

## スパッタ金属膜によるき裂長さの測定\*

鄧 鋼<sup>\*1</sup>, 徳永仁夫<sup>\*2</sup>, Tilahun Daniel REDDA<sup>\*2</sup>  
池田清彦<sup>\*1</sup>, 中西 勉<sup>\*1</sup>, 海津浩一<sup>\*1</sup>

## Crack Length Measurement with an Ion Sputtered Film

Gang DENG<sup>\*3</sup>, Hitoo TOKUNAGA, Tilahun Daniel REDDA,  
Kiyohiko IKEDA, Tsutomu NAKANISHI and Koichi KAIZU<sup>\*3</sup> Department of Mechanical Systems Engineering, University of Miyazaki,  
1-1 Gakuen Kibanadai Nishi, Miyazaki-shi, Miyazaki, 889-2192 Japan

Crack length measurement and crack initiation detection in a fatigue process are extremely important techniques in the researches for the investigation of crack growth characteristics and the fatigue strength evaluation of machine elements. The purpose of this research is to show a simple and high precision method to measure the length of a crack as well as a micro crack using an extremely thin ion sputtered film. A grid pattern ion sputtered film was proposed to measure the crack length for a bending test specimen. Based on the comparisons between the measurement results and that by a microscope, it was clarified that the grid pattern ion sputtered film has a very high measurement precision. This method should be invaluable and practicable for the crack length measurement of insulating materials such as ceramics. Meanwhile, a rectangle ion sputtered film was used on a metal bending specimen, the possibility to apply the film in the crack length measurement of a metal machine element was confirmed by the change of the electric resistance of the film with crack growth.

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

## 1. 緒 言

近年, 疲労き裂の発生とき裂の進展に着目した機械要素の疲労強度評価に関する研究が多く見られ<sup>(1)~(3)</sup>, き裂長さの測定法に関しても多数の研究が行われている。それらの研究に用いられたき裂長さの測定方法はき裂の進展にともなう試験片の変位や剛性または, 電気的変化を通してき裂長さを推定する方法である。Brown ら<sup>(4)</sup>や西谷ら<sup>(5)</sup>はき裂進展にともなう荷重と試験片の変形との関係に基づくコンプライアンス法, また, 菊川ら<sup>(6)</sup>は除荷重時のき裂の開閉口によるコンプライアンスの非線形特性を用いてき裂長さを測定している。増山ら<sup>(2)</sup>, Brown ら<sup>(4)</sup>, 芹田ら<sup>(7)</sup>と中井ら<sup>(8)</sup>はき裂の両側面の電位差からき裂長さの測定を行っている。他には, き裂の開口変位または閉口変位の測定によってき裂長さを求める方法<sup>(9)(10)</sup>や, 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<sup>(11)~(13)</sup>, および, アコースティックエミッション法<sup>(14)</sup>と超音波法<sup>(15)</sup>も見られる。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, 測定値からき裂長さとの関係の決定, き裂長さ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0.1mm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。さらに, き裂長さを間接的に測定する方法としてクラックゲージ法と薄膜法が挙げられる。クラックゲージ法ではクラックゲージのグリッドとき裂の側面との間にプラスチック膜が存在しているため, 測定したき裂長さが実際のき裂長さより短い<sup>(16)</sup>。薄膜法では, 試験片表面のき裂の進展にともなう薄膜の電気抵抗の変化を通してき裂長さを測れるが<sup>(17)~(19)</sup>, き裂長さとの膜の抵抗との関係式の適用範囲などの制約のため多用されていないようである。

以上のことから, き裂の測定技術は測定精度と測定方法の簡便性などの面において充分とは言えず, 特にき裂の進展過程に着目した高負荷用の動力伝達用歯車などの機械要素の疲労強度評価を進めるために, 複雑

\* 原稿受付 2005年4月15日。

<sup>\*1</sup> 正員, 宮崎大学工学部(☎889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)。<sup>\*2</sup> 宮崎大学大学院工学研究科。

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

な形状部位でのき裂長さの測定や、き裂発生から長さ数十マイクロメートルオーダーの微小き裂の測定技術が求められる。そこで、本研究では、歯車などの動力伝達用機械要素のき裂長さの測定技術の開発を目的として、クラックゲージのき裂長さ測定原理を参考に、極めて薄いイオンスパッタ金属膜を被測体表面に作成して長さ数十マイクロメートルから数ミリのき裂を正確に測定できる方法を示し、その方法の測定精度や実用性について検討した。

## 2. グリッド状金属膜の電気抵抗とき裂長さ

**2.1 き裂を有する長方形膜とグリッド状膜の電気抵抗** 長さ  $l$ 、幅  $w$ 、厚さ  $t$  の導体の電気抵抗  $R$  は次式で求められる。

$$R = \rho \frac{l}{w \cdot t} \quad (1)$$

ここに、 $\rho$  は導体の抵抗率である。厚さ一定の導電膜をき裂先端近傍に作成した場合、き裂の進展によって導電膜が部分的に切断され、膜の電気抵抗は増加する。その電気抵抗よりき裂長さを推定することができる。膜の電気抵抗とき裂長さとの関係については有限要素法解析の結果に基づいて近似式を提案し、CT 試験片の表面に炭素薄膜を作成して薄膜による絶縁体のき裂長さの測定方法を提案した研究が見られる<sup>(17)(18)</sup>。しかしながら、その近似式は所定形状の膜に限って用いられ、また、測定できるき裂長さも膜幅の 0.2~0.8 倍の範囲内であり、微小き裂の測定や複雑な形状の機械要素への適用には困難があると考えられる。

一方、幅  $w$  に比べて長さ  $l$  が特に大きい場合、き裂長さ  $a$  と導電膜の抵抗  $R$  との関係は次式で表される<sup>(17)</sup>。

$$R = \begin{cases} \text{constant} & (a \neq w) \\ \infty & (a = w) \end{cases} \quad (2)$$

すなわち、き裂が膜を完全に切断しない限り膜の抵抗がほぼ一定である。したがって、導電膜をグリッド状にすれば、グリッドが切断された瞬間、膜の電気抵抗が急増する。膜の電気抵抗の急増回数から切断されたグリッドの本数がわかり、き裂長さを推定できる。市販のクラックゲージではこの原理を利用してき裂長さを測定しているが、クラックゲージの金属グリッドと試験片の表面との間にプラスチックの膜があり、また、グリッドの厚さも 20 $\mu\text{m}$  前後であるため、測定したき裂長さは実際のき裂長さより平均で 0.2mm 短いことが報告されている<sup>(16)</sup>。そこで、極めて薄い金属膜を試験片表面に直接に作成した場合、試験片のき裂先端と膜の切断位置は一致していると思われ、高精度なき裂長さの測定ができると考えている。

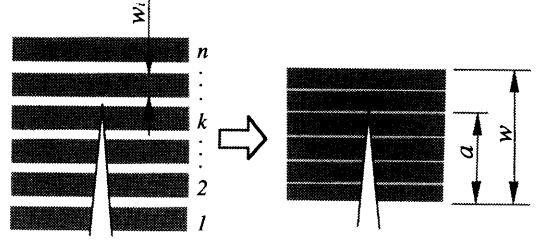


Fig. 1 A grid pattern film and a rectangle film

**2.2 グリッド状金属膜の電気抵抗とき裂長さとの関係** グリッド間に電流が流れないので、図1に示すようにグリッド状金属膜の電気抵抗を複数のグリッドで構成した長方形膜と考えると、膜の電気抵抗は次式で求められる。

$$R_a = \frac{C}{w - a}, \quad C = \frac{\rho \cdot l}{t}, \quad w = \sum_{k=1}^n w_k \quad (3)$$

ここに、 $w$  と  $a$  は膜の幅とき裂長さ、 $C$  は膜の抵抗率  $\rho$  と長さ  $l$  および厚さ  $t$  によって決まる定数である。

グリッド状金属膜が切断された部分の幅、すなわち、き裂長さとの関係を調べるため、イオンスパッタリング装置を用いてガラス板上に厚さ数十ナノメートルの金属 (Au) 膜を作成し、ハイトゲージを用いた引っかかり方法で図2に示すグリッド状金属膜を作成した。電気抵抗を測るため薄い銅板をターミナルとして用い、銅板と金属膜との間を銀ペーストで接着した。グリッドの切断ともなう金属膜の電気抵抗の変化を図3に示す。なお、電気抵抗の測定結果を最小二乗法を用いて式(3)で近似した結果を図3の破線で示す。測定値との差をなくすため、式(3)に定数  $\alpha$  を加えた結果、近似曲線(図3の実線)はすべての測定点を通り、金属膜の電気抵抗とき裂長さとの関係を以下の修正式で正確に表せることは明らかである。

$$R_a = \frac{C}{w - a} + \alpha, \quad (4)$$

ただし、定数  $\alpha$  の物理的意味についてはまだ解明していないが、その値はいずれの実験に置いても 1 $\Omega$  以下であり、電気抵抗測定用の銅板と銀ペーストの電気抵抗による可能性があると思われる。また、膜毎の定数  $C$  と  $\alpha$  はき裂長さ測定の前に膜のグリッドを数本切断して、切断したグリッドの幅とそのときの膜の電気抵抗から得られる。

**2.3 グリッド状スパッタ金属膜を用いたき裂長さ測定精度** 極めて薄い金属膜によるき裂長さの測

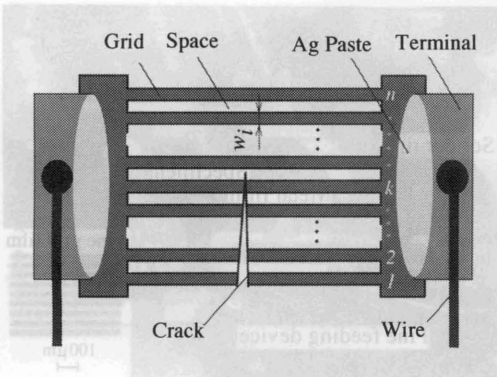


Fig. 2 Grid pattern film for crack length measurement

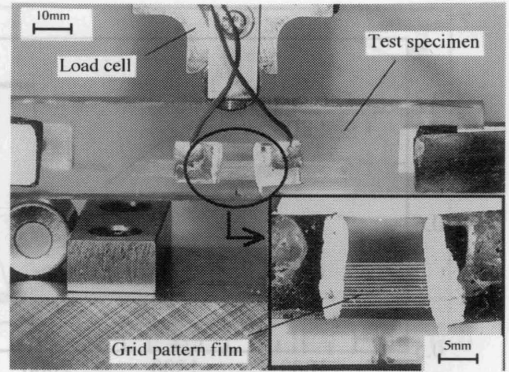


Fig. 4 Crack length measurement for a bending specimen using a grid pattern metal film

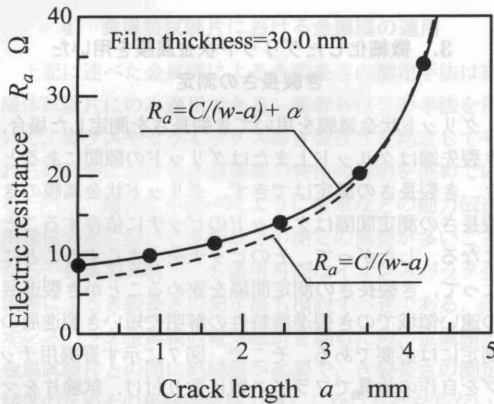


Fig. 3 Relationship between electric resistance and crack length for a grid pattern film

定精度を調べるため、アクリル製三点曲げ疲労試験片にグリッド状金属膜を作成し、き裂長さの測定を行った。試験片とグリッド状金属膜および実験の方法を図4に示す。実験では、まず、試験片にノッチを導入し、繰返し荷重を加えてノッチの先端にき裂を発生させてから低い繰返し荷重でき裂を進展させた。ここで、グリッド状金属膜の厚さは10nmであり、グリッドの幅は約0.2mm、グリッドの間隔は約0.1mmである。また、試験片の支点間距離と試験片の幅および厚さはそれぞれ80mm、20mm、10mmであり、繰返し試験荷重は周波数10Hzの正弦波荷重で、応力比は約0.02である。金属膜の初期電気抵抗とグリッドの切断による電気抵抗の変化量が大いことから図5に示す可調直流電源と可変抵抗および電圧計からなる簡単な測定システムで金属膜両端の電圧から膜の電気抵抗を求めることにした。また、供給電圧 $V_0$ は1~5V程度であり、

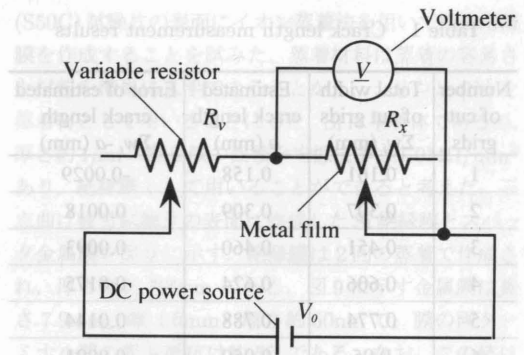


Fig. 5 Electric resistance measurement system for a metal film

金属膜に流す電流を100mA以下になるように可変抵抗と供給電圧を調節し、疲労実験中の金属膜両端の電圧はA/D変換器を通してパーソナルコンピュータに記録される。サンプリング速度は80Hzである。

き裂進展にともなうグリッド状金属膜両端の電圧の変化を図6に示す。荷重による試験片の変形によって膜の抵抗値の変化が生じていたため、金属膜両端の電圧には小幅な変動が含まれているが、電圧信号は階段状に上昇していることから、式(2)の示すとおり、グリッドが完全に切断された瞬間に膜の電気抵抗の急上昇にともなう電圧の立ち上がりが確認された。金属膜両端の電圧の階段数から切断されたグリッドの本数がわかり、また、金属膜両端の電圧信号の立ち上がりの瞬間にき裂の先端はグリッドの縁にあると考えられ、切断されたグリッドの幅の積算値 $w$ は膜の電気抵抗より式(4)から求められるき裂長さ $a$ と同じになる。

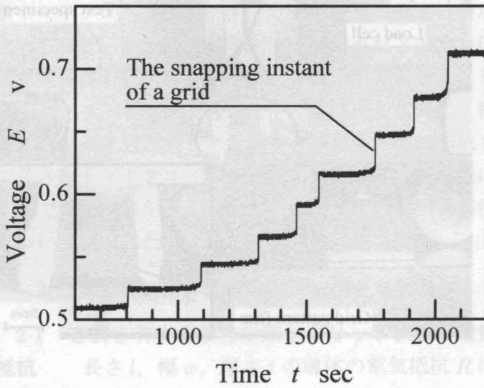


Fig. 6 Electric resistance of a grid pattern film during crack growth

Table 1 Crack length measurement results

Number of cut grids	Total width of cut grids $\Sigma w_i$ (mm)	Estimated crack length $a$ (mm)	Error of estimated crack length $\Sigma w_i - a$ (mm)
1	0.161	0.158	-0.0029
2	0.307	0.309	0.0018
3	0.451	0.460	0.0093
4	0.606	0.624	0.0175
5	0.774	0.788	0.0144
6	0.95	0.959	0.0091
7	1.117	1.122	0.0045

積算値  $w$  と推定き裂長さ  $a$  との差はグリッド状金属膜のき裂長さの測定誤差と考え、図6に示す実験結果から積算値  $w$  とき裂長さの推定値  $a$  との比較を表1に示す。グリッドの幅  $w_i$  はき裂に沿って光学工具顕微鏡を用いて測定した。表1より、グリッド状金属膜のき裂長さの測定誤差は最大で  $17\mu\text{m}$ 、平均で約  $8\mu\text{m}$  であり、グリッド状金属膜の電気抵抗から得られたき裂長さは光学顕微鏡の測定結果とほぼ一致しており、この測定法はこれまでのクラックゲージ測定法よりも高い精度を有することは明らかであることがわかった。また、き裂長さ推定に必要な金属膜の電気抵抗とき裂長さとの関係を示す式(4)の正確さも確認できた。したがって、本測定手法を用いれば、金属膜両端の電圧信号よりき裂長さを正確に求め、電圧値を見ながらき裂の進展を停止させたり、き裂進展状況を制御したりすることが簡便にできると思われる。

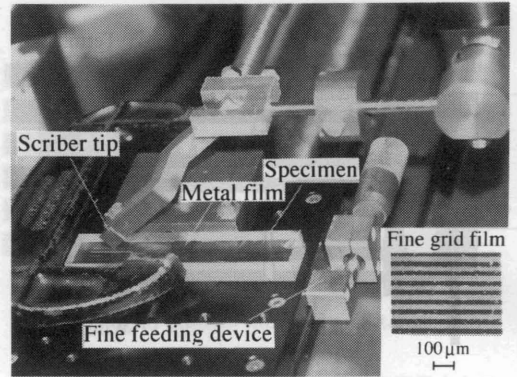


Fig. 7 Method for making a fine grid pattern metal film

### 3. 微細化したグリッド状金属膜を用いたき裂長さの測定

グリッド状金属膜を用いてき裂長さを測定した場合、き裂先端はグリッド上またはグリッドの隙間にあるとき、き裂長さの測定はできず、グリッド状金属膜のき裂長さの測定間隔はグリッドのピッチに依存することになる。したがって、そのピッチを小さくすることによって、き裂長さの測定間隔を狭めることができき裂進展の速い領域でのき裂進展特性の解明や短いき裂進展の測定には必要である。そこで、図7に示す野線用チップを自作の治具でフライス盤に取り付け、試験片をマイクロ移動台に固定してから一枚の長方形イオンスパッタ金属 (Au) 膜を引っかき加工することで、現在市販のクラックゲージと同様にグリッドの幅約  $25\mu\text{m}$ 、ピッチ  $50\mu\text{m}$  のグリッド状金属膜を作成できた。

き裂の進展にともなう微細グリッド状イオンスパッタ金属膜の電気抵抗の変化を便宜上金属膜両端の電圧の変化で表した結果を図8に示す。グリッドの本数と同じ数の電圧の立ち上がりが確認され、実験後各グリッドの位置を顕微鏡で測定することによってき裂長さを正確に求めることができる。電源のノイズやき裂の閉口による切断した金属膜の再接触などによって、電圧信号には変動があり、時には下向きに下がる信号もみられるが、いずれもき裂切断瞬間の判断に影響を与えないものではない。以上のことから、グリッド状イオンスパッタ金属膜を用いれば、き裂長さとも金属膜の電気抵抗との関係を求める煩雑さと、金属膜の形状や厚さの不均一性などの問題を回避することができ、さらに、極めて簡単な測定システムを用いて高精度なき裂長さを測定できることが確認された。

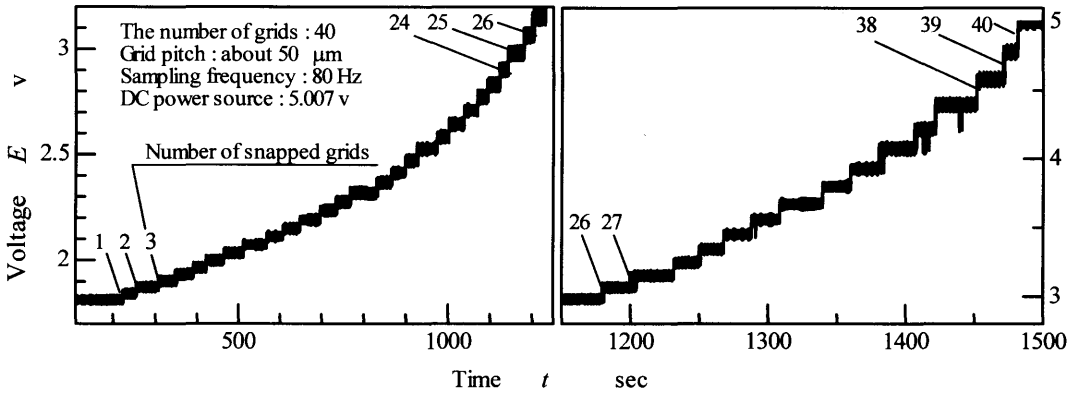


Fig. 8 Electric resistance of a fine grid pattern film during crack growth

#### 4. 金属製試験片における金属膜の適用

上記に述べた金属膜によるき裂長さの測定手法は絶縁体試験片にのみ適用できる。著者らはこの手法を用いて、ガラスやセラミックスのき裂長さを測定してそれらの材料におけるき裂進展の特性の解明を進めている。一方、緒言にも述べたように歯車などの動力伝達用機械要素におけるき裂長さの測定の需要が多いことから、金属製試験片にも適用可能なイオンスパッタ金属膜によるき裂長さの測定法も検討すべきである。イオンスパッタ金属膜の電気抵抗を測るため、金属膜と金属試験片との間に絶縁膜が必要で、き裂長さの測定精度のためその絶縁膜を極力薄くしなければならない。また、薄い絶縁膜の上にグリッド状のイオンスパッタ金属膜を作成できれば、図8と同じ結果が得られると考えられるが、しかしながら、絶縁膜に損傷を与えずにグリッド状の金属膜の作成は非常に困難である。これらのことを考慮して、本研究では、イオンスパッタ金属膜による金属試験片のき裂長さ測定法の可能性を検討するため、絶縁膜の作成と長方形金属膜の電気抵抗によるき裂長さの測定の可能性を模索し、今後の展開を示すことにした。当然のことで、金属膜を長方形にすることで前述のごとくグリッド状金属膜によるき裂長さの測定の利点なくなるものの、極めて薄いイオンスパッタ金属膜の利用で、膜の切断位置と試験片表面き裂先端の位置は一致しており、金属膜の電気抵抗とき裂長さとの関係を解析で得られれば、金属膜の電気抵抗からき裂長さを正確に推定することができると思われる。

**4.1 絶縁膜と金属膜の作成** イオンスパッタ金属膜の測定精度を保つために、絶縁膜を極力薄くする必要がある。そこで、焼きならしを施した中炭素鋼

(S50C) 試験片の表面にイオン蒸着法を用いて絶縁用薄膜を作成することを試みた。蒸着材料は蒸着の容易さと材料を簡単に入手できることから、シリコン(Si)を蒸着材として用いることにした。Siは半導体であるが、厚さ約 $1\mu\text{m}$ の蒸着膜の面積平均抵抗率は $1.0\text{M}\Omega/\text{mm}^2$ あり、絶縁膜として用いることができると考えた。三点曲げ疲労試験片の表面に作成したSi絶縁膜とスパッタ金属膜を図9に示す。絶縁膜は2回の蒸着で作成され、厚さは約 $700\text{nm}$ である。図9に示す金属膜は長さ $7.9\text{mm}$ 、幅 $4.6\text{mm}$ 、厚さ約 $50\text{nm}$ で、膜の両ターミナル間の電気抵抗は約 $5\Omega$ である。なお、この値はこれまでのアクリル製試験片上に作成した金属膜と同じ程度であり、金属膜と金属製試験片との間のSi膜の絶縁効果が確認された。

**4.2 金属製試験片における金属膜を用いたき裂長さ測定** 図5に示す金属膜の電気抵抗測定システムを用いて測定した三点曲げ金属試験片のき裂進展中の金属膜の電気抵抗を図10に示す。図10から電気抵抗の変化の傾向はグリッド状金属膜のそれと同じ傾向にあり、金属膜の電気抵抗はき裂の進展に連動していることから、金属膜を用いたき裂長さ測定法の金属製試験片への適用が充分可能であることが確認できた。一方、図10に示す金属膜の電気抵抗には変動幅があるが、その変動幅はほぼ一定であるため、繰返し荷重の周期的変動にともなう膜の抵抗率などの変化によるものと考えられる。荷重にともなう膜の抵抗率の変化を考慮した膜の電気抵抗のサンプリング方法や、き裂長さの測定に必要な任意形状の金属膜の電気抵抗とき裂長さとの関係の解析方法については筆者らを中心に進めており、次報で報告する予定である。



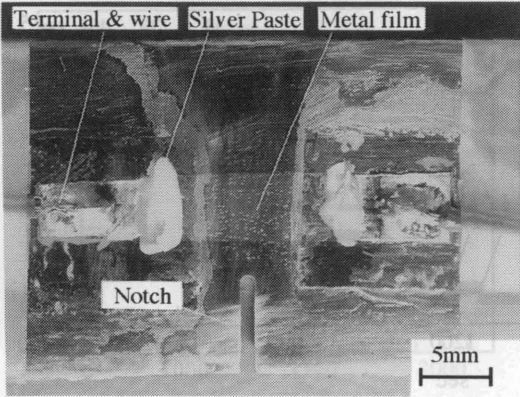


Fig. 9 Rectangle metal film on a metal bending specimen surface

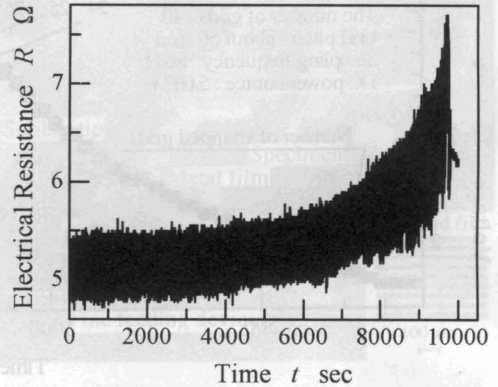


Fig. 10 Electric resistance of a rectangle metal film during crack growth

## 5. 結 言

本研究では、き裂の進展に着目した歯車などの動力伝達用機械要素の疲労強度評価を行うために必要な微小き裂長さの測定方法の検討を目的として、ナノメータオーダー厚さのイオンスパッタ金属膜を用いて、三点曲げ試験片においてき裂長さを測定した。その測定結果を光学顕微鏡による測定結果と比較し、金属膜を用いたき裂長さの測定精度を調べた。また、金属製試験片表面に絶縁膜とイオンスパッタ金属膜を作成し、金属製試験片における金属膜を用いたき裂長さ測定法の適用の可能性についても調べた。得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) イオンスパッタ金属膜をグリッド状にすることによって、グリッド切断時にき裂長さを正確に測ることができる。金属膜の電気抵抗から求めたき裂長さと光学顕微鏡で測定したき裂長さとの誤差は最大  $17\mu\text{m}$  であり、提案した方法は市販のクラックゲージの測定誤差より遙かに小さく、微小き裂の測定にも用いられる高精度なき裂長さの測定方法であることを示した。また、き裂長さの測定システムも非常に簡単であり、簡便性等の面から見て本研究で示したき裂長さ測定法の高い実用性は明らかである。特にガラスやセラミックスなどの非導体材のき裂長さの測定に有用である。
- (2) 金属製試験片において Si 蒸着膜を絶縁膜として使い、その上にスパッタ金属膜を作成することで、き裂の進展にともなう金属膜の抵抗の変化を測定することができ、スパッタ金属膜の金属製試験片への適用の可能性を確認できた。

## 文 献

- (1) 鄧・増山・井上・加藤, 65-632, C(1999), 1649-1654.
- (2) 増山・井上・加藤, 機論, 62-600, C(1996), 3289-3295.
- (3) Ani Ural, Paul A. Wawrzynek, et al, Proc. 9th Int. Power Transmission and Gearing Conference, (2003).
- (4) Brown, T.F., Tr. and Srawley, J.E., ASTM STP410, (1966).
- (5) 西谷・陳, 機論, 51-465, A(1985), 1436-1441.
- (6) 菊川・城野・田中・高谷, 材料, 25-276, (1976), 899-903.
- (7) 芦田・石原・藤原・飛田, 関西造船協会誌, 225, (1996), 181-185.
- (8) 中井・赤木・北村・大路, 機論, 55-511, A(1989), 543-548.
- (9) 李・小林, 機論, 51-461, A(1985), 142-147.
- (10) 日本機械学会, 弾塑性破壊靱性 JIC 試験法, JSMES001, (1981), 8-9.
- (11) Bucci, R.J., Paris, P.C., Hertzberg, R.W., Schmidt, R.A. and Anderson, A.F., ASTM STP513, (1972), 125-140.
- (12) Mautz, J. and Weiss, V., ASTM STP601, (1976), 154-168.
- (13) James, L.A., ASTM STP738, (1981), 45-57.
- (14) 増山・井上・加藤, 機論, 60-575, C(1994), 2456-2461.
- (15) 島田・伊達, 鉄と鋼, 60-2, (1983), 196-202.
- (16) 鄧・井上・高津・加藤, 機論, 57-535, C(1991), 909-913.
- (17) T. Ogawa and S. Suresh, Engineering Fracture Mechanics, Vol.39, (1991), No.4, 629-640.
- (18) 小川, 機論, 57-535, A(1991), 492-499.
- (19) 中村・斎藤・池山・小塚・重松, Journal of the Ceramic Society of Japan, 101-1, (1993), 139-142.