アルミニウム薄膜の疲労すべり線発生密度を利用した 変動振幅応力の計測†

長瀬 康男* 沢 木 洋三* 吉 田 始**

Measurement of Variable Amplitude Stress Utilizing the Density of Slip Bands

by

Yasuo NAGASE*, Yozo SAWAKI* and Hajime YOSHIDA**

In order to evaluate the stress of a machine part subjected to variable stress amplitude, the density of fatigue slip bands produced on aluminum foil is proposed as a measure for this purpose. The fundamental characteristics of slip band formation were examined under both constant and variable amplitude stresses. It was found that the density of slip bands was dependent on both the stress amplitude and the number of stress cycles. The variation of stress amplitude hardly affected the increase of the slip bands in successive stress cycles, irrespectively of the variable mode of stress. The density of slip bands under variable loading, f_s was well correlated with the equivalent stress, $\sigma_{eq} = (\sum \sigma_i^2 N_i / \sum N_i)^{1/\alpha}$, where σ_i , N_i and α are stress amplitude, the number of stress cycles at σ_i , and a material constant determined from an aluminum foil used, respectively. It is concluded that the equivalent stress can be evaluated by the density of slip bands produced on aluminum foil, using the relationship between f_s and applied stress amplitude obtained under constant loading. The accuracy of measuring the equivalent stress was within 3%.

Key words: Experimental stress analysis, Fatigue, Slip band, Variable stress, Strain gauge, Aluminum foil

1 緒 言

金属薄膜における疲労すべり線の発生現象を、応力(ひずみ)測定¹⁾の尺度として利用することができ、その測定精度は十分高いことが示されている²⁻³⁾。たとえば、清家⁴⁾らはニッケル薄膜のすべり線発生密度に注目し、これを利用することにより高い精度で応力測定が可能であることを示している。すなわち、あらかじめ一定の繰返し数のもとで、種々の繰返し応力に対するすべり線発生状況を求めておく。これが標準となり、応力を測定しようとする箇所のすべり線発生状況の写真をこれと比較することにより、応力が求められる(写真比較法)。

著者らは、アルミニウム薄膜の疲労すべり変形に起因する表面粗さを尺度として、変動振幅応力下で測定期間中の応力履歴の総量または平均的応力(これを等価応力と呼ぶことにする)が求められ、アルミニウム薄膜をいわゆる疲労ゲージとして利用できることを明らかにした。同時に、アルミニウム薄膜に発生する疲労すべり線は、低倍率の光学顕微鏡で容易に観察でき、すべり線密度の応力および繰返し数依存性が顕著であ

るので、これを尺度とする応力(ひずみ)測定が可能となることも指摘した。したがって、アルミニウム薄膜疲労ゲージにおいても、すべり線密度を尺度とすることができればその応用範囲は更に広がることが期待される。

そこで、本研究では、アルミニウム薄膜に生じた疲労すべり線の発生密度を尺度とした変動振幅応力の測定の可能性を検討した。まず、一定振幅応力下における疲労すべり線の発生密度を利用する応力測定法の精度を検討し、つぎに、変動振幅応力下におけるすべり線発生密度の増加特性を調査し、累積疲労損傷則を明らかにした。さらに、変動振幅応力下における応力測定精度を検討した。

2 実験方法

2・1 試験機および試験方法

疲労試験には小野式回転曲げ疲労試験機(3600 rpm)を使用した。疲労試験片は、Fig. 1に示す形状・寸法とした。試験片素材はJIS-SK5であり、熱処理は特に行っていない。

2・2 アルミニウム薄膜および接着

† 原稿受理 平成3年4月10日 Received Apr. 10, 1991

* 正会員 静岡大学工学部機械工学科 〒432 浜松市城北, Dept. of Mech. Eng., Shizuoka Univ., Johoku, Hamamatsu, 432

** 静岡大学工学部機械工学科 〒432 浜松市城北, Dept. of Mech. Eng., Shizuoka Univ., Johoku, Hamamatsu, 432

Fig. 1. Geometry of the specimen.

アルミニウム薄膜には、厚さ $15\ \mu\text{m}$ の JIS AlN30-O 材 (平均結晶粒径 $30\ \mu\text{m}$) を用いた。薄膜表面には圧延の際に生じたさずがあるが、すべり線密度の測定には特に障害とならないことが判明したので、電解研磨は行っていない。 $5 \times 20\ \text{mm}$ に細分した薄膜を、1本の試験片に対し2枚、ひずみゲージ用瞬間接着剤 CY-10 を用いて接着した。このとき薄膜の圧延方向と第1主応力方向が直交するようにした。

2・3 疲労すべり線の観察と発生密度の測定

薄膜表面のすべり線を倍率100倍の光学顕微鏡で観察し、画像処理装置 (日本アビオニクス イメージΣⅢ) により、すべり線の発生密度を測定した。すなわち、すべり線の発生した領域と発生していない領域が黒白で判別できることを利用したもので、顕微鏡の視野面積に対するすべり線の発生した領域の面積比をすべり線の発生密度 f_s と定義した。なお、この測

定領域の大きさは約 $0.6\ \text{mm} \times 0.4\ \text{mm}$ である。

疲労すべり線の発生は繰返し最大せん断ひずみ振幅に支配されるため、薄膜すなわち試験片表面の最大せん断ひずみ振幅と f_s との関係を求める必要がある。しかし、本研究では負荷形式はすべて回転曲げであり、また試験片材料は同一であるため、便宜的に試験片表面の曲げ応力を用いて f_s を整理した。

3 実験結果および考察

3・1 すべり線発生密度と応力および繰返し数との関係

Fig. 2 に、種々の繰返し応力および繰返し数におけるすべり線の発生状況を示す。一般の金属と同様、アルミニウム薄膜でも応力および繰返し数の増加にともなってすべり線の量が増加している。ただしここでは、すべり線を特に明確に示すため、電解研磨があらかじめ施してある。

Fig. 3 に、一例として応力 $\sigma = 160\ \text{MPa}$ における種々の繰返し数下のすべり線発生密度 f_s の正規確率紙における累積確率密度を示す。これは1本の試験片から18個の測定値を求めて示したものである。 f_s はほぼ正規分布にしたがうこと、その標準偏差は小さいことなどがわかる。したがって、今後は f_s の平均値をすべり線発生密度 f_s とする。

また Fig. 4 には繰返し数の増加にともなう f_s の変化の様子を示す。Fig. 3 および 4 から、 f_s の応力および繰返し数依存性が大きく、すべり線発生密度を尺度

Fig. 2. Appearance of slip bands produced on aluminum foil.

Fig. 3. Normal probability plot of f_s . Fig. 4. Relationship between f_s and number of stress cycles.

とした応力測定が可能であることがわかる。

3・2 一定振幅応力下の応力測定精度

すべり線発生密度 f_s から応力を測定する場合の精度を求めると以下ようになる。Fig. 5 に、 f_s と応力 σ の関係を示す。図には f_s の 95% 信頼区間 $\pm \Delta f_s \gamma$ ($\gamma=5\%$) も示した。すなわち、これは実験点の数 $n=18$ とし

Fig. 5. 95% confidence interval of f_s and σ .

$$\Delta f_s \gamma = t \gamma (n-1) S / \sqrt{n} \quad (1)$$

から求めた。ここで、 $t \gamma (n-1)$ は自由度 $n-1$ の t 分布、 S は標本標準偏差である。

応力測定の観点からは、測定された f_s から応力振幅 σ を求める場合の σ の信頼限界が重要である。 N を一定とすれば、 f_s は σ の関数であるから

$$f_s = f_s(\sigma) \quad (2)$$

とおける。 f_s の測定精度が σ の測定精度に及ぼす影響は誤差伝ばの法則¹⁰⁾から、次式で表される。

$$\frac{S_\sigma}{\sigma} = \psi \cdot \frac{S_f}{f_s} \quad \text{ここで} \quad \psi = 1 / \left(\frac{df_s}{d\sigma} \cdot \frac{\sigma}{f_s} \right) \quad (3)$$

ここで S_f および S_σ はそれぞれ f_s および σ における標準偏差である。上式から f_s の測定精度が応力の測定精度に及ぼす影響を検討する。いま、式 (3) の S_f に f_s の 95% 信頼区間 $\Delta f_s \gamma$ を代入すれば、 S_σ として σ の 95% 信頼区間 $\Delta \sigma \gamma$ が求められる。Fig. 5 にはこの σ の 95% 信頼区間 $\pm \Delta \sigma \gamma$ も併記した。ただしここで、式 (2) には 3 次の多項式を用いた。図から応力のばらつきは、 $f_s > 10\%$ であれば約 3 MPa (3%) 以下であり、応力の測定精度がきわめて高いことがわかる。

3・3 変動振幅応力下ですべり線発生密度を支配する等価応力

Fig. 6 にすべり線発生の等密度曲線を示す。これは両対数軸上で f_s の等しい点を結んだものである。図からこの関係はほぼ直線で表され、次式が成り立つことがわかる。

$$\sigma^\alpha N = C(f_s) \quad (4)$$

ここで $C(f_s)$ は、 f_s の関数である。上式は平滑材の高サイクル疲労におけるき裂発生寿命と応力の関係、または $S-N$ 曲線と類似である。 α の値は、図の直線の勾配に相当し、 $\sigma=120 \sim 180$ MPa の範囲ではほぼ一定となり、平均値として 6.19 であった。

一定の大きさのすべり線発生密度に対する累積疲労損傷則は十分明らかにされていないが、上式から次の

Fig. 6. Iso-density curves of slip bands.

ように考えることができる。1サイクル当りのヒステリシスエネルギーは応力 σ のべき乗に比例すると考えることができるから、式(4)から、 f_s なる大きさの疲労被害をもたらすのに必要なエネルギーは σ^α と N に比例すると考えられる。すなわち、すべり線発生密度に対し総ヒステリシスエネルギー一定則が成り立つと解釈できる。ただしこれは本研究で取り上げた応力範囲内についてであり、これ以外の広範囲の応力については、さらに検討する必要がある。

アルミニウム薄膜およびそれが接着される部材の α が等しい場合には、アルミニウム薄膜と部材に生じる応力1サイクル当りの疲労損傷が等しくなる。また、アルミニウムの限界値 $C(f_s)$ が部材のそれより小さい場合には、部材より早期に疲労損傷が累積される。このような場合には、アルミニウム薄膜を部材の疲労損傷モニタ用の疲労ゲージとして利用できる。一方、 α が等しくない場合には、変動振幅応力下の個々の応力振幅およびその頻度そのものは求められないが、測定期間中の応力振幅とその頻度から生じた疲労損傷の総和が求められ、これと総繰返し数から平均的な応力が求められる。

すべり線発生密度の増加過程に荷重履歴の影響がないと仮定すれば、上述のように総ヒステリシスエネルギー一定則が成り立つから、式(4)を変動振幅応力下に拡張した式として次式が得られる。

$$\sum_i \sigma_i^\alpha N_i = C(f_s) \quad (5)$$

ここで σ_i および N_i は応力振幅およびその頻度である。式(5)では荷重履歴の影響がないと仮定している。総繰返し数は $\sum_i N_i$ であるから、上式と等しい疲労損傷をもたらす平均的な応力、すなわちこれを等価応力 σ_{eq} とすれば

$$\sigma_{eq}^\alpha \sum_i N_i = \sum_i \sigma_i^\alpha N_i = C(f_s) \quad (6)$$

から

$$\sigma_{eq} = (\sum_i \sigma_i^\alpha N_i / \sum_i N_i)^{1/\alpha} \quad (7)$$

$$= (C(f_s) / \sum_i N_i)^{1/\alpha} \quad (8)$$

すなわち、式(7)で定義される等価応力が、一定振幅応力下の等すべり線発生密度曲線を用いて式(8)から求められる。

3・4 2段2重重複荷重下におけるすべり線発生密度

Fig. 7に示すような2段2重重複荷重下で、 f_s を求めた。Fig. 8に、High-low および Low-high 下の f_s を示す。ここで High-low の場合 $\sigma_1 = \sigma_H = 180$ MPa, $\sigma_2 = \sigma_L = 120$ MPa, また Low-high の場合 $\sigma_1 = \sigma_L = 120$ MPa, $\sigma_2 = \sigma_H = 180$ MPa とした。また、式(7)から計算される等価応力 σ_{sq} が 140 MPa および 160 MPa となるように、繰返し数の比 N_L/N_H を $\sigma_{eq} = 140$ MPa に対し 6, $\sigma_{eq} = 160$ MPa に対し 1.3 とした。

図中の実線は一定振幅 $\sigma = \sigma_{eq}$ の場合 f_s を示す。図から、いずれの等価応力の場合も、変動様式に関係なくほぼ一定振幅応力下におけるすべり線発生密度に一致することがわかる。すなわち、荷重履歴の影響は認められないから、前節で述べた変動振幅応力を等価応力として測定するのに好都合である。

つぎに、変動振幅応力下における f_s が、変動条件にかかわらず等価応力に支配されるか否かを詳細に調査した。このため、等価応力 σ_{eq} および総繰返し数 $\sum_i N_i = N_1 + N_2$ を一定にし、 σ_1 , σ_2 , N_1 および N_2 を

(a) High-low

(b) Low-high

Fig. 7. Schematic illustration of two-level single block loading.

Fig. 8. Relationship between f_s and $\sum_i N_i$ under two-level single block loading.

Fig. 9. Relationship between f_s and σ_L/σ_H under two-level single block loading.

広範囲に変化させた High-low および Low-high 下で f_s を求めた。

まず, Fig. 9 に σ_L/σ_H を変化させ N_L/N_H を一定に保った場合の f_s を示す。図から明らかなように, f_s は応力比に関係なくほぼ一定値をとり, また High-low および Low-high の結果がよく一致し, $\sigma = \sigma_{eq}$ なる一定振幅応力下における f_s ときわめてよく一致することがわかる。

つぎに, σ_L/σ_H を一定に保ち, N_L/N_H を変化した場合の f_s を求めた。Fig. 10 に f_s と N_H の関係を示す。図から, f_s に及ぼす繰返し数比の影響は認められない。また, High-low および Low-high とともに, f_s は $\sigma = \sigma_{eq}$ なる一定振幅応力下における f_s とよく一致することがわかる。したがって, Fig. 9 および 10 から, $\sigma_L/\sigma_H = 0.5 \sim 0.9$, $N_L/N_H = 1/3 \sim 19$ の範囲では, 応力が 2 段 2 重に変動する単純な変動の場合, すべり線発

Fig. 10. Relationship between f_s and N_H under two-level single block loading.

(a) Relationship between f_s and $\sum N_i$.

(b) Relationship between f_s and σ_2/σ_1 .

(c) Relationship between f_s and N_1 .

Fig. 11. f_s under two-level multiple loading.

生密度に及ぼす荷重履歴の影響は認められないといえる。これは純アルミニウムなど、積層欠陥エネルギーの高い材料では、一般に、ひずみ振幅が試験の途中で変化した場合、変化前のセル寸法から変化後のそれへ可逆的に変化し、繰返し履歴に無関係な応力-ひずみ応答をするため、荷重履歴の影響が現れにくいことが原因と考えられる。

3・5 2段多重重複荷重下におけるすべり線発生密度

前節で応力がHigh から Low へ、また Low から High へ単純に変動する場合には、荷重履歴の影響が現れないことを明らかにした。本節ではこの点をさらに確かめるため、変動回数が多い2段10重重重複荷重下で同様の検討を行った。

前節の Fig. 8, 9 および 10 で用いた変動回数が1回の2段2重重重複荷重を、変動回数だけを5回に増加させ、そのほかの条件はまったく同一とした。すなわち、 N_L および N_H を5等分して、Fig. 7 に示す変動を5回繰返す2段10重重重複荷重下で f_s を求めた。ただし、この場合には High 側から開始する実験のみとした。

Fig. 11 (a), (b) および (c) にそれぞれ Fig. 8, 9 および 10 を2段10重に組替えた場合の結果を示す。これらの図から、変動回数が増加しても荷重履歴の影響が認められないことがわかる。

3・6 多段多重重複荷重下におけるすべり線発生密度

本節では、アルミニウム薄膜によって測定される式(7)の等価応力の精度について検討する。このため、荷重が多段に変動する場合について f_s を求めた。

まず始めに、 $\sigma = 120 \sim 180$ MPa の間で 10 MPa ごとにステップ状に変動する4段4重重重複荷重の漸増および漸減について調査した。Table I に変動条件、

Table I. Details of four-level single block loading.

σ_f MPa	N_i cycles	
	$\sigma_{eq} = 140$ MPa	$\sigma_{eq} = 160$ MPa
180	0.4×10^5	2.5×10^5
160	1.0×10^5	2.0×10^5
140	2.0×10^5	1.5×10^5
120	4.6×10^5	2.0×10^5

Table III. Details of eight-level single block loading.

σ_i MPa	N_i cycles	
	$\sigma_{eq} = 140$ MPa	$\sigma_{eq} = 160$ MPa
220	1.5×10^4	4.0×10^4
200	2.0×10^4	5.0×10^4
180	2.5×10^4	7.0×10^4
160	3.0×10^4	8.0×10^4
140	7.0×10^4	1.0×10^5
120	1.5×10^5	1.4×10^5
100	2.0×10^5	1.8×10^5
80	2.9×10^5	1.4×10^5

Table II に結果を示す。一定応力振幅下での結果を最右欄に示しておいたが、 $\sigma_{eq} = 140$ MPa および 160 MPa とともに一定振幅下の f_s ときわめてよく一致している。

つぎに、さらに 80~220 MPa と広範囲にわたって応力の変動する8段8重重重複荷重の漸増および漸減の場合(変動条件を Table III に示す)について、 f_s を求めた。この測定結果も Table II にまとめて示した。この場合にも、変動応力下の f_s と一定振幅下のそれとがよく一致していることがわかる。なお、この表の等価応力の計算に当たっては、式(7)中の α として、 $\sigma = 120 \sim 180$ MPa の範囲での平均値として 6.19 を用いている。8段8重の場合はこの応力の範囲を逸脱しているが、等価応力の精度は十分高いといえる。

一例として、8段8重重重複荷重の場合について、 f_s から等価応力を測定する場合の精度を検討する。Table II から、一定振幅下の f_s に対する変動振幅下のその偏差は最も大きい場合で 3% である。式(3)を用いれば、これに対する応力の測定誤差は約 1% となる。本実験範囲内で、最も大きい f_s の偏差は Fig. 8 に見られるように、約 10% である。この場合には応力の偏差は約 3% となる。これらの結果から、本手法の測定精度は変動振幅応力下においてもきわめて高いといえる。すなわち、変動様式の詳細は未知であっても、繰返し数が求められれば、式(8)を用いて式(7)で定義される等価応力を評価することができ、その精度は十分高いといえる。

一定振幅応力下で式(4)が成立し、また変動振幅応力下ではこれを拡張した式(5)が成立することが以上の検討で明らかになった。そこで一定および変動振幅

Table II. f_s under four-level single block and eight-level single block loadings.

σ_{eq} MPa	Four-level single block		Eight-level single block		Constant amplitude stress
	Increase	Decrease	Increase	Decrease	
140	47.8%	46.3%	48.5%	49.5%	49.1%
160	61.2%	60.7%	61.3%	58.7%	59.1%

Fig. 12. Relationship between f_s and $\sum \sigma_i^\alpha N_i$ under constant and variable loadings.

応力下で得られた結果をまとめて、 $\sum \sigma_i^\alpha N_i$ と f_s との関係として Fig. 12 に示した。図から一定および変動振幅応力下ともに実験点はほぼ一本の曲線にのり、式(5)がすべり線密度を表す実験式として妥当であることがわかる。

4 結 言

アルミニウム薄膜の疲労過程で発生するすべり線の密度を尺度として、被接着物に作用する変動振幅応力を測定する方法の可能性について検討した。すなわち、一定振幅下および変動振幅下ですべり線発生密度を測定し、これより求められる応力の測定精度を調べた。得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1) アルミニウム薄膜に発生する疲労すべり線の密度は応力および繰返し数に支配される。また、そのばらつきはきわめて小さく、応力（ひずみ）測定の尺度とすることができる。一定振幅応力下ですべり線発生密度を尺度とした応力の測定精度は、95% 信頼限界で約3%である。

(2) 多段多重重複荷重下でのすべり線発生密度に対して、荷重履歴の影響はほとんど認められない。

(3) 変動振幅応力下でのすべり線発生密度は、 $\sigma_{eq} = (\sum \sigma_i^\alpha N_i / \sum N_i)^{1/\alpha}$ で定義される等価応力と等しい一定振幅下でのそれとよく一致する。ここで α は薄膜固有の定数であり、本研究に用いた薄膜で $\alpha=6.19$ である。

(4) すべり線発生密度から求めた等価応力の測定精度は約3%である。

参 考 文 献

- 1) 北岡征一郎, 長瀬康男, 前畑秀和, 清家政一郎, 日本機械学会論文集, A-48, 1351 (1982).
- 2) 北岡征一郎, 大嶋和彦, 平出誠治, 日本機械学会論文集, A-55, 614 (1989).
- 3) 清家政一郎, 細野喜久雄, 日本機械学会論文集, A-55, 2335 (1989).
- 4) 清家政一郎, 細野喜久雄, 日本機械学会論文集, A-55, 917 (1989).
- 5) 長瀬康男, 沢木洋三, 森竹郁紀, 吉田 始, 日本機械学会論文集, A-57, 2279 (1991).
- 6) 長瀬康男, 中村 保, 中村芳幸, 日本機械学会論文集, A-55, 2388 (1989).
- 7) 清家政一郎, 北岡征一郎, 小林敏樹, 日本機械学会論文集, A-45, 126 (1980).
- 8) 北岡征一郎, 長瀬康男, 清家政一郎, 日本機械学会論文集, A-47, 275 (1982).
- 9) S. Kocanda, "Fatigue Failure of Metals" (1978) Sijthoff and Noordhoff International Publishers
- 10) 日本機械学会誌, "計測の不確かさ", p. 47 (1987) 丸善
- 11) H. O. Fucks and R. I. Stephens, "Metal Fatigue in Engineering", 78 (1980) Wiley Interscience publication
- 12) A. Puskar, "Microplasticity and Failure of Metallic Materials", 125 (1989) Elsevier
- 13) たとえば, C. E. Feltner and C. Laird, Acta Met., 15, 1621 (1967).