一枚型イオンスパッタ金属膜によるき裂長さの測定*

鄧 鋼^{*1}, 奈須 光太郎^{*2}
黒岩 修平^{*2}, 中西 勉^{*1}

Crack Length Measurement with an Ion Sputtered Metal Film

Gang DENG^{*3}, Koutarou NASU,
Syyuhei KUROIWA and Tsutomu NAKANISHI^{*3} Department of Mechanical Systems Engineering, University of Miyazaki,
1-1 Gakuen Kibanadai Nishi, Miyazaki-shi, Miyazaki, 889-2192 Japan

This research developed a simple and high precision method to measure the length of a fatigue crack using an extremely thin ion sputtered metal film based on that the electric resistance of the film changes with the increase of the crack. The electric resistance of a cracked film was calculated by the electrothermal FEM analysis. Based on the FEM analysis results, the relationship between the electric resistance and crack length is expressed by a practical formula. Fatigue crack length measurements for acrylic and metal test specimens were performed on the three-points fatigue test equipment. Based on the good agreements between the measurement results by the ion sputtered film and that by the optical microscope, it is clarified that the crack length measurement method with an ion sputtered metal film has a very high precision. In addition that the measurement system is very simple, this method can be said to have a high practical usability.

Key Words: Crack Length Measurement, Thin Film, Ion Sputtered Film, Micro-Crack, Fatigue Crack Detection

1. 結 言

歯車や軸などの動力を伝える機械要素の疲労破損においては、き裂の発生とその後の短いき裂の進展時間は疲労過程のほとんどを占めていることが知られ^{(1)~(3)}、き裂の発生の検知と短いき裂の進展特徴の解明は疲労寿命推定にとってきわめて重要な課題である。したがって、動力伝達用機械要素におけるき裂の進展特徴の解明には疲労き裂長さ、特に短いき裂の長さを測定する技術が必要である。このき裂長さの測定には、これまでにき裂の進展にともなう試験片の変位、剛性、コンプライアンスまたは電気的変化を通してき裂長さを推定する方法^{(4)~(10)}、光学顕微鏡や光学グリッド技術を用いてき裂の長さを測定する方法^{(11)~(13)}、および、アコースティックエミッション法⁽¹⁴⁾と超音波法⁽¹⁵⁾がある。しかしながら、それらの測定方法は、測定システムにおいて特殊な計測機器が必要であること、測

定値とき裂長さとの関係の煩雑さ、き裂長さの測定と記録の連続性等の面から実際の歯車など機械要素のき裂の測定、特に1mm以下の短いき裂長さおよび遅いき裂進展速度の測定への応用は困難であると思われる。

一方、著者らはき裂を含む薄い金属膜の電気抵抗とき裂長さとの関係に基づき、グリッド型イオンスパッタリング金属膜を用いて非金属材料の疲労き裂長さの測定技術を開発してきた⁽¹⁶⁾。その測定法に用いられた金属膜の厚さはわずか数ナノメートルであるため、膜のき裂先端は被測面のき裂先端と完全に一致していると思われ、き裂長さの測定精度は高く、光学顕微鏡とほぼ同等である。しかしながら、グリッド型イオンスパッタリング金属膜を微小き裂長さの測定に用いる場合、グリッドのピッチを極力小さくすることが必要であり、また、この測定法を金属試験片に用いた場合、試験片と金属膜との間に絶縁膜が必要であり、これまでと同様に一枚のスパッタ金属膜をハイトゲージによる引っかかり方法によるグリッドの加工では、絶縁膜を破損せずに精細なグリッド膜の作成は困難である。したがって、微小き裂長さの測定や金属試験片への適用

* 原稿受付 2006年9月19日。

^{*1} 正員、宮崎大学工学部(〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)。^{*2} ヤマザキマザック(株)(〒480-0197 愛知県丹羽郡大口町乗船1)。

E-mail: t0d114u@cc.miyazaki-u.ac.jp

Fig. 1 Electron flow in a cracked metal film

と利便性を考えれば、一枚型のイオンパッタリング金属膜の使用が望まれる。そこで、本研究では、一枚型イオンパッタ金属膜による金属試験片の疲労き裂長さの測定技術の確立を目的として、まず、イオンパッタ金属膜の電気抵抗とき裂長さとの関係を有限要素法の解析で調べ、次に、その関係を用いて三点曲げ疲労試験片のき裂長さの測定を行い、き裂長さの測定方法の実用性と測定精度について検討した。

2. き裂を含む金属膜の電気抵抗

通常、導体の電気抵抗は物体の断面寸法と長さおよび材料の電気抵抗率から求められる。しかし、き裂を含む一枚型金属膜の電気力線は図1に示すようにき裂先端を迂回するため、その場合の電気抵抗を理論式を用いて推定することは困難である。

小川らはセラミックスなどの絶縁脆性材料のき裂長さを測定するため、炭素薄膜を用いた方法について研究を行い、有限要素法の解析結果に基づき炭素薄膜の電気抵抗とき裂長さの関係を示す近似式を提案している⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。しかしながら、その近似式の適用範囲はき裂長さが膜の幅の0.2倍から0.8倍までの間であり、膜の幅の0.2倍以下である短いき裂には適用できない。また、膜の形状についても膜の長さとき裂進展方向の膜の幅との比は0.5以内との制限があるため、き裂の進展方向に細長い形の膜が必要であり、試験片の形状によってはその形の膜の作成は困難である場合もある。本研究では短いき裂の測定を目的としているため、金属膜のき裂長さは0から数ミリまでの間における膜の電気抵抗とき裂長さとの関係を求める方法が必要である。

3. き裂を含む金属膜の電気抵抗の推定

3-1 有限要素法による金属膜の電気抵抗の解析
き裂を含む金属膜に電流を流した場合、電気力線は図1に示すようにき裂先端を迂回するような状況であり、電気抵抗を求めるために有限要素法解析を用いる

Fig. 2 Mesh and boundary conditions for a metal film electrothermal FEM analysis

Fig. 3 Electric resistance calculated with different number of elements

ことにした。具体的には図2に示す金属膜の要素分割を用い、膜の左右に電位差を与えて、各要素の電流密度を求め、膜の断面を通過する総電流はその断面上の各要素の電流密度と要素の断面積との積を積分して求められる。膜の電気抵抗はオームの法則より膜両端の電位差と電流との比で算出できる。

本研究では、有限要素解析ソフト ANSYS の電熱解析を用いて膜の電気抵抗を求めた。有限要素法の解析精度は要素の分割によって変わり、電気抵抗を求めるのに適正な要素数を調べるため、図2に示す形状の金属膜において異なる要素数で電気抵抗を求めた。その結果を図3に示す。長さ l が 20.8mm、幅 w が 10.4mm、き裂長さ a が 4.16mm ($a/w=0.4$) である金属膜の場合、要素数 500~4000 において電気抵抗が要素数の増加にともなって上昇し、要素数 5000 以上において電気抵抗が一定値に接近していることから、解析の精度と計算システムの制限を考慮して、本研究では、要素数 6000 程度にして膜の電気抵抗を求めることにした。

Fig. 4 Electric resistance measurement and recording system for the metal film

3.2 金属膜の電気抵抗とき裂長さとの関係 金属膜の電気抵抗の測定には図4に示す直流電源、可変抵抗、データーレコーダで構成する簡単なシステムを用いて行った。電気抵抗の測定値には微小な配線の抵抗が含まれると思われる、有限要素法で求めた金属膜の電気抵抗と電気抵抗の測定値との一致を確認するために、アクリル試験片の上に作成したイオンスパッタ金属膜の電気抵抗をカッターで切欠きを導入しながら測定した。電気抵抗は膜両端の電位差と直流電源の電圧および可変抵抗の値から求められ、金属膜の発熱を抑えるため、可変抵抗と直流電源の電圧は金属膜に流れる電流を100mA以下となるように調整した。一方、切欠き長さは光学工具顕微鏡を用いて測定した。

異なる切欠き長さにおける金属膜の電気抵抗の測定値と有限要素法の解析値との比較を図5に示す。切欠き長くなるにつれ金属膜の電気抵抗が上昇し、測定範囲内において測定値と有限要素法の解析値との差は最大で2~3%であり、有限要素法の解析求めた金属膜の電気抵抗は電気抵抗の測定値と一致していることが確認された。

3.3 金属膜の電気抵抗の推定式 き裂を含む金属膜の電気抵抗は有限要素法の解析で推定できる。しかし、簡便性や実用性を考慮すれば、有限要素法の解析結果に基づいて膜の電気抵抗を計算できる簡単な近似式が望ましい。小川ら⁽¹⁸⁾は炭素膜の電気抵抗の推定式を提案している。その推定式はき裂長さが膜の幅の0.2~0.8倍の範囲内に限って用いられ、短いき裂の場合への適用ができない。一方、図5に示す金属膜の電気抵抗とき裂長さとの関係を一つの簡単な式で表すことは極めて困難と考えられる。

Fig. 5 Calculated and measured electric resistance of a metal film

Fig. 6 Factor b for different forms of metal films

本研究では、き裂長さが0から膜幅のある割合までについて、膜の電気抵抗とき裂長さとの関係を以下の式で示すことを提案した。

$$R = R_0 + ca^b \quad (0 \leq a \leq a_e) \quad (1)$$

ここで R は長さ a のき裂を有する金属膜の電気抵抗、 R_0 はき裂長さ $a = 0$ のときの膜の電気抵抗、 c と b は定数である。 b は膜の電気抵抗とき裂長さとの関係曲線の形を決めるファクターであると考え、膜の長さ l と幅 w の比 l/w を変えて有限要素法の解析で求めた膜の電気抵抗とき裂長さとの関係を式(1)で最小二乗法で近似して求めた。得られた定数 b を図6に示す。定数 b は膜の長さ l と幅 w の比 l/w が2以下において大幅に上昇している。しかし、 l/w が2~3.5との間において定数 b の増加は小さくなっているため、定数 b をその間の平均値2.268とした。

一方、イオンスパッタ法で金属膜を作成するため、

Fig. 7 Accuracy of crack length estimation from the electric resistance of the metal film

所定厚さの膜の作成が困難であり、また、金属膜の電気抵抗率も通常の金属膜の材質の電気抵抗率と異なっている。そのため、膜が一定の長さと同幅の場合でも、金属膜の電気抵抗が異なる。したがって、式(1)の定数 c は個々の金属膜の膜厚による電気抵抗の違いを考慮した定数であり、膜毎に決める必要がある。そこで、き裂が金属膜を完全に切断する前に測定を終了し、そのとき膜の電気抵抗 R_e と顕微鏡などの測定方法で測定したき裂長さ a_e を式(1)に代入すれば定数 c を決めることができる。ところで、式(1)は金属膜の電気抵抗とき裂長さとの関係を所定の領域、すなわち、き裂長さが0から a_e までの間において近似したものであり、電気抵抗の推定値の精度は式の適用範囲に左右される。そのため、き裂長さ測定終了時のき裂長さ a_e によって膜の抵抗値の推定誤差が異なり、 a_e が長くなるほど推定値の誤差が大きくなると思われる。これまで、アクリル試験片の上にイオンスパッタ金属膜を作成し、金属膜をカッターで切欠きを導入しながら光学顕微鏡による切欠き長さの測定と、図4に示す方法で測定した金属膜の電気抵抗を式(1)に代入してき裂長さの推定を行った。そのとき、式(1)の定数 c を決めるための切欠きの長さを膜幅の約0.6倍にした。図7には式(1)を用いて膜の電気抵抗から推定したき裂長さと光学顕微鏡で測定した切欠きの長さとの比較の一例を示す。図7から両者の一致が確認され、金属膜の電気抵抗とき裂長さとの関係を以下の式で近似的に推定できることがわかった。

$$R = R_0 + ca^{2.268} \quad (0 \leq a \leq 0.6w, 2.0 \leq l/w \leq 3.5) \quad (2)$$

Fig. 8 Three-points bending test rig and acrylic test specimen

なお、式(2)は簡便性と実用性を考慮して、有限要素法の解析の結果を単純にカーブフィッティングした近似式であり、金属膜の物理的意味を考慮して提案した式ではない。そのため、式(2)は本研究で調べた条件に限定して有効であると考えられる。

4. 三点曲げ疲労実験におけるき裂長さの測定

一枚型イオンスパッタリング金属膜によるき裂長さ測定法を確かめるため、アクリル製試験片三点曲げ疲労実験において、試験片のき裂長さを金属膜と光学顕微鏡を用いて測定し、一枚型金属膜によるき裂長さの測定精度を検討した。さらに、本き裂測定法を金属製試験片に用いる可能性を検討するため、中炭素鋼製の試験片の表面に絶縁膜を作成して、三点曲げ疲労実験においてき裂長さの測定を行い、測定精度を調べた。

4.1 アクリル試験片の疲労き裂長さの測定 アクリル製三点曲げ試験片の長さは100mm、厚さは10mm、幅は20mmであり、き裂が発生しやすいように試験片の中心部にV字型の切欠きを入れた。次に、試験片側面において切欠き先端近傍にイオンスパッタ金属(Au)膜を作成した。金属膜の長さは16.7mm、幅は7.0mm、厚さは約30nmである。

三点曲げ試験片と金属膜および負荷方法を図8に示す。疲労き裂長さ測定実験は試験片の切欠き部にき裂を発生させてから行い、試験片に加えた繰返し荷重は周波数10Hzの正弦波であり、最大荷重が100~120N、最小荷重と最大荷重の比(荷重比)が約0.02である。なお、金属膜の電気抵抗の測定と記録は図4に示すシステムを用いた。

き裂進展過程において測定は所定の繰返し荷重を加えた後、試験片を試験機から取り外して、光学顕微鏡によるき裂長さの測定とそのときの金属膜両端の電圧

Fig. 9 Crack length measured by a metal film and a microscope for an acrylic specimen

の記録を行った。その後、試験片を試験機に戻して再び繰返し荷重を加えた。なお、き裂が金属膜の幅の約0.6倍の時点で実験を終了し、その時点の金属膜の電気抵抗 R_e と光学顕微鏡で測ったき裂長さ a_e を用いて式(2)の定数 c を求めた。

アクリル製三点曲げ疲労実験において金属膜の電気抵抗から推定したき裂長さと光学顕微鏡で測定したき裂長さの比較を図9に示す。図9から金属膜によるき裂長さの測定結果は光学顕微鏡での測定結果と一致しており、光学顕微鏡で測定したき裂長さを実際のき裂長さと考えれば、本実験において金属膜によるき裂長さの測定の最大誤差が0.113mm、平均誤差が0.051mmであり、前報⁽¹⁶⁾のグリッドタイプのイオンスパッタ金属膜の測定誤差より大きくなっている。しかしながら、0.2mmの測定誤差を有する市販のクラックゲージでの測定法より⁽¹⁷⁾、一枚型イオンスパッタ金属膜の測定精度がはるかに高く、また、大きな誤差が生じる領域はき裂が短い時であり、試験片の取り外しや実験を中断したときの計測環境の変化による影響が大きく、測定を中断せずに金属膜の電気抵抗を連続的に記録できればより高い測定精度が得られることが考えられる。

4.2 金属製試験片の疲労き裂長さの測定 金属膜によるき裂長さ測定方法を金属製試験片に用いるために、試験片と金属膜との間に絶縁膜が必要である。市販のクラックゲージの絶縁にはプラスチックフィルムが用いられており、その厚さは10~20 μm であるため、試験片表面のき裂先端とクラックゲージのグリッドの切断位置とに差が生じ、き裂の測定誤差は約0.2mmである⁽¹⁷⁾。金属膜によるき裂長さ測定は金属製試験片においてもアクリル製試験片の場合と同等な測定精度を得るために、絶縁膜を極力薄くする必要がある。

Fig. 10 A sectional image of the insulation film and metal film

したがって、絶縁膜についてはこれまでに、シリコンとフライアッシュガラスの蒸着膜、酸化塩の塗布、液状瞬間接着剤の塗布など様々な方法を試用してきた。それぞれの絶縁膜の性質や作成の利便性および作成方法などについてさらに研究を進める予定である。

本研究では、歯車や軸の疲労強度実験での実用性を視野にいれ、絶縁膜の作り易さや絶縁の確実さなどのことを考慮して、液状瞬間接着剤の塗布を用いて絶縁膜を作成し、金属膜によるき裂測定法を金属試験片に用いる可能性について検討した。

き裂長さ測定に用いた中炭素鋼(S50C)製の三点曲げ疲労試験片はアクリル試験片と同じ寸法である。実験では、まず、試験片に高い繰返し荷重を加えて試験片の切欠き部からき裂を発生させ、その後繰返し荷重を減少しながらき裂を進展させた。試験片の側面表面においてき裂を確認してから実験を一時中断し、イオンスパッタ金属膜を作成することにした。絶縁膜と金属膜および配線方法を図10に示す。配線用のターミナルを貼付けてから、絶縁膜の作成、イオンスパッタ金属膜の作成の手順で行った。なお、き裂進展実験中の最大荷重は3000Nで、荷重の繰返し速度は40Hzである。

絶縁膜の厚さは瞬間接着剤の粘度や塗布速度などによって異なり、絶縁膜の厚さによって絶縁抵抗が変わると思われる。本測定に必要な瞬間接着剤絶縁膜の厚さについては検討中である。これまで作成した絶縁膜の厚さは平均して2~6 μm であり、その絶縁膜を用いて金属膜の電気抵抗とき裂長さとの関係を調べた結果、その関係は図5に示すアクリル試験片の場合と同じ傾向にあり、金属膜と試験片との間は絶縁していることが確認された。

中炭素鋼製三点曲げ試験においてイオンスパッタ金属膜の電気抵抗から式(2)を用いて推定したき裂長さと光学顕微鏡で測定したき裂長さの比較を図11に示す。図11からアクリル試験片の場合と同様、金属膜

Fig. 11 Crack length measured by a metal film and a microscope for a metal specimen

によるき裂長さの測定結果は光学顕微鏡での測定結果と一致していることが確認できた。しかしながら、測定結果の中で1点のみが全体の傾向から大きくはずれていることが見られる。その原因は光学顕微鏡でき裂長さを測定するとき、負荷の解除でき裂の閉口による金属膜のき裂の局部導通および電気抵抗測定時の配線の状態などの偶発的要因によるものと思われる。したがって、その点を除外すれば、金属膜によるき裂長さの測定の最大誤差が0.113mm、平均誤差が0.068mmである。アクリル試験片と同様に、本測定法は金属製試験片においてもクラックゲージ法より高い測定精度を有することが確認され、一枚型イオンスパッタ金属膜によるき裂長さの測定が金属製試験片にも適用できることがわかった。さらに、測定システムの簡便性と測定精度から、本測定法の高い実用性が明らかである。

5. 結 言

本研究では、高精度かつ高実用性の疲労き裂長さの測定技術の開発を目的として、金属製試験片にも適用可能な一枚型イオンスパッタ金属膜による疲労き裂長さの測定方法を試みた。具体的には、き裂長さ測定に必要なき裂長さと金属膜の電気抵抗との関係を有限要素法の解析を行い、その結果に基づき、電気抵抗の推定式を提案した。また、三点曲げ疲労実験によるき裂長さの測定で一枚型イオンスパッタ金属膜による疲労き裂長さの測定精度を調べた。得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) 一枚型イオンスパッタ金属膜の電気抵抗とき裂長さの関係性を有限要素法の解析によって明らかにした。膜の長さは膜の幅の2~3.5倍の長方形膜で、

かつ、き裂長さは膜の幅の0~0.6倍の範囲内において、その関係を簡単式で表せた。

- (2) 絶縁体のアクリル製三点曲げ試験片においてき裂長さの測定を行い、一枚型イオンスパッタ金属膜による測定結果と光学顕微鏡による測定結果との差が小さく、市販のクラックゲージを用いた測定方法より高い測定精度を有することが確認された。
- (3) 金属製三点曲げ試験片において、測定表面とイオンスパッタ金属膜との間に瞬間接着剤で絶縁膜を作成し、絶縁膜の上にイオンスパッタ金属膜を作成した場合、き裂長さの測定精度はアクリル製試験片の場合とほぼ同じであり、本測定法の金属製試験片への利用可能性が確かめられた。
- (4) イオンスパッタ金属膜の電気抵抗の測定システムは極めて簡単であり、また、提案式を用いれば電気抵抗からき裂長さを容易に算出することができ、本研究で提案したき裂長さ測定法の高い簡便性と実用性を示した。

文 献

- (1) Deng, G. et al., *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Series C*, Vol.65, No.632 (1999), pp.1649-1654.
- (2) Masuyama, T. et al., *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Series C*, Vol.62, No.600 (1996), pp.3289-3295.
- (3) Ani Ural et al., *Proc. 9th Int. Power Transmission and Gearing Conference*, (2003).
- (4) Brown, T.F., Tr. and Srawley, J.E., *ASTM STP410*, (1966).
- (5) Nisitani, H. and Chen, D., *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Series A*, Vol.51, No.465 (1985), pp.1436-1441.
- (6) Kikukawa, M. et al., *J. Soc. Materials Science, Jpn.* Vol.25, No.276 pp. (1976), 899-903.
- (7) Ashida, Y. et al., *J. Kansai Soc. N. A., Japan*, No.225 (1996), pp.181-185.
- (8) Nakai, Y. et al., *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Series A*, Vol.55, No.511 (1989), pp.543-548.
- (9) Lee, J.H. and Kobayashi, H., *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Series A*, Vol.51, No.461 (1985), pp.142-147.
- (10) Jpn. Soc. Mech. Eng., *JSME Standard*, JSMES001, (1981), pp.8-9.
- (11) Bucci, R.J. et al., *ASTM STP513*, (1972), 125-140.
- (12) Mautz, J. and Weiss, V., *ASTM STP601*, (1976), pp.154-168.
- (13) James, L.A., *ASTM STP738*, (1981), pp.45-57.
- (14) Masuyama, T. et al., *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Series C*, Vol.60, No.575 (1994), pp.2456-2461.
- (15) Shimada, H. and Date, K., *Iron and Steel, ISIJ*, Vol.60, No.2 (1983), pp.196-202.
- (16) Deng, G. et al., *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Series C*, Vol.72, No.715 (2006), pp.997-1002.
- (17) Deng, G. et al., *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Series C*, Vol.57, No.535 (1991), pp.909-913.
- (18) T. Ogawa and S. Suresh, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.39, (1991), No.4, pp.629-640.
- (19) Ogawa, T., *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Series A*, Vol.57, No.535 (1991), pp.492-499.