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 5 報, 振幅および平均応力が変動する場合の粗さ増加)

長瀬 康男^{*1}, 沢木 洋三^{*1}, 吉田 始^{*1}

Fatigue Gauge Utilizing Slip Deformation of Aluminum Foil (5th Report, Controlling Parameter of Surface Roughening under Variable Stress)

Yasuo NAGASE, Yozo SAWAKI and Hajime YOSHIDA

The surface roughening phenomenon of aluminum foil is examined under variable stress, and the controlling parameter that dominates the roughness is clarified. It is found that constant mean stress does not affect surface roughness. When mean stress varies, however, mean stress causes surface roughening. In such a case, the range-pair counting method is appropriate, and the equivalent stress represented by $(\sum \sigma_i^2 N_i / \sum N_i)^{1/\alpha}$ dominates surface roughness, where σ_i and N_i are stress amplitude and the number of stress cycles counted by the range-pair method, and α is a material factor. It is concluded that the fatigue gauge made of aluminum foil can evaluate the equivalent stress with high accuracy.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Fatigue, Service Load, Surface Roughness, Range-Pair Counting Method, Monitoring

1. 緒 言

アルミニウム薄膜に繰返し応力(ひずみ)が負荷されると, 疲労すべり変形によって薄膜表面の粗さが増加する。著者らは, これを利用することによって, 材料に負荷された応力(ひずみ)の測定が可能であることを明らかにした⁽¹⁾。すなわち, 被測定物に接着されたアルミニウム薄膜の粗さ増加を測定することにより, 一定振幅応力下では応力(ひずみ)振幅が求められ, ひずみゲージとして利用できること⁽¹⁾⁻⁽³⁾, また変動振幅応力下ではそれと同じ粗さをもたらす一定応力振幅(これを等価応力と言う)が存在し, いわゆる疲労ゲージとして利用できること⁽⁴⁾を明らかにした。

しかし, この等価応力の考え方⁽⁴⁾は応力振幅のみが変動する条件下で得られたものであった。実際に機械・構造物の受けるランダム荷重は, 応力振幅のみならず, 平均応力も変動する広帯域ランダム荷重であることが一般であるから, このような場合における粗さ増加に対しても等価応力の考え方が妥当なものであるかを明らかにしておく必要がある。

そこで, 本研究では, 応力振幅のみならず平均応力

も変動する条件下で薄膜表面粗さ増加特性を調査し, 粗さ増加に荷重履歴の影響がないと仮定して前報で提案した等価応力⁽⁴⁾ならびに応力計数法について検討した。

2. 実験方法

2.1 疲労試験片および試験機 疲労試験片は, 前報⁽⁴⁾と同様の正方形断面を持つ引張・圧縮形試験片とした。疲労試験は引張・圧縮形の電気油圧式疲労試験機(30 Hz)を使用し, 変動振幅荷重試験には, プログラム式関数発生器を装備して室温大気中で実験を行った。

2.2 アルミニウム薄膜 用いたアルミニウム薄膜も, 前報⁽⁴⁾と同一の JIS IN 30-O (厚さ 15 μm) である。薄膜の接着にはひずみゲージ用瞬間接着剤を用い, 薄膜の圧延方向と第 1 主応力方向とが直交するように接着した⁽¹⁾。

薄膜の表面粗さは, 前報までと同様, 非接触式の粗さ計(ミツトヨ製サーフテスト 101)を用いて測定した。

2.3 疲労ゲージ定数 既に報告⁽³⁾したように, アルミニウム薄膜疲労ゲージの一定応力振幅下での等粗さ曲線および粗さ増加特性は, それぞれ次のように

* 原稿受付 平成 3 年 4 月 1 日。

^{*1} 正員, 静岡大学工学部 (〒432 浜松市城北 3-5-1)。

表される。

$$\sigma^a \cdot N = C(R_a) \dots\dots\dots (1)$$

$$R_a = \sigma^{a/2} N^{1/2} / k_o + m \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 σ は繰返し応力振幅、 N は繰返し数、また $C(R_a)$ は中心線平均粗さ R_a のみの関数である。また a 、 k_o および m はアルミニウム薄膜固有の値であり、これを疲労ゲージ定数と呼ぶことにする。本実験で用いた薄膜の場合、これらゲージ定数は $a=7.59$ 、 $k_o=9.42 \times 10^{11}$ および $m=0.066$ である⁽⁴⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 一定の平均応力の影響 まず、すべり変形に起因するアルミニウム薄膜の表面粗さに平均応力が影響を及ぼすか否かについて調べた。

応力振幅 σ_a を 180 MPa と一定とし、平均応力 σ_m を +180, 0 および -180 MPa と変えた場合の粗さ R_a と繰返し数 N との関係を図 1 に示す。図中の実線は、 $\sigma_m=0$ の結果を示す。図から明らかなように、粗さに及ぼす平均応力 σ_m の影響は認められない。このことは、疲労すべり変形が主として応力振幅に支配され、平均応力にはほとんど影響を受けないことを示しており、例えば純鉄の疲労すべり線の発生に平均応力の影

図 1 粗さに及ぼす平均応力の影響

図 2 平均応力が正弦波状に変化する変動応力

響が現れないこと⁽⁵⁾と類似の現象である。

3.2 平均応力が正弦波状に変化する場合 次に、平均応力も変動する場合について検討した。すなわち、図 2 に示すように、応力振幅 σ_2 で変動する応力 1 サイクル ($=N_2$) 中に振幅 σ_1 なる応力 (30 Hz) が $N_1=8$ サイクル重ね合わされた変動荷重が繰返し (N_B 回) 負荷される場合の粗さ増加を調査した。

このように、応力振幅ならびに平均応力ともに変動する場合、応力波形の計数方法が種々提案されている。前節の結果より平均応力の影響は無視してよいことがわかったので、以下においては、レンジペア法、ピーク法およびレンジ法を取り上げることにした。

まず始めに、 $\sigma_1=140$ MPa の一定値とし、 σ_2 を 63, 96 および 125 MPa と変えた場合の薄膜表面粗さ増加を調べた。この結果を図 3 に示す。繰返し数 N としては、 $N = \sum N_i = N_B(N_1 + N_2) = 9N_B$ とした。ここで N_B は、図 2 に示す 1 サイクル (1 ブロック) を単位とする繰返し数である。応力振幅 σ_1 のみが変動する場合には、薄膜の表面粗さの点から提案された等価応力 σ_{eq} ならびに粗さ増加はそれぞれ次式⁽⁴⁾で与えられる。

$$\sigma_{eq} = \left(\sum \sigma_i^a N_i / \sum N_i \right)^{1/a} \dots\dots\dots (3)$$

$$R_a = \sigma_{eq}^{a/2} \left(\sum N_i \right)^{1/2} / k_o + m \dots\dots\dots (4)$$

そこで、まずレンジペア法で計数された応力振幅 σ_i および繰返し数 N_i に基づいて、式 (3) より、等価応力 σ_{eqRP} を計算した。計算された等価応力を式 (4) に用いて表される粗さ増加曲線を図 3 中に実線で示した。実験結果は、いずれの場合にもこの曲線とかなり良く一致していると言える。

また、ピーク法およびレンジ法によって計数された

図 3 平均応力が正弦波状に変化する変動応力下での粗さ増加

結果から式(3)より求められた等価応力 σ_{eqP} および σ_{eqR} の値を図中に示した。前者では、応力を過大に評価し、後者では、過小評価となっている。特に、後者の場合、小さい振幅のみを計数しているため⁽⁶⁾と考えられる。

以上の結果から、変動応力下における応力波形の計数法としてレンジペア法が優れており、これに基づいて計算される等価応力が、粗さ増加挙動を良く説明し得ることが明らかとなった。

次に、レンジペア法によって求められる等価応力の妥当性をさらに詳細に調査するため、次のような実験を行った。すなわち、図2に示す変動応力において、レンジペア法より求められる等価応力 σ_{eqRP} はすべて一定の値 180 MPa となるが、 σ_1 は 60, 100, 140 MPa, σ_2 はそれぞれ 180, 140, 96 MPa と異なる条件のもとで粗さ増加を調べた。この結果を図4に示す。図中の実線は、 $\sigma_{eqRP}=180$ MPa として計算される式(4)の結果である。図3と同様、実験点はほぼこの曲線で表され、レンジペア計数結果に基づいた等価応力の考え方が妥当であることを示している。詳細にみると、 $\sigma_1=60$ MPa の場合にはこの曲線からのずれが大きい。

図4 等価応力 σ_{eqRP} 一定の場合の粗さ増加

図5 平均応力がく形波状に変化する変動応力

応力振幅 60 MPa は、ここで用いたアルミニウム薄膜では、粗さ増加を生じない応力⁽⁴⁾である（これを過小応力と呼ぶ）。変動応力成分の中にこのような過小応力が含まれる場合の粗さ増加は、等価応力のもとで予想されるそれよりも著しい⁽⁴⁾ためと考えられる。

以上の結果から、平均応力が正弦波状に変化する場合、粗さ増加を支配する応力の計数法としてレンジペア法が適当であって、これより求められる等価応力が粗さ増加を良く説明し得ることが明らかにされた。

3.3 平均応力がく形波状に変化する場合 次に、平均応力がく形波状に変化する場合について検討した。図5に変動サイクルの1ブロックを示す。振幅 σ_2 でく形波状に変動する応力（平均応力）1サイクル（= N_2 ）中に、 σ_1 なる振幅の応力（30 Hz）が N_1 サイクル重畳されている。

応力振幅 σ_1 は一定（=140 MPa）， $N_1=10$ として、平均応力振幅 σ_2 を変化（68～132 MPa）させて、粗さ増加を調べた。この結果を図6に示す。レンジペア法から計算される等価応力 σ_{eqRP} は、160, 180 および 200 MPa であって、式(4)より計算された粗さ増加曲線を図中に実線で示した。いずれの場合にも、実験点とかなり良く一致していることがわかる。ただし、高繰返し数域では実験点が実線に比較して高粗さ側に位置する傾向が認められる。これは実験式(2)の適用範囲が $220 \text{ MPa} \geq \sigma \geq 140 \text{ MPa}$ であるのに対し、これらの図では最大応力が 220 MPa 以上となっていることなどが原因と考えられる。

図7(a)および(b)は、それぞれ一定応力振幅下および平均応力がく形波状に変動する場合の薄膜表面の様子の電子顕微鏡写真を示す。図(a)および(b)とも

図6 平均応力がく形波状に変化する変動応力下での粗さ増加

に、等価応力 σ_{eqRP} が等しく ($=180$ MPa), かつ同じ繰返し数の時のものである。図から、両者の間に特にきわだった相違は認められず、いずれも主として結晶粒径程度のオーダの凹凸となっていることがわかる。

式(3)および(4)からわかるように、応力振幅 σ_i とその繰返し数 N_i は $\sigma_i^2 N_i$ なる形で表面粗さに影響を及ぼす。すなわち、 σ_i と N_i はこの関係を通して等価な関係にある。そこでこの点をさらに詳細に検討するため、 σ_{eqRP} を一定に保ちながら、 σ_i を変化させた場合 (N_i 一定) および N_i を変化させた場合 (σ_i は一定となるが σ_2 は変化) について粗さ増加を調査した。

図8(a)は前者に相当し、 σ_1 を 140, 100 および 60 MPa と変え、同時に σ_2 を 102, 147 および 187 MPa にして、 σ_{eqRP} を 180 MPa の一定に保った場合の結果である。ただし $N_1=10$ とした。図中の実線は、等価応力のもとでの粗さ増加曲線の式(4)を示す。レンジペア法で計数された応力振幅 $\sigma_1 + \sigma_2$ がいずれの場合にもほぼ等しくなったために、上述の点を明確にはできないが、実験点は実線と比較的よく一致していると言える。しかし、実験点は曲線と比較して、高繰返し数域でやや高めになる傾向や、 $\sigma_1=60$ MPa の場合に低繰返し数域で実線をやや下回る傾向がみられる。

一方、 $\sigma_1=140$ MPa と一定に保ち、 N_1 を変化 (10, 32, 106) させることにより等価応力を $\sigma_{eqRP}=160$ MPa と一定にした (σ_2 は変化) 場合の結果を図8(b)に示す。この場合には、応力のレンジペア $\sigma_1 + \sigma_2$ が広

範囲に変化するとともに、応力のレンジペア σ_1 の繰返し数 N_1 が広範囲に変化している。実線は、等価応力のもとでの粗さ増加曲線の式(4)を示す。図(a)と同様、実験点は低繰返し数域では実線とよく一致するが、高繰返し数域でやや高くなっている。図(b)の場合、レンジペア法では等しい計数結果となるが、応力振幅の最大値は異なり、これが大きい場合、すなわち $\sigma_1 + \sigma_2$ が大きい場合のほうが R_a が大きくなる傾向が認められる。

図8(a)および(b)を図6と比較すると、変動条件が広範囲にわたって変化すると、式(4)と実験点との一致が若干悪くなることがわかる。これは、応力と繰返し数の関係が $\sigma_i^2 N_i$ なる関係を通して必ずしも等価ではないか、または、粗さを支配する応力成分の計数法としてレンジペア法が完全ではないこと等を示唆している。

(a) σ_1 を変化, N_1 を一定

(b) σ_1 を一定, N_1 を変化

図7 アルミニウム薄膜に誘起した表面粗さ

図8 等価応力一定の場合の粗さ増加

3・4 変動様式の相違による影響 次に、変動様式の違いについて検討した。図9は、変動の様式は異なるが、レンジペア法で計数される結果は全く同一となるような変動荷重の例を示したものである。応力の計数法としてレンジペア法が適当であるのは、この方法が疲労損傷をもたらすと考えられる応力-ひずみヒステリシスループを計数することになっているからである⁽⁷⁾。すなわち、荷重履歴の影響がないと仮定すれば、図9に示すように、対応する応力-ひずみ関係は荷重様式に関係なく同一である。

この図9の条件のもとでの粗さ増加曲線を図10に示す。ただし、 $\sigma_1=140\text{ MPa}$ 、 $\sigma_2=100\text{ MPa}$ および1ブロック中の σ_1 の繰返し数 $N_1=32$ とした。図には等価応力 $\sigma_{eqRP}=160\text{ MPa}$ に対する式(4)も併記した。図から明らかなように、変動様式の相違に関係なくいずれの場合にも粗さはほぼ一致し、有意な差異はないことがわかる。この結果は、中炭素鋼の低サイクル疲労におけるヒステリシスループに関し、 $\sigma_1+\sigma_2$ に対するヒステリシスループはType Aの場合が最も大きくなるという研究結果⁽⁸⁾とは一致しない。しかし、本研究ではひずみ振幅が小さく、また薄膜はひずみ制御負荷を受けているので方向変形が生じないことなどのため、変動様式の影響が現れなかったためと考えられる。

図9 σ_{eqRP} が等しく変動様式が異なる応力

なお、一定振幅の場合に比較して高繰返し数域で実測される粗さが大きくなるという点は、前節で平均応力がく形波状に変化する場合に認められた傾向と同じである。

3・5 応力波形の影響 3・3および3・4節では、平均応力がく形波状に変化する場合を取り上げた。この場合に、レンジペア法で計数される応力振幅 $\sigma_1+\sigma_2$ が、式(3)の等価応力の支配成分となっている。この応力振幅はく形波であって正弦波ではない。しかし、この結果は、正弦波の等価応力振幅下での粗さ増加曲線と比較的に良く一致した。ただし、高繰返し数域で実測値が若干高めになっていた。

そこで粗さ増加に及ぼす応力波形の影響について検討した。代表的な波形として、正弦波、く形波および三角波を選び、これらの一定振幅応力のもとで粗さの変化を調べた。応力振幅 $\sigma=220\text{ MPa}$ 、繰返し速度 $f=3\text{ Hz}$ とした結果を図11に示す。図から、正弦波と三角波の間では波形の影響はほとんど認められないが、く

図10 変動様式が異なる応力下の粗さ増加

図11 種々の応力波形のもとでの粗さ増加

形波の場合に R_a が若干高くなる傾向が認められる。したがって、3・3 および 3・4 節で認められた一定振幅応力下での粗さに比較して実測値 R_a が高くなる傾向は、応力波形の影響も一因と考えられる。

3・6 変動振幅応力下における測定精度 変動応力下での本方法による等価応力測定精度について検討する。式(2)で示したように、粗さ R_a は応力振幅 σ の関数である。応力測定精度に影響を及ぼす因子は種々あると考えられるが、本方法で応力を求める場合に第1因子として考えなければならないのは、粗さ R_a における誤差である。 R_a から応力を求める場合の誤差については以下のように表すことができる⁽¹⁾⁽⁹⁾。

$$\frac{S_\sigma}{\sigma} = \psi \frac{S_R}{R_a} \quad \text{ただし} \quad \psi = 1 / \left(\frac{dR_a}{d\sigma} \cdot \frac{\sigma}{R_a} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで S_R および S_σ はそれぞれ R_a および σ の標準偏差である。式(2)を上式に代入して求めた誤差伝ばの係数 ψ を図12に実線で示す。

式(5)において S_R に R_a の95%信頼区間 ($\gamma=5\%$) を代入すれば応力の95%信頼区間 $\Delta\sigma_r$ が求められる。そこでまず一定振幅応力下における $\Delta\sigma_r$ を求めた。ただし一定振幅に対する前報⁽¹⁾の結果から、測定点20個に対する R_a の変動係数として $\eta=5\%$ を用いた。図中の破線は、応力の95%信頼区間 $\Delta\sigma_r$ を σ との比 $\Delta\sigma_r/\sigma$ として示したものである。このように、応力の95%信頼区間は約1%であり、一定振幅応力下では応力の測定精度が極めて高いことがわかる。

さらに、平均応力が正弦波状およびく形波状に変化する場合の実験データを用いて、測定された R_{an} から式(4)を用いて求められる等価応力 σ_{eq} と、式(3)で定義された等価応力 σ_{eq} との偏差 $\Delta\sigma_{eq}$ を求めてみた。ここでは、一例として図3および6の $N=10^6$ に対する結果より、 $\Delta\sigma_{eq}$ を求め、これを式(3)の等価応力 σ_{eq} との比として図12に示した。●および○印はそれぞれ図3および6に対する $\Delta\sigma_{eq}/\sigma_{eq}$ を示す。変動振幅応力下での等価応力測定精度は一定振幅に比較すれば低くなっているが、一例として挙げたこの場合ではいずれも誤差5%以下であって、本方法による等価応力測定精度は十分高いことがわかる。

4. 結 言

先の報告において、変動振幅応力下でのアルミニウム薄膜の表面粗さ増加挙動を特性付ける量として、等価応力の考え方を提案した。この提案は、応力振幅のみが種々変動する場合に対するものであった。そこで、

図12 アルミニウム薄膜疲労ゲージによる等価応力の測定精度

平均応力も変動する条件下での等価応力の妥当性について検討を加えた。本研究で取り挙げた条件下で得られた結果を要約すると以下になる。

(1) 応力振幅のみならず平均応力も変動する場合であっても、先に提案した等価応力

$$\sigma_{eq} = \left(\sum \sigma_i^q N_i / \sum N_i \right)^{1/q}$$

の考えは有効であり、これにより粗さ増加挙動を良く説明することができる。ここで、 σ_i および N_i は、レンジベア法によって計数された応力振幅およびその繰返し数である。

(2) 粗さに及ぼす応力波形の影響は小さいが、正弦波および三角波に比較してく形波の場合には、若干粗さが大きくなる傾向が認められた。

(3) 本研究で取り挙げた範囲の条件下では、等価応力の測定誤差は5%以下であり、疲労ゲージとしてほぼ満足すべき精度を有していることがわかった。

終わりに、本研究に協力いただいた当時静岡大学大学院学生、森竹郁紀君(現スター精密)に謝意を表す。

文 献

- (1) 長瀬・ほか2名, 機論, 55-520, A (1989), 2388.
- (2) 長瀬・中村, 機論, 57-538, A (1991), 1313.
- (3) 長瀬・ほか2名, 機論, 57-539, A (1991), 1481.
- (4) 長瀬・ほか2名, 東海支部第40期総会講演会概要集, (1991), 機論, 57-542, A (1991), 2279.
- (5) 北岡・ほか2名, 機論, 45-390, A (1979), 126.
- (6) 例えば, Broek, D., *The Practical Use of Fracture Mechanics*, (1989), 175, Kluwer Academic Pub.
- (7) 例えば, 中村・ほか3名, 機械の疲労寿命設計, (1983), 11, 養賢堂; Osgood, C., *Fatigue Design*, (1982), 87, Pergamon Press.
- (8) 菊川・ほか2名, 材料, 29-325 (1981), 998.
- (9) 例えば, 日本機械学会誌, 計測の不確かさ, (1987), 47, 丸善.