

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04082

研究課題名(和文)形状不連続部の微小疲労き裂開閉挙動の解明と高精度疲労寿命予測

研究課題名(英文) Fatigue life evaluation method based on small fatigue crack opening closing behavior at notch root

研究代表者

西川 嗣彬 (NISHIKAWA, Hideaki)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・主任研究員

研究者番号：20771843

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：小さい力の繰返しにより金属が破壊する現象が金属疲労であり、機械や建造物が破壊する時の主な原因の一つである。これまで、金属疲労を予防、予測する上で重要な、切欠きなど形状不連続部(以下、応力集中部とよぶ)におけるミクロな疲労き裂の発生、成長挙動を計測する手段は無かった。本研究では、マイクロスコープと画像パターンから変位量を解析する手法である画像相関法解析を組み合わせることによって、疲労き裂の開閉変位を計測することで、応力集中部に発生したミクロな疲労き裂の成長挙動を評価する手法を考案した。さらに、応力集中部を加工した試験片を用いた疲労試験によりその妥当性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって考案した手法によって、応力集中部におけるミクロな疲労き裂の成長挙動と、き裂開口点の実測が可能となった。さらに、これらの実測データにより検証が可能になったことで、破壊力学による疲労き裂の成長解析によって、応力集中部の疲労破壊寿命の予測が可能となる見込が得られつつある。様々な部材の疲労寿命を高精度に予測するために必要となる、重要な知見が得られたと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Metal fatigue occurs due to repetition of loading and which is one of the major cause of industrial accidents. Although the fatigue crack usually initiate at the stress concentration area such as notch root, it was difficult to measure microscopic fatigue crack growth behavior of narrow notch root. This study presents evaluation method of such microscopic fatigue crack by using microscope system and digital image correlation (DIC) technique. This method enables us to measure small fatigue crack growth behavior includes its opening closing characteristics by evaluating crack opening displacement. This evaluation method was validated from the fatigue tests with notched fatigue specimen.

研究分野：材料力学

キーワード：金属疲労 微小疲労き裂 応力集中部 画像相関法

### 1. 研究開始当初の背景

小さい力の繰返しにより金属が破壊する現象が金属疲労であり、機械や建造物が破損する時の主な原因の一つである。金属疲労を原因とする事故は近年も発生しており、安全性と経済性の両面から、金属疲労を防ぐ、あるいは寿命を予測するための取組みは重要である。

金属疲労の過程は、材料にマイクロなき裂が発生し、徐々に成長して破壊に至る過程である。したがって、多くの研究では、繰返し力を受ける材料の表面を、顕微鏡などを用いて連続的に観察することによって、疲労き裂が発生し成長する速度やメカニズムが調べられ、疲労寿命の予測などに生かされてきた。

一方、疲労き裂は、ネジ部の溝のような、形状が不連続で力が集中する箇所(以下、応力集中部とよぶ)に発生する。したがって、応力集中部における疲労き裂の発生と成長を把握することが、様々な部材の疲労寿命の予測精度を高めることに繋がる。しかしながら、この場合の疲労過程は、溝の底に発生した疲労き裂が、部材の内部に向かって成長していく過程であるため、顕微鏡による表面観察ではき裂の深さの計測が難しく、これまでほとんど調べられてこなかった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、応力集中部に発生するマイクロな疲労き裂とその成長挙動を計測する方法を確立するとともに、その実測データを収集し評価することで、応力集中部における疲労き裂の成長寿命の予測方法を構築することである。

### 3. 研究の方法

狭隘な応力集中部に発生するマイクロな疲労き裂を計測するための本研究のアイデアは、荷重を負荷することによる、き裂の開口量(き裂開口変位もしくは Crack Opening Displacement: COD とよぶ)を計測することである。疲労き裂の微小な開口量を実測するために、長焦点のマイクロスコープを用いた図 1 に示すオリジナルの顕微鏡システムと、画像パターンの移動量を解析する手法である画像相関法を用いた。具体的には、荷重を負荷する前と後の応力集中部の顕微鏡画像を用いて、画像相関法によりマイクロな変位の分布を解析することで、図 2 に示す疲労き裂の開口変位を実測する手法を考案した。

また、加工により応力集中部(先端の曲率半径が 0.5 mm および 1.0 mm の切欠き)を導入した試験片を用いて、考案した計測方法の妥当性を検証した。

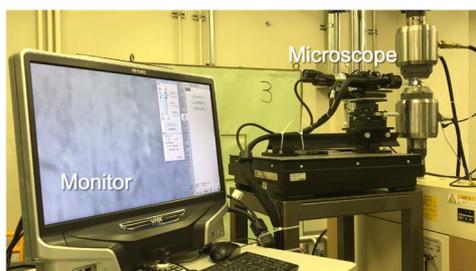


図 1 疲労き裂観察システム

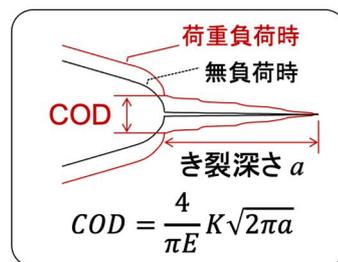
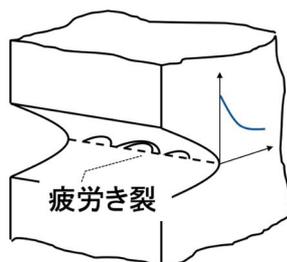


図 2 き裂開口変位 (COD) によるき裂計測の概念図

### 4. 研究成果

図 3 および図 4 は、応力集中部である切欠き底の顕微鏡観察結果の例を示す ( $N$  は繰返し数、 $N_f$  は破壊した繰返し数を示している)。疲労破壊に至る繰返しの 10% 以下の繰返し数において、切欠き底には沢山の疲労き裂が発生していることが分かる。発生したき裂はすぐに連結してしまうため、表面に見えるき裂の長さの計測では、き裂の成長を評価することは難しい。したがって、疲労き裂の成長挙動を把握するためには、材料内部に向かって成長する、き裂の深さに関連する情報を計測する必要がある。

図 5 は、本研究で考案した手法により実測したき裂開口変位 COD が、繰返し数の増加に伴って成長していく様子を示している。考案した手法によって、応力集中部に発生した疲労き裂が成長していく様子を計測することに成功した。この計測結果の例に示すように、材料による疲労き裂成長速度の違いや、応力集中部の形状の違い(切欠き底の曲率半径)による疲労き裂の成長速度の違いを実測出来ている。

このように、マイクロスコープの画像と画像相関法によって疲労き裂の開口変位を解析する方法が、応力集中部におけるマイクロな疲労き裂の成長挙動を計測する方法として有効であることが明らかになった。

さらに、一連の試験の中で、この手法が、『疲労き裂の開口点』を実測する手法としても有効であることが明らかになった。疲労き裂は、成長する過程でき裂の周囲を変形させることなどによって、き裂が開きにくくなることが知られており、き裂開口現象と呼ばれている。したがって、

荷重を上昇させる過程において疲労き裂が開口した瞬間を表す、疲労き裂の開口点が、疲労寿命の予測において重要な因子の一つである。しかしながら、従来は応力集中部のミクロな疲労き裂の開口点を計測することは難しかった。図 6 に、考案した手法でき裂開口点を実測した例を示す。左図に示すように、変曲点として明確にき裂開口点を検出することが出来ている。さらに、右図に示すように、疲労寿命の短い『材料 A』と長い『材料 B』の違いが、き裂開口点の違いに起因していることを示唆するデータが得られた。

以上のように、考案した手法によって、応力集中部におけるミクロな疲労き裂の成長挙動と、き裂開口点の実測が可能となった。現在、これらの実測データにより検証が可能になったことで、破壊力学による疲労き裂の成長解析によって、応力集中部の疲労破壊寿命の予測が可能となる目処が得られつつある。様々な部材の疲労寿命を予測するために必要となる、重要な知見が得られたと考えられる。



図 3 応力集中部の顕微鏡観察の例

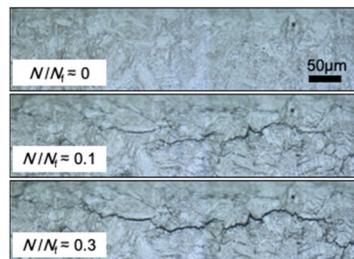


図 4 図 3 の拡大図

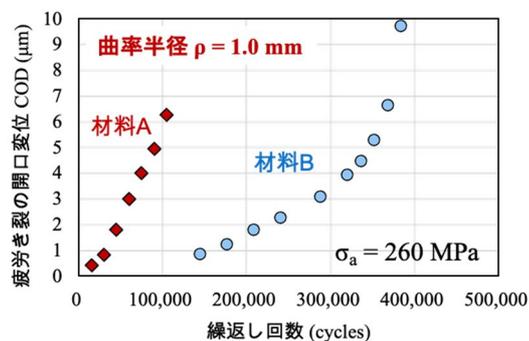
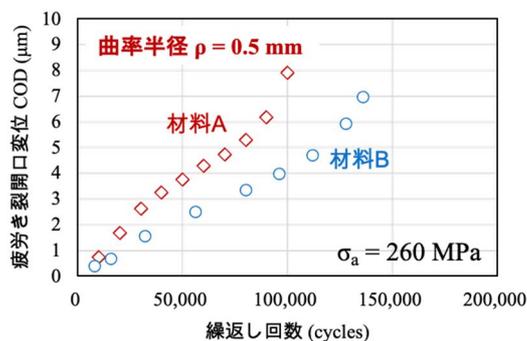


図 5 繰返しに伴うき裂開口変位の成長挙動の実測結果の例

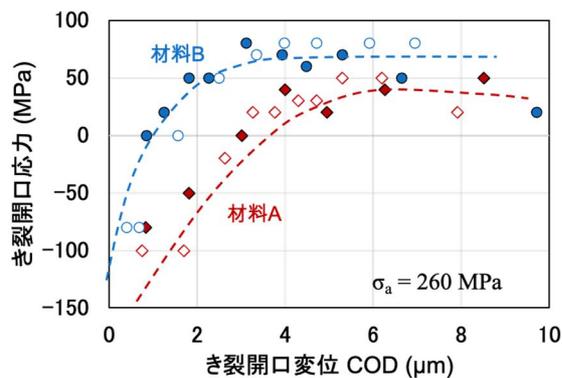
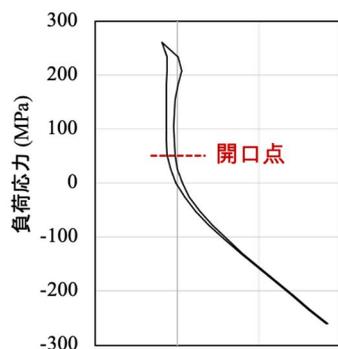


図 6 疲労き裂開口応力の実測結果の例

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 西川嗣彬
2. 発表標題 低炭素鋼における切欠き底の微小疲労き裂の発生・進展挙動
3. 学会等名 日本機械学会M&M2019 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019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
---------	---------