループが確認できる領域は両振り塑性挙動が観察されるため、ヒステリシスループ幅がゼロとなる位置を標準偏差により評価した。標準偏差は平均からのばらつきを示す評価値なので、両振り塑性域での荷重～ひずみ関係におけるヒステリシスループの膨らみ具合 (ループの幅) の標準偏差を計算するとある一定の値を取り、それ以外の領域ではゼロに収束すると考えられる。

(2) 弾塑性 FE 解析により得られる亀裂先端近傍の応力～ひずみ場より、両振り塑性域寸法及び両振り塑性仕事を計算できる。これらをパラメータとする Paris 則と同様なべき乗形式の関数による疲労亀裂伝播則が成立するか否かについて、過去に実施された疲労亀裂伝播試験結果を基に検証した。

(3) インライン投影画像測定器を用いて繰返し負荷を受ける砂時計型丸棒試験片の最小断面部の直径と曲率の変化履歴を測定した。これらの測定結果、変形の前後的に体積一定の仮定、および最小断面部の多軸応力状態影響を補正する Bridgman の方法を用いて単軸状態における真ひずみを算出し、荷重履歴と対応させることで真応力を算出した。繰返し荷重下での応力～ひずみ関係を決定するために、ひずみ範囲増減試験と繰返しひずみ後単調引張試験の二種類の方法を適用して広範囲のひずみに対応できるようにした。

### 4. 研究成果



(a) 5.3 mm, 370,470 cycles

(b) 7.0 mm, 432,814 cycles

(c) 11 mm, 526,417 cycles

図1 ヒステリシスループを標準偏差により評価して得られた両振り塑性域寸法

(1) 標準偏差に基づき、両振り塑性域寸法（疲労亀裂先端から測定した両振り塑性域先端位置）を決定した例を図1に示す。図1中には疲労亀裂長さ及び計測した時の繰返し数も示している。この結果から、DIC法と除荷弾性コンプライアンス法及び標準偏差を指標とするデータ処理により両振り塑性域寸法を測定可能とした。

(2) ①弾塑性FE解析において亀裂を伝播させる毎にリメッシング処理を施すことで、亀裂先端近傍の応力～ひずみ場を詳細に確認できるようにして、過去に実施された複数の応力比（ $R=0.05, 0.3, 0.5$ ）の一定振幅負荷条件下において形成される両振り塑性仕事（ $W_p$ ）と疲労亀裂伝播速度（ $da/dN$ ）の関係を調査した。結果を図2に示すが、Paris則と同様な形式での疲労亀裂伝播則が成立すると期待された。

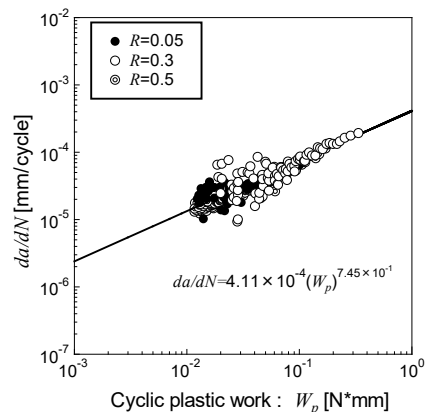


図2 両振り塑性仕事（ $W_p$ ）と疲労亀裂伝播速度（ $da/dN$ ）の関係

②そこで、図2に示した伝播則が成立するとして、弾塑性FE解析により亀裂伝播中の両振り塑性仕事（ $W_p$ ）を時々刻々計算する手法により、二段ブロック及びスパイク荷重が作用する条件下における疲労亀裂成長履歴を推定し、実測結果との比較を行った。結果を図3に示すが、提案手法により比較的良に成長履歴を推定できた。

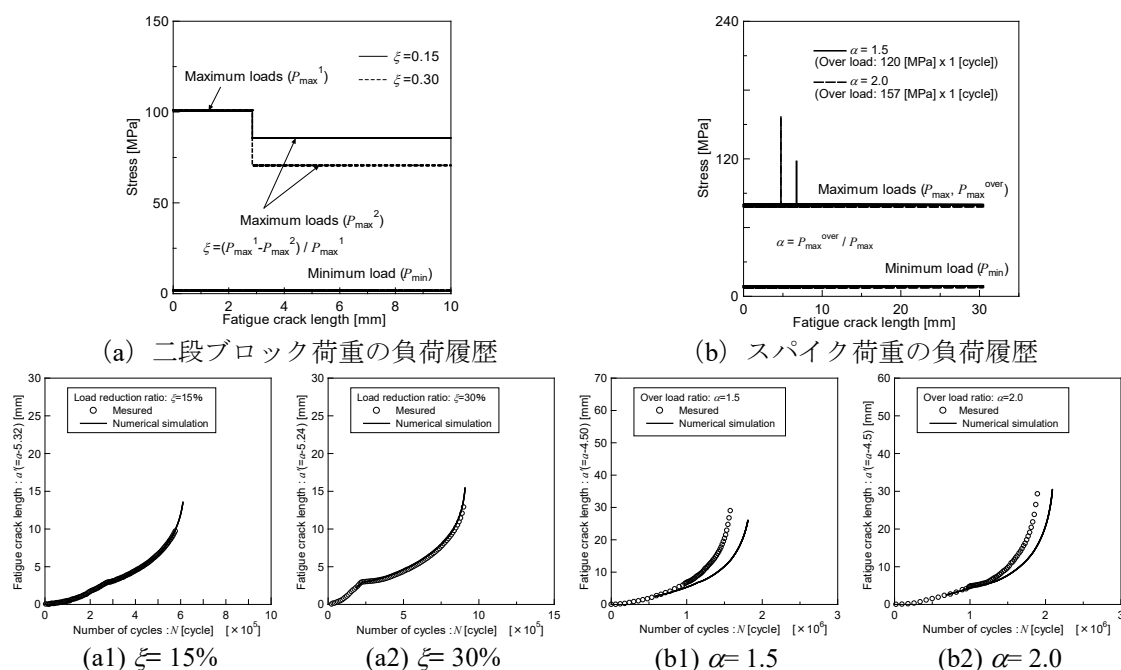
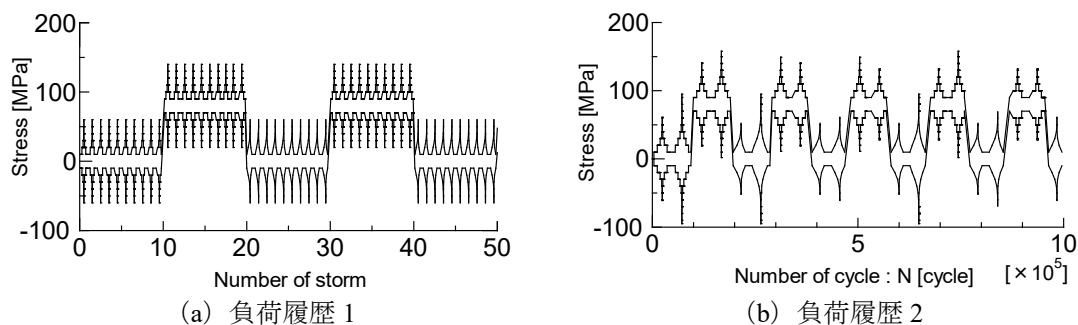


図3 二段ブロック及びスパイク荷重履歴下における疲労亀裂伝播履歴

③提案手法に妥当性を実働荷重により近い条件で検証することを目的に、船舶が航行中に嵐に遭遇した際に受ける荷重履歴をモデル化した「嵐モデル荷重」条件下において実施された疲労亀裂伝播試験を評価対象として、②と同様の検証を行った。結果を図4に示すが、亀裂が成長するに伴い、推定結果は過度に疲労亀裂伝播速度を速く評価していることを確認した。「安全側評価」という観点では許容されると考えられるものの、推定精度の改善が必要であると考えられる。推定精度が劣った理由としては、本研究で使用した汎用FE解析ソフトで表現可能な亀裂進展方式では限界があったこと、FE解析に繰返し荷重条件下での応力～ひずみ関係を入力する必要がある、などが考えられる。これらは今後の研究により解決する必要があると考えている。



(a) 負荷履歴 1

(b) 負荷履歴 2

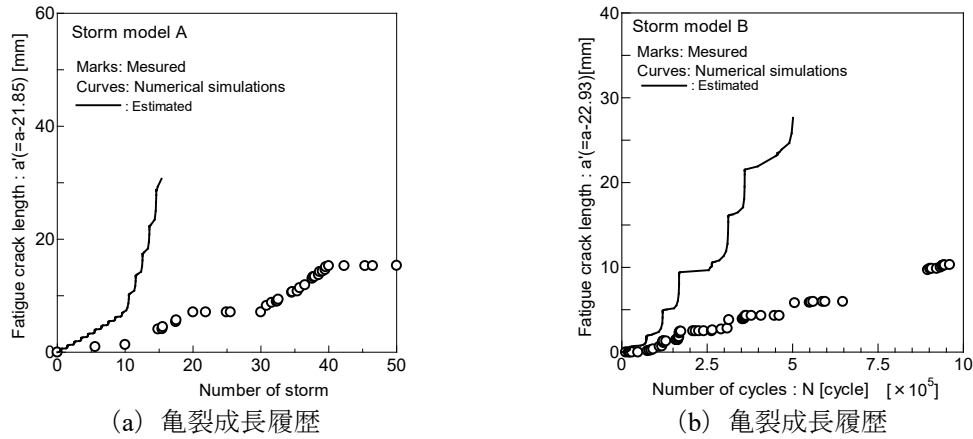


図4 嵐モデル荷重履歴下における疲労亀裂伝播履歴

(3) ①ひずみ範囲増減試験ではひずみ振幅を徐々に増加・減少させる負荷を1ブロックとし、このブロックを破断まで繰返した。変位制御により、最大クロスヘッド変位 $\pm 0.75$  mm,  $\pm 0.85$  mm,  $\pm 1.00$  mmの3条件で試験を実施した。各試験の破断したブロック数の半分のブロックでのヒステリシスループと、そこから得られた繰返し応力～ひずみ曲線をそれぞれ図5と図6に示す。全試験で測定した繰返し応力～ひずみ曲線は、ひずみ範囲 $\pm 1.5\%$ 以上の計測ができており、変形抵抗が大きく変わる弾性限は単調負荷時の降伏点と比べ約63%であった。また、3つの繰返し応力～ひずみ曲線は概ね一致した。しかし、最大変位 $\pm 0.85$  mm,  $\pm 1.00$  mmの試験では圧縮時に偏心が確認されたため、より正確な計測を行うには試験片形状を再検討する必要と考える。

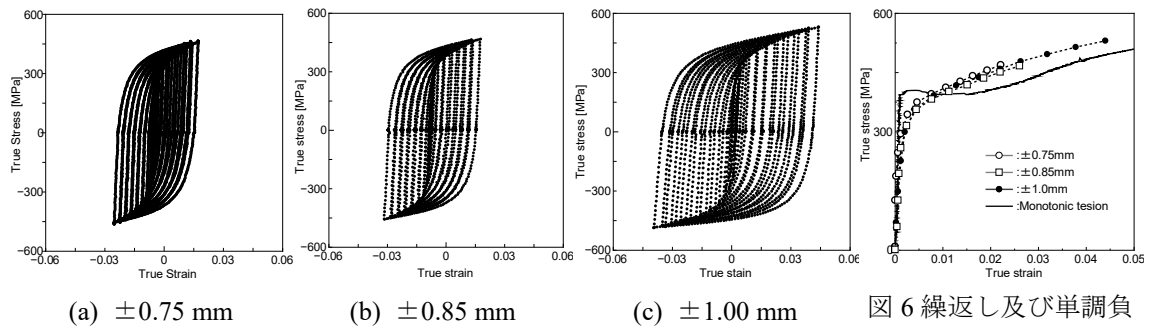


図5 ひずみ範囲増減試験で測定したヒステリシスループ

②ひずみ範囲増減試験により繰返し応力～ひずみ関係を安定させた後、単調引張によって破断させる試験として、単調引張に移行する前に、最大クロスヘッド変位 $\pm 0.75$  mmのひずみ範囲増減試験と同様の変位制御を18ブロック、27ブロック負荷した試験を実施した。単調引張時の真応力～真ひずみ関係についてひずみ範囲増減試験、静的単調引張試験結果と比較したものを図7に示す。繰返し応力～ひずみ曲線は両試験で概ね一致し、18ブロック負荷した段階で繰返し応力～ひずみ関係が安定している。この曲線はひずみ範囲増減試験の結果と一致し、ひずみの大きい領域では破断まで静的単調引張試験の曲線と概ね一致する傾向を確認した。

将来課題として、ここで測定した繰返し負荷条件下の応力～ひずみ関係を(2)で説明

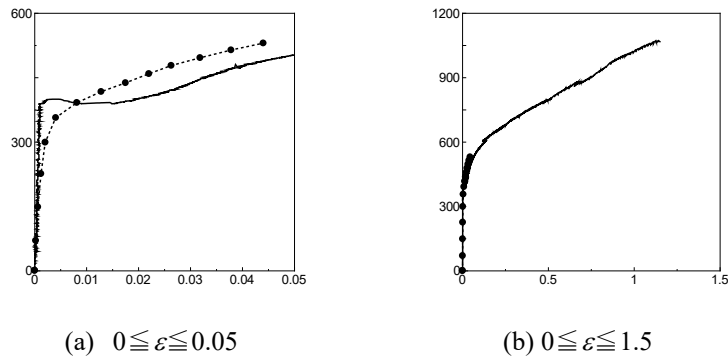


図7 繰返しひずみ後単調引張試験により測定された応力～ひずみ関係

した弾塑性FE解析に適用し、疲労亀裂伝播履歴の測定精度の改善について検討することが挙げられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山口 絢也, 後藤 浩二
2. 発表標題 弾塑性FE解析を用いた亀裂先端近傍の両振り塑性挙動を考慮した疲労亀裂伝播解析
3. 学会等名 令和3年日本船舶海洋工学会春季講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------