

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560103

研究課題名(和文)せん断型疲労き裂進展に及ぼす環境の影響解明と大型風力発電機増速機疲労設計への応用

研究課題名(英文) Environmental influence elucidation on shear mode fatigue crack growth and application for design of speed increasing gear for large wind turbine

研究代表者

濱田 繁 (HAMADA, SHIGERU)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90432856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：転がり疲労破壊問題の原因であるせん断型疲労き裂進展に対して、有効応力拡大係数範囲を明らかにし、せん断型疲労き裂進展機構を解明することを目的とした研究を行なった。治具がCT試験片と互換性のある汎用性の高いせん断型疲労き裂進展の再現が可能な試験方法の開発に成功した。現象説明のため、摩擦および破面の凹凸を考慮した有効応力拡大係数範囲を取得するためのモデル化を行ない、開発した試験方法による有効応力拡大係数範囲を取得した。その後、実機転がり疲労に生じる大きな塑性変形を受けた材料の試験およびせん断型疲労き裂進展の直接観察が可能な試験方法の開発を実施した。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the effective stress intensity factor range and the mechanism of the Mode II fatigue crack propagation, the Mode II fatigue crack propagation problem which causes rolling contact fatigue failure problem was studied. Development of the test method which can reproduce the Mode II type fatigue crack propagation with high flexibility which has compatibility of the jig with a CT specimen was succeeded. For phenomenon explanation, a modeling for obtaining the effective stress intensity factor range in consideration of friction and convexo-concave of the fracture surface was performed, and the effective stress intensity factor range by the developed test method was obtained. Then, in order to examine the material which has been received severe plastic deformation in real rolling contact fatigued machine and to realize the direct observation of the Mode II type fatigue crack propagation, a new test method was developed.

研究分野：工学

キーワード：金属疲労 モードII 破面解析 転がり疲労

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 風力発電機に関する問題点

本申請では研究の応用として、大出力を得るため急速に大型化が進んでいる風力発電機の増速機に関する問題を取り扱う。増速機は風速に依存する非定常な低速回転で使用されているため、特に大型になると歯車接触面への油膜の供給が期待できない。さらに、風車の大型化に伴って、設置高が高くなりメンテナンスは困難になるので、長期信頼性は大きな課題となる。信頼性を低下させる損傷は本質的には「転がり疲労」であり、き裂の発生とせん断型疲労き裂の進展による金属疲労現象である。

また、洋上風力発電が増加しているが、洋上大気中の塩分の影響によって信頼性が低下することが予想される。また軸受けにおいて、潤滑油の分解により発生した水素の鋼中への侵入を原因として発生する早期剥離が問題となっている。また、水素雰囲気中の転がり疲労寿命は極端に低下すること、そして水素がすべり変形を助長する点が原因であることが確実となってきた。よってすべりが主な駆動力と考えられるせん断型疲労き裂進展に対して、水素雰囲気及ぼす影響は大きいと考えられる。

### (2) 問題を把握し解決するための再現試験

一般的な金属疲労は繰返し引張圧縮負荷によってき裂が進展する(モード I)現象であり、実験室レベルにおける再現および環境の影響評価が可能となっている。しかし、転がり疲労は繰返しせん断負荷によってき裂が進展する(モード II)現象であり、実験室レベルにおける再現試験が困難であった。報告者らは、高強度鋼に対するせん断型疲労き裂進展試験に世界で初めて成功し、き裂進展速度および下限応力拡大係数範囲( $\Delta K_{Ith}$ )を提示した。しかし当該試験システムは大きな装置であり、現在 CT 試験片を使ったモード I 疲労き裂進展試験方法のような環境の影響を把握できるコンパクトな試験方法が存在しない。そのため、せん断型疲労き裂進展に及ぼす環境の影響は不明である。

### (3) き裂進展機構

引張圧縮型疲労き裂進展に関しては、疲労き裂は「すべり面分離」で進展し「き裂開口」によって遅延する、というメカニズムが明らかとなった結果、環境の影響を含めた疲労破壊に強い材料開発における指針となっている。しかし、せん断型疲労き裂進展に関しては不明なままである。報告者も含めた、これまでの研究においては、き裂進展に対する整理パラメータとして、応力拡大係数範囲( $\Delta K_{II}$ )を用いているものの、き裂進展の真の駆動力となる「有効」応力拡大係数範囲( $\Delta K_{IIeff}$ )を考慮していないため、このことが、従来の報告における下限値の違いとして現われていると考えられる。なお、 $\Delta K_{II}$ と $\Delta K_{IIeff}$ の差異は、主に疲労き裂破面間に作用する摩擦の影響であると申請当時考察していた。

### (4) 疲労設計への応用

疲労はき裂の発生と進展によって発生する現象であるが、転がり疲労のき裂発生に関しては現段階では制御は非常に難しいと考えられる。き裂の進展に関する、設計および材料設計による制御への応用は可能であると考えられる。モード I 疲労き裂に関しては、安全な設計の限界は、停留き裂を用いて「き裂は発生するがき裂開口によって停まる限界」と定義されている。

## 2. 研究の目的

転がり疲労破壊問題の原因であるせん断型疲労き裂進展に対して、風力発電機の大型化によって転がり疲労問題の顕著化が懸念される風力発電機増速機を応用例として研究を実施する。申請者らがこれまでに開発した独自の試験方法を高度化し、せん断型疲労き裂進展時におけるせん断型疲労き裂有効応力拡大係数範囲( $\Delta K_{IIeff}$ )を明らかにする。そして、 $\Delta K_{IIeff}$ の測定によってはじめて測定可能になる、き裂進展に対する抵抗を含んだせん断型疲労き裂進展機構を解明する。

## 3. 研究の方法

### (1) せん断型疲労き裂進展の再現が可能な試験方法の開発

報告者がこれまでに開発していた試験方法に汎用性を持たせ、特殊環境下での試験を可能にするため、CT 試験片互換の試験方法を開発する。さらに、ひずみゲージによる微小変形測定と除荷弾性コンプライアンス法を適用させることによって、せん断型疲労き裂進展に対して有効応力拡大係数の概念を取り入れ $\Delta K_{IIeff}$ の測定方法を確立させる。

### (2) 有効応力拡大係数範囲を取得するための現象のモデル化

開発した試験方法で取得する情報を力学的に解釈し、有効応力拡大係数範囲を取得するため、せん断型疲労き裂進展時における現象のモデル化を行なう。

### (3) 開発した試験方法による有効応力拡大係数範囲の取得

開発した試験方法および取得情報の力学的解釈により、有効応力拡大係数範囲を取得する。

### (4) 大きな塑性変形を受けた材料の試験およびせん断型疲労き裂進展の直接観察が可能な試験方法の開発

上記試験方法および従来の他の研究者による試験方法において、き裂の進展は材料の内部で起こっている。そのため、き裂進展の機構が把握できず不明である点が、せん断型疲労き裂進展に関する問題における大きな問題であることに気付いた。また、実機に生じる転がり疲労においては、高いヘルツ接触

圧が伴うので、必ず大きな塑性変形を伴っている。そこで、大きな塑性変形を受けた材料についての試験を可能にし、現象をより正確に把握するため、せん断型疲労き裂の進展を直接観察可能にする新しい試験方法を開発する。

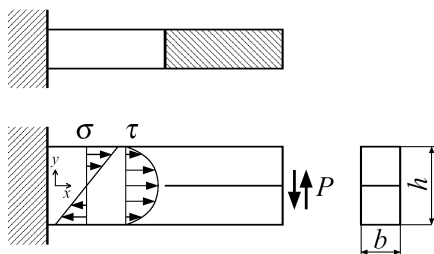
#### 4. 研究成果

(1) せん断型疲労き裂進展の再現が可能な試験方法の開発

図1および図2に研究代表者がこれまでに開発していたせん断型疲労き裂進展試験法を示す。図1は試験のモデル図であり、図2は試験組立図である。図2に示した試験方法を用いて、実験室でのせん断型疲労き裂進展の再現に成功し、進展下限値を得た。

図1に示した基本原理はそのままに、新しい試験方法を開発した。図3に開発した試験方法に用いる試験片形状を示す。既存の方法では、試験片固定端を作るための治具が必要であり、全体が大きくなっていたが、新たに開発した方法は、試験片固定端に関しては対称性を活用し、CT試験片用の治具がそのまま使えるように工夫した。

実機において転がり疲労が発生する場合には、必ず破面を圧縮する応力が作用している。本試験方法において、破面に作用する圧縮応力を模擬した。図4に概略図を示す。図5に試験片周辺の組立図を示す。ボルトを用いた締付け治具によって、圧縮応力を作用させた。



$$\Delta P = 2P, \quad \tau = \tau_{xy} = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{bh} \right) \left\{ 1 - \left( \frac{2y}{h} \right)^2 \right\}$$

図1 試験の基本モデル。

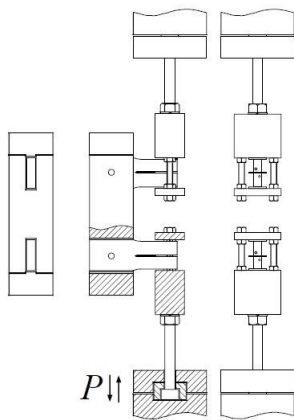


図2 既存試験法の組立図

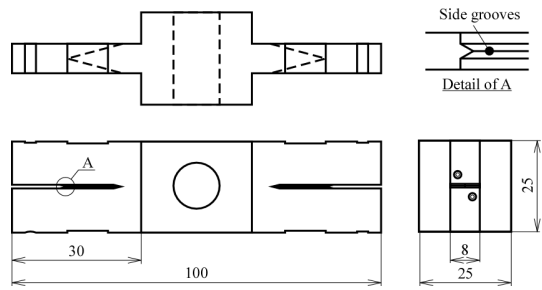


図3 開発した試験片の試験片形状

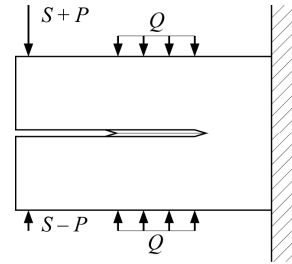


図4 圧縮応力の負荷モデル

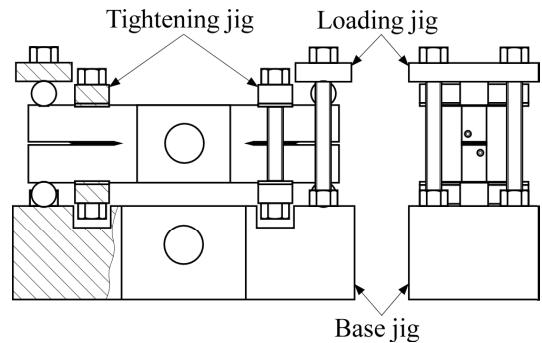


図5 開発した試験方法

開発初期の試験において、試験片表面のひずみを測定すると、意図とは異なるひずみ挙動を示した。原因を探るため、図6に示す荷重負荷点近傍を、図7に示すばね-マスモデルに変換し、解析を行なった。その結果、荷重を伝達することを目的として設置していた、試験片中心部のセラミックシリンダーが荷重除荷時に常に接触状態になっていないことが判明した。図7に示したモデルの検討によって、当該シリンダーは不要と判断でき、除去した。その結果、ひずみの挙動は意図した通りの挙動を示すようになった。

図8に最終的な組立図を示す。図9に実験で得られたき裂進展挙動を示す。図9中の縦軸は交流電位差法で測定したき裂長さに対応する電圧変化量であり、横軸は繰返し数である。図10に得られた破面を示す。従来の試験方法で得られた破面と同様の破面が得られ、せん断型疲労き裂進展に成功していることが確認できた。

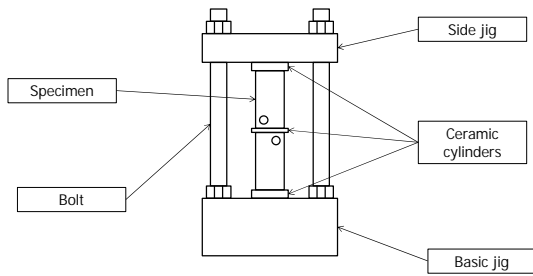


図 6 荷重負荷点近傍

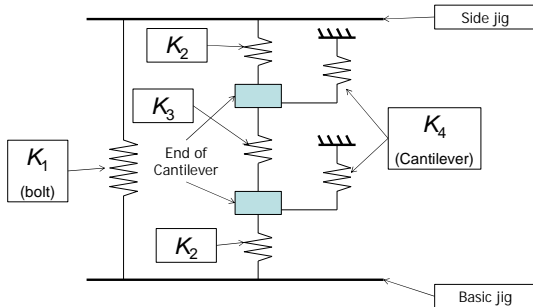


図 7 荷重負荷点近傍のばね - マスモデル

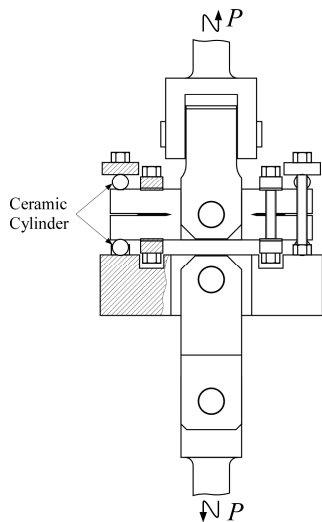


図 8 開発した試験方法組み立て図

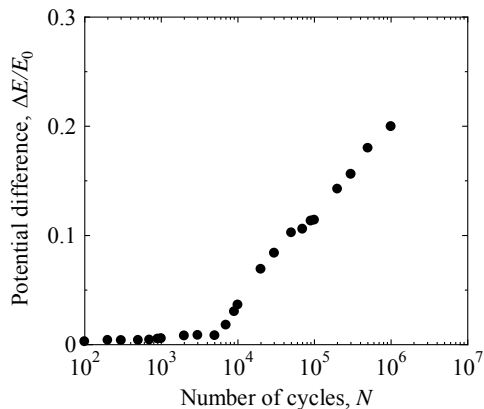


図 9 き裂長さ測定結果

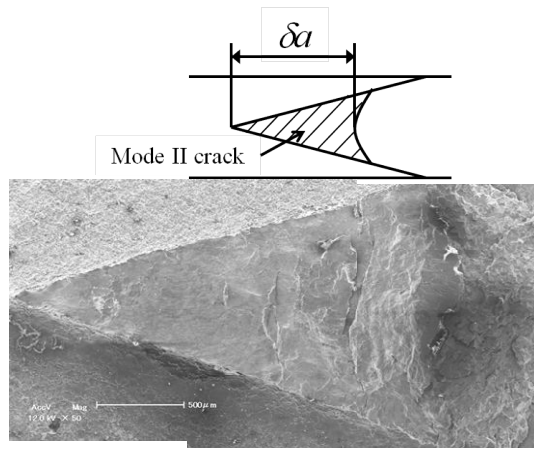


図 10 得られたせん断型疲労破面

## (2) 有効応力拡大係数範囲を取得するための現象のモデル化

破面に作用する摩擦を考慮し、有効応力拡大係数範囲を得るため、現象のモデル化を行った。図 11 に、試験片におけるモデル化対象部を示し、図 12 に、ばね - マスモデル化対象部を示す。破面近傍をモデル化した。図 13 に、用いたばね - マスモデルの概略図を示す。マス一つの場合から考察し、マスの数を増やした場合における荷重と変形の関係を検討した。図 13 における荷重は試験荷重に相当し、変位  $x$  は試験片表面のひずみに相当する。後に行なう検証は、ひずみに対して行なう。

図 14 に破面の凹凸を考慮しない場合の荷重と変位の関係を示す。荷重負荷時における荷重と変位の関係と、荷重除荷時の荷重と変位の関係は、線対称となっている。これは、マス底面に作用する摩擦力が、正負双方に動くときに対象に発生するためである。図 14 中、負荷時において、赤線で示した直線部分がき裂先端に荷重が作用する範囲である。直線部分以外の曲線部は、荷重が破面の摩擦に費やされ、き裂先端には作用していない範囲である。

その後のひずみ測定の結果、図 14 とは異なるひずみを得たので、モデルの再構築を行なった。具体的には、破面に作用する摩擦力以外に、破面の凹凸も考慮したモデルを作成した。また、図 15 に示すせん断型疲労き裂の形状を見ても、引張圧縮荷重によって生じる疲労き裂と比較して、凹凸が大きいように見える。そのため、破面には大きな凹凸が存在し、き裂進展に影響を与えると考えた。図 16 に、一つのマスについての概略図を示す。破面の凹凸によって、負荷時と除荷時に作用する力が、摩擦力のみを考慮した場合と異なる。図 17 に破面の凹凸を考慮した場合の荷重と変位の関係を示す。摩擦のみを考慮した図 14 と、除荷時が大きく異なる。図 17 の負荷時の赤線で示した直線部分がき裂先端に荷重が作用する範囲である。

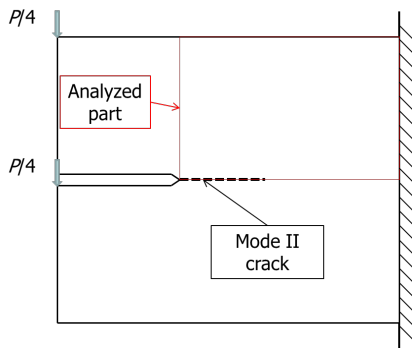


図 11 試験片モデル化対象領域

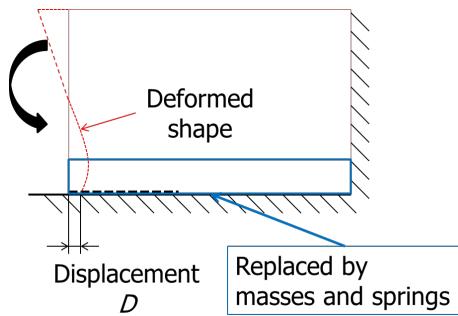


図 12 ばね - マスモデルの対象領域

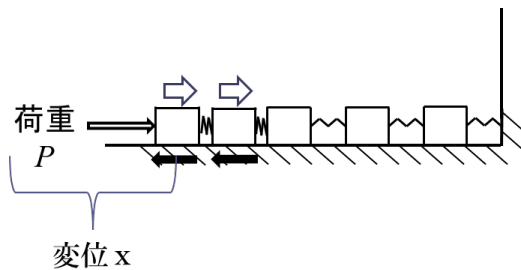


図 13 ばね - マスモデル概略図

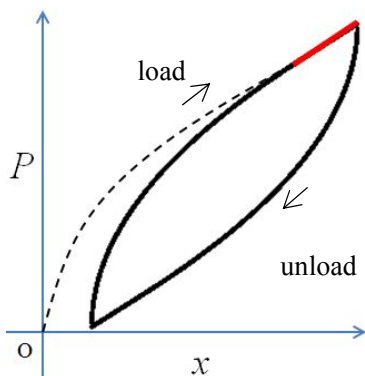


図 14 破面の凹凸を考慮しない場合の荷重と変位の関係

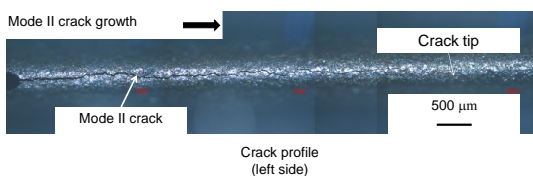


図 15 せん断型疲労き裂

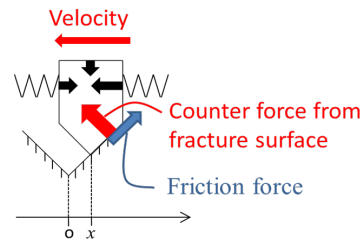


図 16 破面の凹凸を考慮したばね - マスモデル

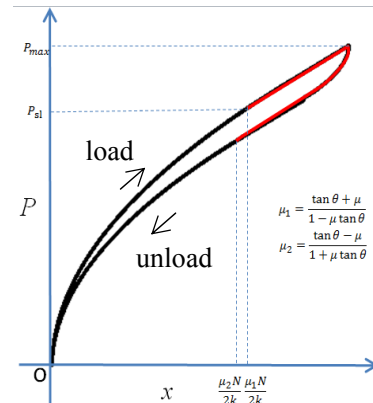


図 17 破面の凹凸を考慮した場合の荷重と変位の関係

(3) 開発した試験方法による有効応力拡大係数範囲の取得

ひずみ測定の高感度を得るため、非線形有限要素法解析によって、試験片表面に発生するひずみについて、ひずみが最大となる位置を解析した。結果を用いて、ひずみ測定位置を決定した。図 18 に決定したひずみ測定位置を示す。

発生するひずみの非線形成分の大きさは小さいので、非線形成分の大きさを測定可能なレベルまで増幅する必要がある。そこで、除荷弾性コンプライアンス法に用いるアナログ引算回路を参考に、引算回路を製作した。

図 19 に破面の凹凸を考慮したばね - マスモデルから導かれる、引算回路を仮想的に適用した場合の、荷重とひずみの関係を示す。図 19 においても、図 14, 17 と同様に負荷時において赤字で示した直線の範囲がき裂先端に荷重が作用する範囲である。先に述べた引算回路によって、直線部分が分かりやすくなるように図中垂直な直線となるように調整する。荷重はゼロから  $P_{max}$  まで負荷されているが、き裂先端に作用する有効な荷重は図 19 において、 $P_{max} - P_{sl}$  の範囲である。つまり、この荷重範囲に対応する応力拡大係数が有効応力拡大係数である。

図 20 に実測された引算回路を適用した荷重とひずみの関係を示す。荷重の最大値は  $P_{max} = 10 \text{ kN}$  であり、 $P_{sl} = 8.4 \text{ kN}$  を得た。測定した負荷時における有効応力拡大係数範囲は、外力から摩擦を考慮せずに計算される応力拡大係数範囲に対して 16% 程度であることが判明した。



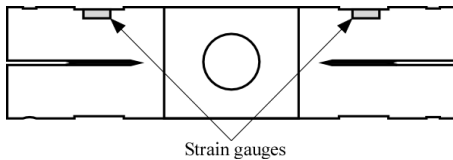


図 18 ひずみ測定位置

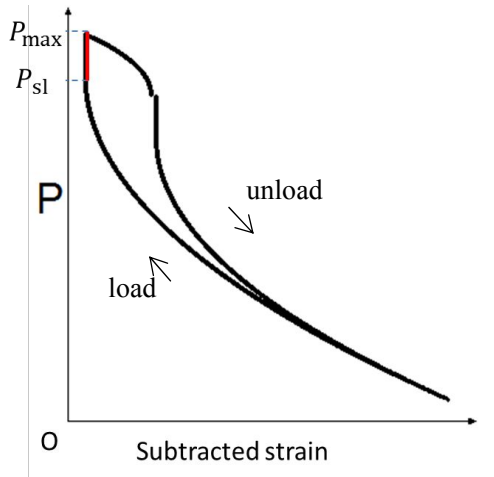


図 19 モデルから得られる引算回路を適用した荷重とひずみの関係

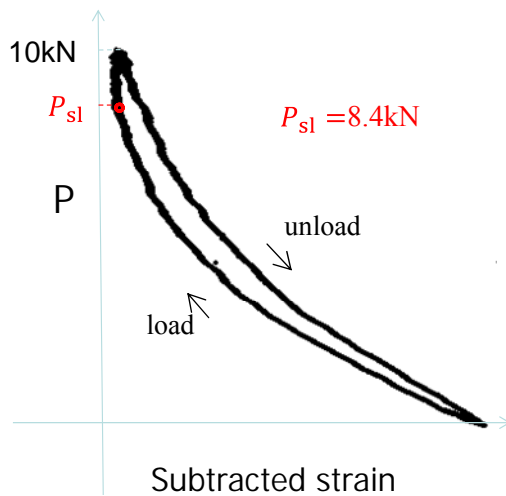


図 20 実測された引算回路を適用した荷重とひずみの関係

(4) せん断型疲労き裂進展の直接観察が可能な試験方法の開発

本研究手法における問題点を認知するに至った。すなわち、実機械要素において問題となっている転がり疲労の問題が発生する部分は、高い繰返しヘルツ圧を受け大きな塑性変形が生じている点である。その部分にせん断型疲労き裂が進展する。つまりせん断型疲労き裂を実験室的に再現する場合には、必ず塑性変形を考慮する必要がある。この点は、他の研究者においても陽には指摘されていない点である。

ここまで示した試験方法は、その試験片形状を理由として上記塑性変形を試験片に導入することは困難である。試験片全体に塑性変形を導入することも検討したが、実機械要

素に生じている塑性変形の程度は非常に大きいため、導入は困難であった。また、塑性変形が生じている部分の厚さは一般に数百ミクロン程度と薄い領域である。

そこで、新たな試験方法の開発した。塑性変形を受けた実機械要素から、その領域を薄膜化して切り出し、FIB (Focused Ion Beam) 加工によって細く長い予き裂を導入し、一部を平坦にした丸棒に当該薄膜を貼り付け、丸棒に対して繰返しねじりを加える方法でせん断負荷を加えてせん断型疲労き裂を進展させる試験方法である。

冷間圧延を受けた SUS430 薄膜を用いて検証し、せん断型疲労き裂の進展に成功した。

本試験方法は上記改善点の他に、格段に改善された点がある。すなわちせん断型疲労き裂の進展挙動および形状を直接顕微鏡によって観察できる点である。この観察によって、負荷除荷時における疲労き裂先端近傍の変形が直接観察可能となる。引張圧縮型疲労き裂進展機構に関する研究は、疲労き裂先端近傍の直接観察により大きな進歩を遂げたので、本試験方法によりせん断型疲労き裂進展機構の解明につながると考えている。

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)

[学会発表](計4件)

1. 濱田 繁, せん断型疲労き裂における有効応力拡大係数範囲測定方法の開発, 日本材料学会 公開部門委員会 接触疲労と破壊力学 (2014.5.16), 福岡大学(福岡県福岡市).
2. 福留秀渡・濱田 繁, モード II 疲労き裂進展における破面に作用する摩擦力と反力の影響, 日本機械学会九州学生会 第 45 回卒業研究発表講演会, (2014.3.4), 九州大学(福岡県福岡市).
3. S. Hamada and M. Liu, Measurement effective stress intensity factor range of Mode II fatigue crack growth using hysteresis loop, 13th International Conference on Fracture, (2013.6.17), Beijing (China).
4. M. Liu and S. Hamada, Determination of effective stress intensity factor range of Mode II fatigue crack propagation with improved experimental method, 19th European Conference on Fracture (ECF19), (2012.8.27), Kazan (Russia).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

濱田 繁 (HAMADA SHIGERU)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 90432856