

アルミニウム薄膜の疲労すべり変形を利用した 疲労ゲージに関する基礎的研究*

(第1報, 単軸応力下におけるすべり線発生および表面粗さの増加)

長瀬 康男^{*1}, 中村 保^{*1}, 中村 芳幸^{*2}

Fatigue Gauge Utilizing Slip Deformation of Aluminum Foil (1st Report, Slip Initiation and Surface Roughening Phenomena Under Uniaxial Stressing)

Yasuo NAGASE, Tamotsu NAKAMURA, and Yoshiyuki NAKAMURA

Fundamental characteristics of slip initiation and surface roughening phenomena in aluminum foil during the fatigue process are investigated under constant amplitude stressing. Applicability of the foil to the fatigue gauge that utilizes these phenomena to detect fatigue damage is discussed. It is found that the slip initiation phenomenon in aluminum foil is easily observed by an optical microscope and that the effects of temperature and cyclic speed on the slip initiation are quite small. Accordingly, aluminum foil can be used as the fatigue gauge that utilizes the slip initiation phenomenon. It is also found that evolution of surface roughness caused by the slip deformation is dependent on cyclic stress and the number of cycles. Therefore, this phenomenon also enables use of the foil as the fatigue gauge that makes use of surface roughness. Measuring accuracy of stress by this foil is about 5 MPa, and in-process measurements of cyclic strains or fatigue damage can be practicable provided that non-contact surface roughness measurement is adopted.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Fatigue, Service Load, Surface Roughness, Aluminum, Slip Band

1. 結 言

純鉄⁽¹⁾, 銅⁽²⁾, ニッケル⁽³⁾などの薄膜に生ずる疲労すべり線の初生または発生密度が繰返し応力および繰返し数に支配される現象に着目して, これら薄膜を利用したひずみゲージが提案されている。ひずみゲージに必要な特性として, すべり線が容易に検出できること, すべり変形の温度および繰返し速度依存性が小さいこと, 適用温度範囲が広いこと, ひずみ感度が高いことなどがあげられる。上述した薄膜はこれらの点で一長一短があり, これらすべてを具備した薄膜はまだ報告されていない。

純アルミニウムは積層欠陥エネルギーが高く, 純鉄のように wavy なすべり特性を有し, 光学顕微鏡によるすべり線の観察が容易である⁽⁴⁾。また, 純鉄と異なり fcc 金属であるので, 疲労すべり線発生現象の温度依存性が小さいことが期待されるとともに繰返し速度の影響も小さいものと考えられる。また, 純度が高ければすべり線発生の限界応力も低く, ひずみ感度が高いことが予想される。さらに, 酸化に対して比較的有

利であること, 展延性が大きく容易に薄膜が得られることなどの特徴を有している。したがって, アルミニウム薄膜は, 上述の金属薄膜と同様に, すべり線発生現象を利用したひずみゲージとして利活用の可能性が高いと考えられる。

さらに, アルミニウム薄膜ではすべり線発生の限界応力が低いために, すべり変形に起因する表面粗さの変化が顕著であるものと推定される。したがって, 初期すべり線発生現象のみならず表面粗さを尺度とした応力測定法が可能になるものと考えられる。特に, 変動応力下における表面粗さの誘起特性が明らかになれば, 測定期間中の変動応力の平均値を等価応力⁽⁵⁾⁽⁶⁾で見積もることが可能となり, ひずみゲージとしてのみならず, いわゆる疲労ゲージとして利用できるものと考えられる。

以上の観点から, 本研究ではまず, 一定振幅応力下における純アルミニウム薄膜の疲労すべり線発生現象および表面粗さの誘起特性について基礎的な検討を加えることを目的とした。すなわち, まず初期すべり線発生現象を利用した疲労ゲージを実機に応用することを想定し, この場合に必要ゲージ特性として, すべり発生の繰返し速度依存性, 温度依存性などを調査した。次に, 疲労の進行に伴う表面粗さの増加特性を単

* 平成元年8月25日 東北支部盛岡地方講演会において講演, 原稿受付 平成元年1月25日。

^{*1} 正員, 静岡大学工学部(〒432 浜松市城北3-5-1)。

^{*2} 学生員, 静岡大学大学院。

軸応力下で調査し、粗さを尺度とする疲労ゲージの可能性について検討した。さらに、この手法の測定精度について若干の考察を加えた。

2. 実験方法

2.1 供試アルミニウム薄膜 実験には厚さ15 μmのアルミニウム薄膜(JIS 1 N 30 O材)を用いた。アルミニウム薄膜の表面には圧延きずがあるが、中心線平均粗さが $R_a \approx 0.07 \mu\text{m}$ であり、その粗さの程度は極めて小さい。したがって、疲労に伴う粗さ変化を測定するにはならん障害とならないため、一部の場を除外し、電解研磨は行わなかった。

図1にアルミニウム薄膜の光学顕微鏡組織を示す。図から明らかなように、圧延および焼なまし処理に伴う結晶粒形状の異方性は認められない。また、平均結晶粒径は $d \approx 0.03 \text{ mm}$ であり、薄膜の厚さ方向にはほぼ1結晶粒となっている。

薄膜の接着には常温試験に対しては瞬間接着剤(CC 15 A)、高温試験に対してはシリコン系の加熱硬化接着剤(SC 22)を用いた。

2.2 試験片および試験機 試験機は小野式回転曲げ疲労試験機(98 N·m)およびシェンク式繰返し曲げ疲労試験機(78 N·m)を用いた。

試験片には図2(a)、(b)に示す形状・寸法の試験片を用いた。試験片素材はそれぞれSK-3およびSK-5であり、熱処理は特に行っていない。図(a)はすべり発線発生限界応力の測定に用い、図(b)は表面粗さの測定に用いた。

2.3 すべり線発生限界応力の測定 図2(a)に示すテーパ付き試験片を用いて、従来の研究^{(1)~(3)}と同様、回転曲げ試験を行ってすべり線発生限界応力 σ_s を求めた。すなわち、すべり線発生限界位置を s 、その位置における試験片直径を d とするとき、限界応力 σ_s を次式で求めた。

$$\sigma_s = 32M/\pi d^3 \dots\dots\dots (1)$$

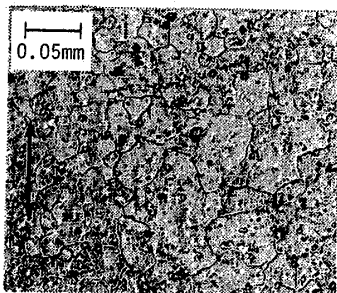


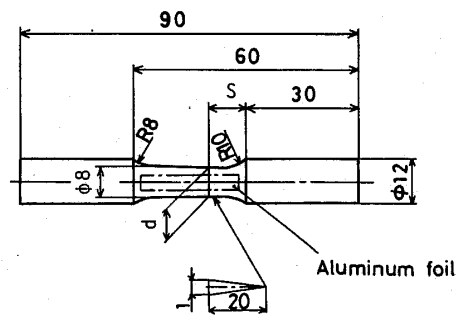
図1 供試アルミニウム薄膜の薄面内顕微鏡組織 (矢印は圧延方向を示す)

ここで、 M は曲げモーメントである。すなわち、 σ_s は薄膜に生じる応力でなく、試験片表面の応力とした。すべり線発生現象は薄膜に生じる繰返しひずみに支配されるため、薄膜固有の量とするためには限界ひずみまたは薄膜の限界応力で表すべきである⁽⁷⁾が、本研究では便宜上、負荷応力はすべて試験片表面の応力とした。なお、すべり線の発生は100倍の光学顕微鏡を用いて観察した。

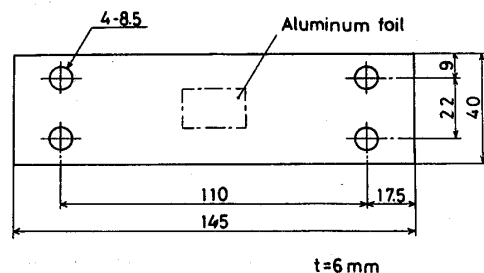
2.4 表面粗さの測定 疲労すべり線発生によるアルミニウム薄膜の表面粗さの変化は、アルミニウム薄膜を疲労ゲージとしてインプロセス計測しながら利用することを想定し、非接触タイプの粗さ計(ミットヨ製 サーフトスト 101)を用いて測定した。これは光接触式といわれる粗さ計であり、表面粗さと光の反射特性との間の関係を利用して粗さを測定するものである⁽⁸⁾。これによれば、薄膜表面をきずつけることなく、また被測定物を試験機から取り外すことなく、直径1.5 mmの円形領域の中心線平均粗さ R_a を測定できる。また比較のため、触針式粗さ計(Hommel tester T 6 D)をも使用した。薄膜の表面粗さの増加特性の検討は、図2(b)に示す平板試験片の中央部に薄膜を接着し、繰返し平面曲げ試験により行った。

3. 実験結果および考察

3.1 すべり線発生限界応力曲線に及ぼす繰返し速度の影響 図3に繰返し速度 $f=2$ および60 Hz



(a) 回転曲げ用



(b) 繰返し平面曲げ用

図2 試験片の形状・寸法

における疲労すべり線発生の限界応力 σ_s と繰返し数 N との関係 (σ_s - N 曲線) を示す。図において試験時間の点から、 $f=60$ Hz の場合には繰返し数の下限を $N=10^4$ としたが、 $f=2$ Hz の場合には下限を $N=10^3$ 程度にすることも可能である。しかし、 $N < 10^3$ では発生するすべり線が 100 倍程度の光学顕微鏡では判別しにくくなる程度に微細かつ不鮮明になり、実用上の観点から、 $N \geq 10^3$ とする必要がある。なお繰返し速度の相違によるすべり線の発生状況の差異は認められなかった。 $10^4 \leq N \leq 10^7$ の範囲では σ_s - N 曲線の傾きが比較的小さく、このような範囲ですべり線発生の有無に着目して応力測定を行う場合には、測定可能な応力範囲はかなり狭いといえる。

図 4 には限界応力に及ぼす繰返し速度の影響を示す。図 3 および 4 からアルミニウム薄膜の場合、すべり線発生に及ぼす繰返し速度の影響はほとんど認められない。また、限界応力はニッケル薄膜⁽³⁾のその約 1/2、また銅薄膜⁽²⁾のそれと同程度であり、ひずみ感度が高いことがわかる。

再結晶集合組織に起因する薄膜の異方性の有無を限界応力の点から検討するために、あらかじめ、圧延方向を試験片の軸方向に一致させた場合および軸方向に直交させた場合について限界応力を求めた。この結果、限界応力の差異は全く認められず、本実験で用いた薄膜には、少なくとも面内の異方性はないと確認された。本研究において、3・1 および 3・2 節では、薄膜の圧延方向と応力の主軸方向 (試験片軸方向) とが平行となるように、また 3・3 節以降では直交するように接着した。

3・2 すべり線発生の限界応力に及ぼす試験温度の影響 小野式回転曲げ疲労試験機に電気炉を取付けて、高温下で限界応力 σ_s を求めた。図 5 に種々の温度における σ_s - N 曲線を示す。接着剤の性能の点から試験温度の上限は 400°C であったが、実験した温度範囲

では限界応力は温度上昇とともに低下すること、温度依存性はかなり小さいことなどがわかる。また、この温度範囲では、すべり線の観察を阻害する酸化は全く認められなかった。これはアルミニウム表面には極めて薄く緻密なアルミナ皮膜が形成される⁽⁹⁾ためと考えられる。したがって以上の結果から、アルミニウム薄膜疲労ゲージは広い適用温度範囲を有するといえる。

3・3 繰返し応力による表面粗さの誘起現象

図 2 (b) に示す試験片にアルミニウム薄膜を接着し、繰返し平面曲げの負荷を与えた。一定応力振幅のもとで繰返し数を増加すると、図 3 に示した σ_s - N 曲線に達したとき、主応力軸に対し最もすべりやすい方位を持つ結晶粒にまずすべり線が発生する。繰返し数をさらに増加すると、図 6 に示すように、これらのすべり線が明確になるとともにそのほかの結晶粒にもすべり線が発生するようになる。この疲労すべり線は光学顕微鏡で明りょうに識別できる。したがって、このことおよび前節までの結果から明らかなように、従来報告されている金属薄膜の初期疲労すべり線の発生の有無を尺度とする応力測定法⁽¹⁾⁻⁽³⁾と同様な応力測定が可

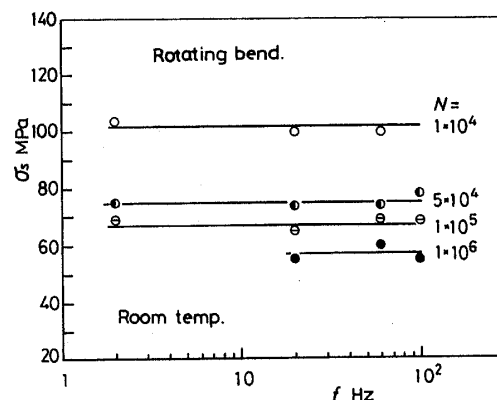


図 4 すべり線発生の限界応力に及ぼす繰返し速度の影響

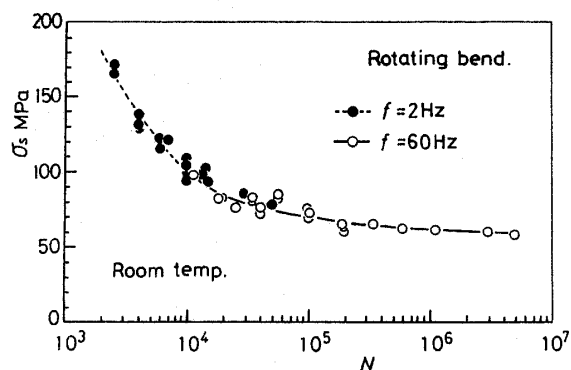


図 3 すべり線発生の限界応力曲線

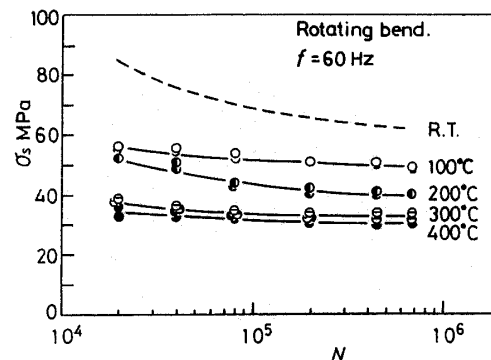


図 5 限界応力に及ぼす温度の影響

能であると考えられる。また、ニッケル薄膜で行われているようなすべり線の発生密度に着目した標準写真法⁽⁹⁾も可能になるものと考えられる。しかしながら、前者の方法をとる場合には、図3または5から明らかなように、 σ_s-N 曲線の傾きが比較的小さいため測定できる応力の範囲が小さい欠点を伴う。したがってこの場合には、純鉄薄膜で行われたような結晶粒径変化によるひずみ感度調整法⁽¹⁾が必要になる。しかし、応力測定に必要な繰返し数は前述したように $N \geq 10^3$ であれば十分であり、格段に少ない繰返し数で応力測定が可能になるといえる。なお、図6を含めすべての図中に示した応力 σ は、試験片表面に生じる応力を示す。

ところで、疲労すべり線の発生にともない表面粗さが増加することはよく知られた現象である⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。アルミニウム薄膜の場合には、前節で述べたように限界応力が著しく低くすべり線の発生が著しいので、ニッケル薄膜または純鉄薄膜を利用した応力測定法が適用されるような応力レベルでは、表面粗さの増加が期待できる。そこで本研究では、表面粗さを尺度とした応力測定法の可能性を以下で検討することにする。

図7(a)および(b)に、それぞれ走査形電子顕微鏡による薄膜表面の観察結果および触針式粗さ計による

断面曲線を示す。図から、表面の凹凸は結晶粒内に生じたすべりの段よりも、むしろ結晶粒を単位として生じる表面の段に起因していることが認められる。このことは、アルミニウム板の静的引張りにおける表面粗さの形成に対するすべり線自身の凹凸の寄与は小さい⁽¹²⁾ことと類似している。

銅の低サイクル疲労において、隣接結晶粒間のすべりの不均一性に起因して結晶粒表面に垂直な変位を生じ、この段のところにき裂が発生することが報告されている⁽¹³⁾。すなわち、低ひずみ振幅下の高サイクル疲労では、固執すべり帯が形成されるように結晶粒内でひずみは不均一であるのに対し、高ひずみ振幅下の低サイクル疲労では結晶粒内のひずみは均一であるが、隣接結晶粒におけるすべり方位の相違に起因して、ひずみの不適合が生じる。この結果、隣接結晶粒との間に凹凸が生じる。本実験ではアルミニウム薄膜に与えられる応力は、その耐力よりかなり高い値となっており、高ひずみ振幅疲労をうけているものと考えられる。したがって、上述の点を考慮すればアルミニウム薄膜の粗さは主として結晶粒ごとに生じる段の大きさに支配されていると見て差支えないものと考えられる。

3・4 繰返し応力による表面粗さの変化 図8に

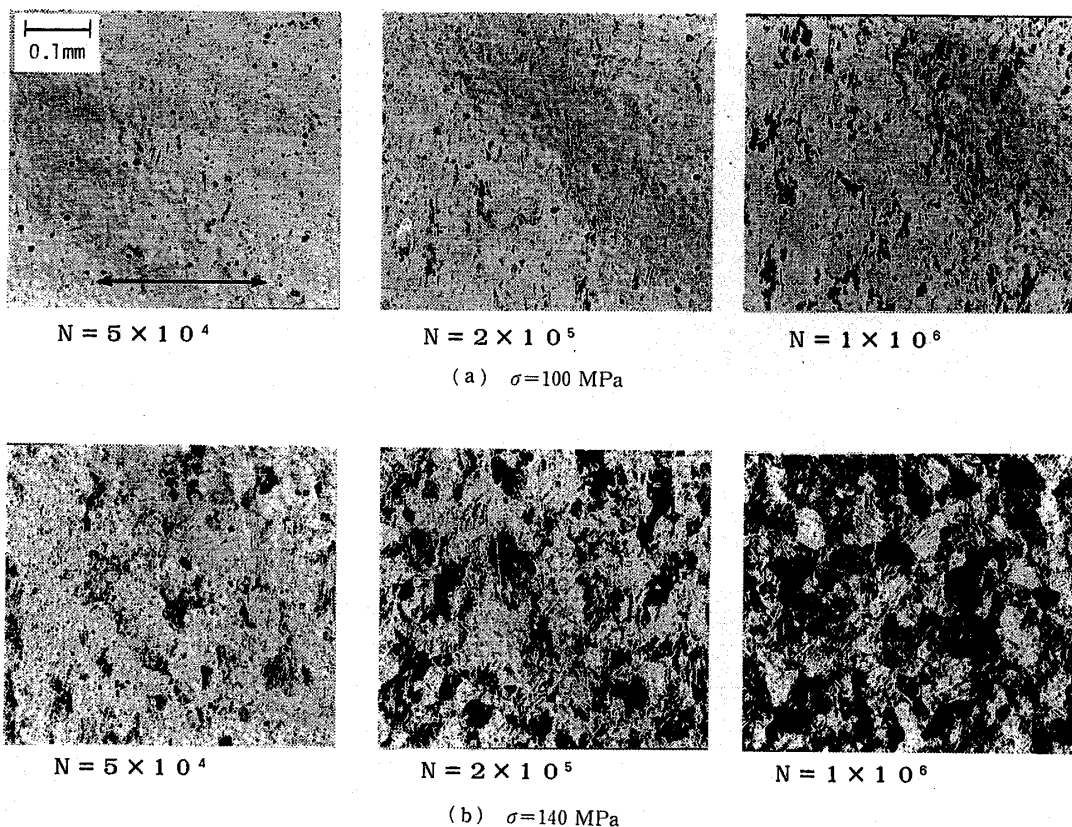
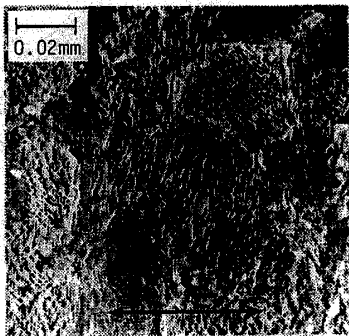


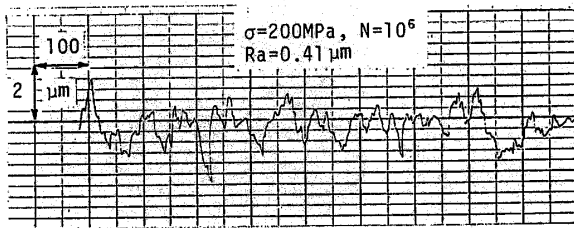
図6 すべり線の発生状況(矢印は試験片軸方向を示す)

種々の一定応力下における表面粗さの変化の様子を示す。粗さを表す量として、本研究では中心線平均粗さ R_a を用いた。図の実験点は測定箇所5点の平均を示す。図から繰返し数の増加に伴い R_a が増加すること、応力が高いほど R_a は大きくその増加率も大きいことなどが認められる。図9に作用した応力と R_a との関係を示す。図から応力の増加に伴う R_a の増加が顕著であり、表面粗さに及ぼす繰返しひずみの影響が大きいことが認められる。なお、表面粗さはいずれの場合も応力の主軸方向に測定したが、軸方向および軸に直交する方向のいずれの場合も R_a はほぼ同じであることを確認している。ただし凹凸による光の反射特性は前者と後者では異なっていた。

3.5 表面粗さの測定精度 表面粗さは測定箇所によりばらつきが大きいことが一般に知られている。そこで本実験の場合における粗さのばらつきの程度を調査し、粗さを尺度とした応力測定法の測定精度について検討を加えた。図10に測定箇所20点のデータの平均値 \bar{R}_a と標準偏差 S_R を示す。図において、 S_R の表示がない点は図示できないほど S_R が小さいことを示す。図11に、 \bar{R}_a と変動係数 $\eta = S_R/\bar{R}_a$ との関係を示す。これらの図から、粗さの増加に伴って標準偏差が増加するが、平均値に対する標準偏差の割合は約5%であることがわかる。すなわち、 R_a のばらつきは



(a) 走査形電子顕微鏡写真 (矢印は試験片軸方向を示す)



(b) 断面曲線(試験片軸方向にトレース)

図7 アルミニウム薄膜の疲労すべり変形による表面粗さの誘起 ($\sigma = 200 \text{ MPa}$, $N = 10^6$)

かなり小さいといえる。これは本研究で測定している粗さが直径1.5mmの円形領域内の平均された値であるためと考えられる。また、 R_a が小さい領域で η が大きくなる傾向が認められる。これは供試薄膜の粗さが $R_a = 0.07 \mu\text{m}$ であり、この領域ではすべり変形が軽微であることなどに起因するものと考えられる。本研究では特に記述しない限り測定点5箇所の平均を R_a と記している。

図12は、本実験で用いた非接触式の粗さ計による粗さ計測の妥当性を、触針式の粗さ計で測定した値と比較して示したものである。図から明らかなように、 $R_a = 0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ の範囲で非接触式粗さ計によるデータは触針式粗さ計による値とよく一致し、本方法が疲労すべりによる表面粗さに対し十分な精度で適用可能であることが確認された。

3.6 繰返し応力による表面粗さ誘起モデルによる検討 Differtら⁽¹⁴⁾は、コンピュータ・シミュレーション

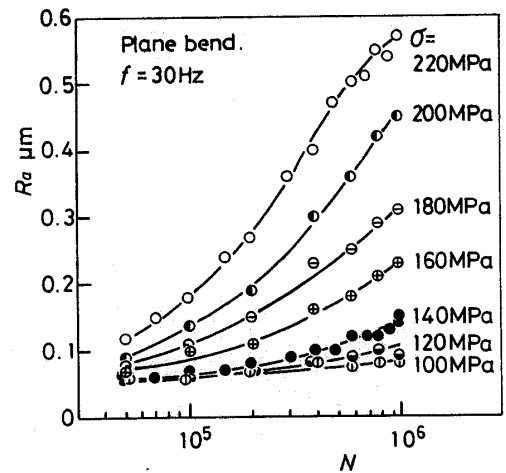


図8 疲労すべり変形による中心線平均粗さ R_a の増加

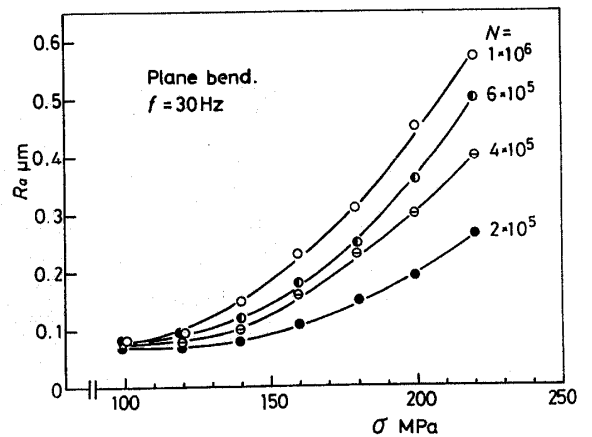


図9 R_a と作用応力との関係

オンにより、ランダムに分布した転位の非可逆な前後運動による表面の起伏の生成を求めている。その結果によれば、粗さをバーガースベクトル b に平行な最大の正・負変位の差 w で表し(図13)、その平均を \bar{w} とするとき次式で表されるとしている。

$$\bar{w} = \sqrt{6nbh\rho N\gamma_{pl}} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 n は転位の数、 b はバーガースベクトル、 h はすべり領域の幅(固執すべり帯の厚さ)、 N は繰返し数、 γ_{pl} は固執すべり帯中の塑性せん断ひずみ振幅である。この結果から、 \bar{w} は繰返し数 N の1/2乗に比例することがわかる。そこで図8の結果を $N^{1/2}$ について整理した結果を図14に示す。図7に示したように表面の凹凸は主として結晶粒単位で生じており、Differtらが上式を導いた際のモデルとは異なるが、図14から明らかなように、この場合にも R_a は $N^{1/2}$ にほぼ比例することが認められる。すなわち、 R_a の増加に対する実験式として次式がほぼ成立するといえる。

$$R_a = kN^{1/2} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 k は負荷応力 σ の関数である。 k の関数形を

実験的に決定できれば、式(3)に基づき N を指定して R_a から σ を求めることができる。すなわち、この方法によればひずみゲージまたは疲労ゲージとしての利活用が原理的に可能となる。この利活用に関する検討は次報にゆずる。

3.7 等粗さ曲線 種々の値の繰返し応力および

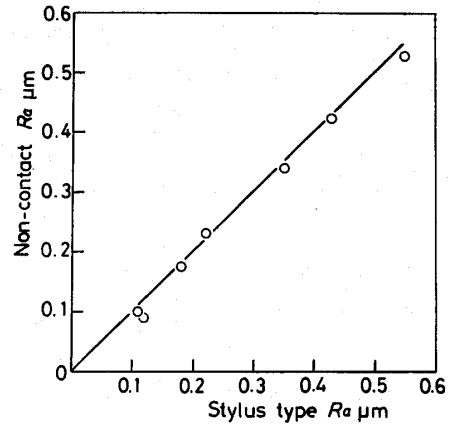


図12 光ファイバによる非接触式粗さ測定値と触針式粗さ測定値との関係

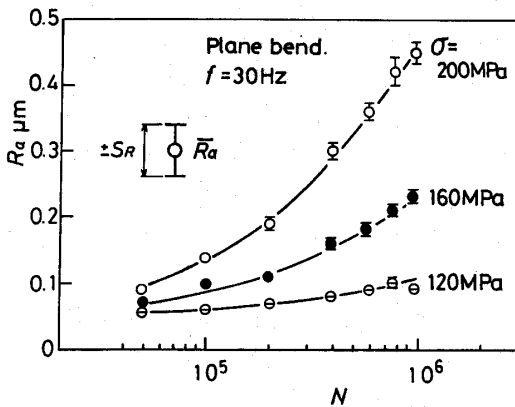


図10 繰返し数の増加に伴う R_a およびばらつきの変化

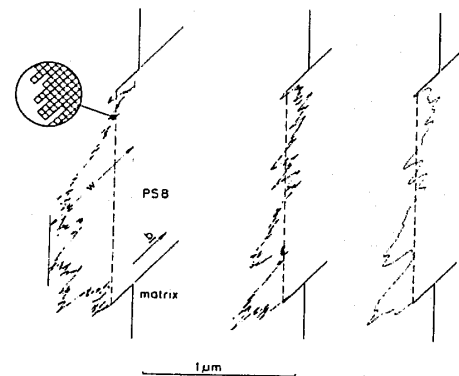


図13 シミュレーションにより形成された表面形状⁽¹⁴⁾

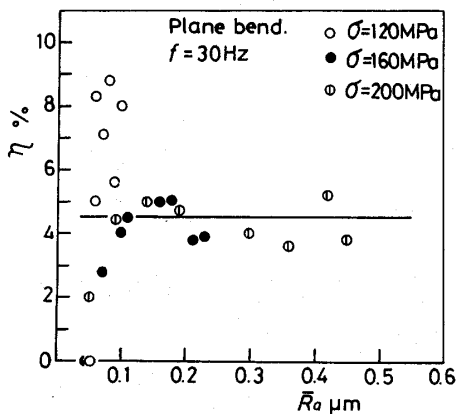


図11 粗さ計測における平均値 R_a と変動係数 η との関係

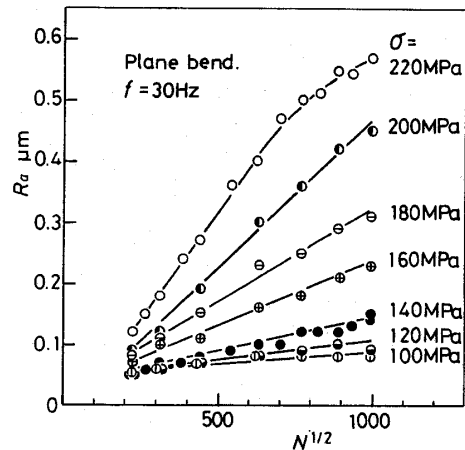


図14 繰返し数の増加に伴う R_a の増加

繰返し数に対して R_a が一定の点を結んだ等粗さ曲線を図15に示す。疲労すべり変形の結果生じる結晶粒界の段が一定値に達すると段部にき裂が発生する⁽¹³⁾という報告を考慮すれば、薄膜に生じる疲労被害を表面粗さを尺度として測定することもできる。このような考え方に立てば等粗さ曲線を等被害曲線とも解釈することができる。等粗さ曲線は、図3の σ_s-N 曲線と同様、右下がりの曲線となっている。したがって、式(3)のような関数形がわからない場合でも、あらかじめ図15のようなアルミニウム薄膜の等粗さ曲線を求めておき、これをアルミニウム薄膜疲労ゲージに固有な較正曲線とすれば、銅めっき応力測定法における標準写真法⁽¹⁵⁾と同様、繰返し数を規定し、粗さを測定することにより応力を求めることが可能になるといえる。

3・8 表面粗さを尺度とする疲労ゲージの測定精度について 3・5節で示したように、粗さ測定において生じるばらつきは約5%である。粗さに基づく応力測定法において、測定精度に及ぼす因子としては種々あるが、粗さ測定時に生じる誤差を第一因子として考える必要がある。そこで、この点を以下に検討する。粗さ R_a を負荷応力 σ の関数として次式で表す。

$$R_a = R_a(\sigma) \dots \dots \dots (4)$$

このとき次式が成り立つ⁽¹⁶⁾。

$$\frac{S_R}{R_a} = \left(\frac{dR_a}{d\sigma} \cdot \frac{\sigma}{R_a} \right) \cdot \frac{S_\sigma}{\sigma} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 S_R および S_σ はそれぞれ粗さ R_a および応力 σ における標準偏差である。 σ に及ぼす R_a の誤差の影響を示すため上式を書き直せば次式となる。

$$\frac{S_\sigma}{\sigma} = \psi \cdot \frac{S_R}{R_a} \quad \text{ただし} \quad \psi = 1 / \left(\frac{dR_a}{d\sigma} \cdot \frac{\sigma}{R_a} \right) \dots \dots \dots (6)$$

式(4)を3次の多項式で近似し、上式の係数 ψ および

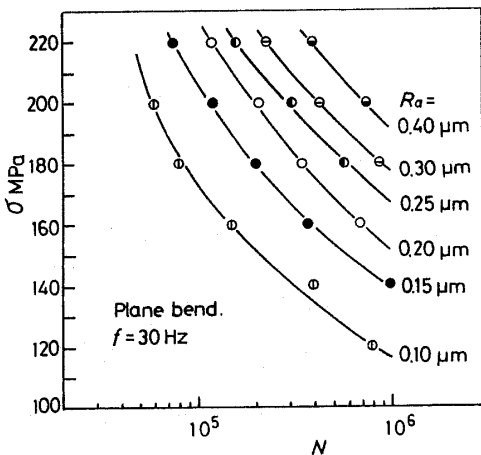


図15 等粗さ曲線

$S_R/R_a=5\%$ とした場合の S_σ を表せば図16となる。図から粗さのばらつきを5%と見積もった場合、応力の誤差はせいぜい5MPaである。この結果から、本法の測定精度はかなり高いことが確認された。

4. 結 言

アルミニウム薄膜に生じる初期すべり線発生現象の繰返し速度および温度依存性を調査し、アルミニウム薄膜のすべり線発生現象を利用したひずみゲージの特徴について検討した。また、疲労すべり変形に起因する表面粗さ変化の特性を調査するとともに、粗さを尺度とする疲労ゲージの利用の可能性について検討した。得られた結果を要約すれば以下ようになる。

(1) アルミニウム薄膜に発生する疲労すべり線は光学顕微鏡で明確に識別される。したがって、アルミニウム薄膜は、初期疲労すべり線発生現象に基づき、純鉄薄膜またはニッケル薄膜を利用したひずみゲージと同様な手法で、ひずみゲージとして利用可能となるものと考えられる。

(2) アルミニウム薄膜における疲労すべり線発生現象に及ぼす繰返し速度の影響は、ほとんど無視できるほど小さい。また、試験温度の影響はかなり小さいとともに、400°Cまでは酸化がほとんど認められない。したがって、このことはひずみゲージとして実際に応用する場合に有利となる。しかしながら、 σ_s-N 曲線の傾きが小さいため、測定できる応力範囲は比較的狭く、結晶粒径を変化させるなどのひずみ感度調整法が必要になる。

(3) すべり変形に起因する表面粗さの応力および繰返し数依存性は顕著であり、粗さを尺度とした応力測定法が原理的に可能である。すなわち、アルミニウム薄膜疲労ゲージの利活用の可能性が確認された。この場合に、光の反射特性の変化を利用した非接触式の粗さ計は、実機における応力のインプロセス計測に有

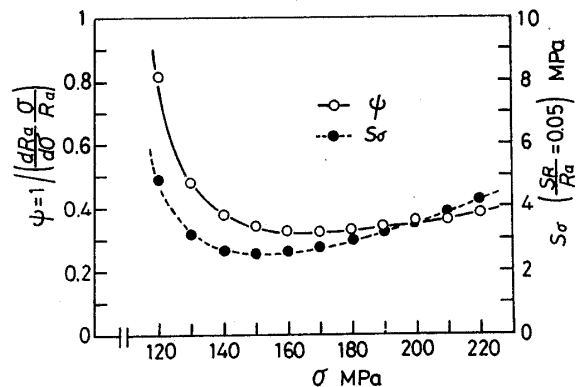


図16 応力測定におけるばらつき

効になるものと考えられる。

(4) この応力測定法では、供試薄膜の等粗さ曲線をあらかじめ求めておき、これを薄膜に固有な較正曲線とし、応力測定時には繰返し数を規定する方法をとる。

(5) アルミニウム薄膜疲労ゲージは、指定する繰返し数にも関係するが、 $N \geq 10^6$ を採用すれば、100 MPa以上の振幅の応力を測定できる。この場合の測定精度は約5 MPaである。

本研究に用いたサーフ・テスト101は(株)ミットヨから提供していただいた。計測技術研究所の太田成賢主任研究員ならびに深津拓也の両氏に感謝申し上げる。また、試験片の製作等に磯谷章技官の助力を得た。記して謝意を表す。

文 献

- (1) 北岡・ほか2名, 機論, 46-412, A(1980), 1450.

- (2) 北岡・長瀬, 機論, 50-451, A(1984), 456.
 (3) Seika, M. and Hosono, K., *Proc. VI Inter. Congr. Exp. Mech.*, 1(1988), 485.
 (4) 例えば, 佐賀・ほか2名, 材料, 26-282(1977), 289.
 (5) 長瀬・ほか2名, 機論, No. 883-2(1988-7), 4.
 (6) 長瀬・泉沢, 機論, 55-517, A(1989), 2014.
 (7) 北岡・ほか2名, 機論, 47-415, A(1981), 275.
 (8) Sawabe, M., ほか3名, *Proc. Int. Symp. Metro. Qual. Cont. Product.*, (1984), 105.
 (9) 例えば, 日本機械学会編, 機械工学便覧, B4(1987), 72.
 (10) Mughrabi, H., ほか3名, *ASTM STP*, 811(1983), 5.
 (11) 金多・ほか2名, X線材料強度に関するシンポジウム, 21(1984-7), 144.
 (12) 河合・ほか2名, 機論, 51-468, C(1985), 2100.
 (13) Kim, W. H. and Laird, C., *Acta Met.*, 26(1978), 777.
 (14) Differt, K., ほか2名, *Phil. Mag.*, 54-2(1986), 237.
 (15) Okubo, H., *Memoirs Fac. Eng., Nagoya Univ.*, 20-1(1968), 1.
 (16) 例えば, 日本機械学会誌, 計測の不確かさ, (1987), 47, 丸善.

討 論

〔質問〕 越智保雄〔電気通信大学〕

以下の3点についてご教示願いたい。

(1) すべり線発生の限界応力の定義であるが、すべり線が発生したかどうかの判断は困難で、測定手段によっても大きく変わるため、本報で述べている測定方法のみでは限界応力の定義はあいまいなものとなるのではないか。

(2) 用いたアルミニウム膜は $d=0.03$ mm, 板厚方向に1結晶粒としているが、ゲージとしての感度、精度と d , 板厚との関係はどのようになるのか。

(3) アルミニウム膜の大きさは本報では不明であるが、図2より推定するとかなりの寸法と思われる。本報の大きさの試験片での使用には十分ではあると思うが、実機や実材料で被害が微小欠陥や介在物など局所的となる場合に、本方法を疲労ゲージとして使用することの可能性はいかがか。

〔回答〕 (1) すべり線発生の限界を厳密に定義するのは困難であり、用いた顕微鏡の倍率に依存するものと考えられる。本研究では、すべり線の発生の限界として、便宜的に倍率100倍の光学顕微鏡で識別できるか否かを基準としているが、この基準に基づいた限界応力のばらつきは極めて小さいことを確認している。一方、倍率と限界応力値との関係などを調査しておくことが必要であるが、以下のような理由から、上

述した基準ですべり線の限界を観測している。すなわち、倍率を増加すれば、より軽微なすべり線が検出できるようになるため、限界応力が低下するが、反対に顕微鏡視野が狭くなる。顕微鏡視野と結晶粒径との相対的な寸法が問題であるが、このような場合、一般にすべり線の観察および限界位置の決定が次第に困難となってくる。すなわち、すべり線の初生を尺度とする方法ではすべり線の検出の容易さも重要であるため、実用的なすべり線の検出感度として100倍を用いた。

(2) アルミニウム薄膜の表面粗さを尺度とするひずみゲージあるいは疲労ゲージにおいて、薄膜の結晶粒径、厚さおよび両者の比は、ひずみ感度および精度を左右する主要な因子であると考えられる。この点については、現在研究が進行中であり、次報で報告させていただく。また、すべり線の初生に注目する方法におけるひずみ感度などに及ぼすこれらの因子の影響については、純鉄薄膜を用いた実験から、結晶粒径が大きくなるに従って限界応力が低下するなどの若干の結果が得られている⁽¹⁾。

(3) 表面粗さおよびすべり線の初生のいずれを尺度とする方法においても、これらの測定対象領域が結晶粒径に比較して十分大きいことが、測定精度の点から必要である。したがって、微小欠陥の近傍などの応力こう配が顕著である部分の応力測定には、適用の限

界が存在すると考えられる。しかしながら、表面粗さを尺度とした場合には、直径が1.5 mmの円形領域がその測定対象領域で、これがゲージ長に相当し、このゲージ長は比較的短いといえる。一方、本方法は二次

元的な応力測定が可能であることなどの特徴を有しているが、ご指摘の点はその適用限界に関連する基礎的な事項であるので、(2)で述べた検討の結果に基づいて、今後明らかにしたいと考えている。

55巻518号, A編(1989-10) 正誤表

執筆者名	ページ	欄	行	誤	正
戸田裕己ほか	2181	左	1	変化は…	図10に見られるように150 MPaの応力による音速変化は…