銅めっきはく疲労ゲージに関する基礎的研究*
(第3報, 成長粒子密度を利用した等価応力の評価)長瀬 康男^{*1}, 沢木 洋三^{*1}
尾村 和也^{*2}, 三須 裕也^{*2}A Basic Study on Fatigue Gauge Made of Copper Electroplating
(3rd Report, Evaluation of Equivalent Stress from the Density
of Recrystallized Grains under the Variable Stress Condition)Yasuo NAGASE, Yozo SAWAKI,
Kazuya OMURA and Hironari MISU

The possibility of measuring the magnitude and number of stress cycles of the machine parts subjected to service loading was examined by the fatigue gauge, made of electroplated copper. It is found that the recrystallized grains formed by cyclic stresses in the foil can be utilized as a measure for stress determination under both constant and variable amplitude stresses. This method is shown enough accurate to evaluate constant stress amplitude. In case of variable stress amplitude, the fatigue damage is correlated with that of the constant stress amplitude in terms of a equivalent stress. This equivalent stress is expressed by $(\sum \sigma_i^\alpha N_i / \sum N_i)^{1/\alpha}$, where σ_i , N_i and α are the stress amplitude, the number of stress cycles of σ_i and the material constant of the gauge, respectively.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Service Load, Fatigue, Copper, Recrystallization

1. 緒 言

銅めっき応力測定法は、繰返し応力を受ける部材の局所応力を高い精度で測定できるという特徴を有するが、その適用は、原理上、一定振幅応力下に限られる。変動振幅応力下では、測定期間中の個々の応力振幅 σ_i やその頻度 N_i は求められないが、これらの負荷によって銅めっきはくに生じた疲労被害の総量を測定することは可能である。すなわち、変動振幅応力による被測定物の疲労被害の累積法則と銅めっきはくにおけるそれとが等しく、かつ銅めっきはくのほうが内部組織変化の限界値が低ければ、銅めっきはくによって被測定物の疲労被害量を見積もることができる。しかし、一般にはこのようにはならない。しかるに、この場合であっても、銅めっきはくにおける疲労被害累積法則を明らかにしておけば、発生する成長粒子などを観測することにより被測定物に作用した応力とその頻度の総量をモニタすることが可能と思われる。このことは、銅めっきはくがいわゆる疲労ゲージとして利用できることを示唆している。

この観点から、著者らはこれまでに、主として銅めっきはくのすべり線および成長粒子の発生現象に注目した研究を行い、変動振幅応力下における累積疲労被害則を明らかにするとともに、変動振幅応力下では等価応力が求められること⁽¹⁾⁻⁽³⁾を明らかにした。銅めっき応力測定法では、これらすべり線および成長粒子の発生現象を尺度とする利用法(限界応力法, 限界繰返し数法)のほかに、成長粒子の密度を尺度⁽⁴⁾とするものがある。すなわち、あらかじめ一定振幅応力下で、各種の繰返し数および繰返し応力に対する成長粒子の発生状況の写真撮影を行っておき、これを標準写真とする。実際の応力測定は、一定の測定期間後の成長粒子の密度分布を標準写真と比較することによって行われる。したがって、銅めっきはくを利用した疲労ゲージにおいても成長粒子発生密度を利用した等価応力の測定ができれば、画像処理⁽⁵⁾等を利用することにより、簡便迅速かつ高精度な測定が可能となることが期待される。

以上の観点から、本研究では成長粒子密度を利用して等価応力を求める疲労ゲージの可能性を検討することを目的とした。まず、一定振幅応力下における成長粒子密度を利用した応力測定法の精度を明らかにした。ついで、荷重履歴が成長粒子密度に及ぼす影響を

* 原稿受付 平成3年6月11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。

調査するとともに、変動振幅応力下における累積疲労被害則を導いた。さらに、本手法で求められた等価応力の精度を検討した。

2. 実験方法

2.1 試験機および試験片 試験には小野式回転曲げ疲労試験機 (60 Hz) を用いた。

試験片は図1に示す形状・寸法とした。素材は JIS-SK 5 である。表1にこの試験片素材の弾性係数を示す。成長粒子の発生を支配するのは繰返し最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ である⁽⁴⁾ ため、実験結果はこれによって整理すべきである。しかし、本研究ではすべて単軸応力であり、試験片素材も同一であるので、便宜的に試験片表面の曲げ応力を用いて整理した。

2.2 銅めっきはくおよび接着 銅めっきはくは前報⁽³⁾ までと同様の組成の酸性銅めっき浴⁽⁴⁾ を用いて製作した。めっき条件なども前報までと同様である。このめっきはくを 3 mm × 20 mm に細分し、図1の試験片の中央部に2枚張り付けた。この接着にはひずみゲージ用瞬間接着剤を用い、最終電着面が接着面側となるようにした。

表1 試験片素材 SK 5 の弾性定数

Young's modulus	E GPa	206
Modulus of rigidity	G GPa	80
Poisson's ratio	ν	0.29

図1 試験片の形状・寸法

2.3 成長粒子密度 顕微鏡視野面積 (約 $0.4 \times 0.6 \text{ mm}^2$) に対する成長粒子の占める面積の比を成長粒子の密度⁽⁵⁾ f_g とした。すなわち、後述のように、成長粒子部分は光学顕微鏡下で白色として観察されるので、この部分の面積比として容易に求めることができる。この測定は、光学顕微鏡に取付けたビジコンカメラの画像を画像処理装置 (日本アビオニクス製イメージΣ III) に通すことによって測定し、1本の試験片に対して測定した18点の平均を f_g とした。

3. 実験結果および考察

3.1 一定振幅応力下における成長粒子密度

種々の繰返し応力下において、銅めっきはくに発生した成長粒子の密度 f_g を測定した。図2に、一例として $N=6 \times 10^6$ の場合における各種の応力下で発生した成長粒子の様子を示す。繰返し応力の増加に伴って成長粒子の密度が増加する様子が観察できる。

図3は、一定応力下での成長粒子密度 f_g の累積確率密度を正規確率紙上に整理した一例を示したものである。図から f_g はほぼ正規分布をすること、そのばらつきは極めて小さいこと、分散は f_g に依存することなどがわかる。

図4は、この f_g を繰返し数 N との関係として示したものである。

これら成長粒子密度 f_g と繰返し応力 σ または繰返し数 N との関係は次式でよく表現することが報告されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

$$f_g = 1 - \exp(-CN^k) \quad (1)$$

$$\sigma = A \ln(1/f_g - 1) + B \quad (2)$$

式(1)は再結晶における再結晶率と時間の関係を表す Johnson-Mehr の式⁽⁸⁾ と類似であり、 k は成長の形態による定数⁽⁸⁾、また係数 C は応力に依存する定数とされている。式(2)の A および B は繰返し数 N に依存する定数である。

図2 一定振幅応力下における成長粒子発生状況 ($N=6 \times 10^6$)

図4中の実線は $k=3$ として、式(1)を適用したものである。実験点はこの実線と良く一致しており、式(1)がほぼ成立することがわかる。

3.2 成長粒子密度を利用した銅めっき法の測定精度
成長粒子密度 f_g を尺度とする方法では、一定振幅応力下であらかじめ f_g と負荷応力 σ の関係を求めておき、実際の応力測定時にはこれをひずみゲージ特性として用いることになる。この f_g - σ 関係は、図3に示したようにばらつきを有する。したがって、これに起因して f_g から σ を求める場合にも誤差が生じる。

前節で f_g の分布はほぼ正規分布をすることがわかった。この場合の f_g の信頼区間 Δf_{gr} は、有意水準を γ とすると次式で与えられる⁽⁹⁾。

$$\Delta f_{gr} = t_{\gamma}(n-1) \cdot S / \sqrt{n} \quad (3)$$

ここで n は測定値の数、 S は標本標準偏差、 $t_{\gamma}(n-1)$ は自由度 $n-1$ の t 分布において、確率 $1-\gamma$ となる t_{γ} である。上式から $\gamma=0.05$ の採択域、すなわち95%信頼限界 $\pm \Delta f_{gr}$ を図示すると図5のようになる。 $\pm \Delta f_{gr}$ が示されていない点は、これを表示することができない程度に小さいことを示すが、それ以外の点で

図3 一定振幅応力下における成長粒子密度 f_g の正規確率プロット ($\sigma=250$ MPa)

図4 成長粒子密度 f_g と繰返し数 N との関係

も Δf_{gr} は極めて小さいことがわかる。

また、図5に実験式(2)を実線で示したが、実験値と実験式が比較的良好に一致していることがわかる。

実際には、測定された f_g から応力 σ を求めることになる。したがって、応力の測定精度を明らかにするためには、与えられた f_g に対する σ の信頼区間を求めることが必要になる。 f_g を σ の関数 $f_g=f_g(\sigma)$ として書くと、式(2)から

$$f_g = f_g(\sigma) = 1 / [1 + \exp \{(\sigma - B)/A\}] \quad (4)$$

誤差伝ばの法則から⁽⁹⁾次式が得られる。

$$S_{\sigma}/\sigma = \psi S_{f_g}/f_g \quad (5)$$

ただし

$$\psi = 1 / (df_g/d\sigma \cdot \sigma / f_g) \quad (6)$$

ここで S_{σ} および S_{f_g} は、それぞれ σ および f_g の標準偏差である。式(4)を式(6)に代入すれば、 f_g の測定誤差が σ の精度に与える影響が、式(5)から得られる。

S_{σ} として式(3)で求めた95%信頼限界を用いて、 σ の95%信頼限界 $\pm \Delta \sigma_r$ を求め、図5に併記した。図から、 $f_g \geq 5\%$ であれば応力の測定誤差は2 MPa (1%)以下であり、極めて測定精度が高いことがわかる。以

図5 f_g の95%信頼区間 Δf_{gr} および f_g から求められる応力 σ の95%信頼限界 $\Delta \sigma_r$

図6 成長粒子の等発生密度曲線

上の結果から、成長粒子密度を利用した銅めっき法は、一定振幅下で用いる場合、極めて高い測定精度を有していることが確認された。

3・3 成長粒子の等密度曲線 図6に成長粒子の等密度曲線を示す。図からいずれの f_0 の場合も σ と繰返し数 N の関係は両対数紙上でほぼ直線として表されるといえる。すなわち、

$$\sigma^a \cdot N = D(f_0) \quad \cdots \cdots (7)$$

なる直線群でほぼ表される。ここで $D(f_0)$ は f_0 のみの関数である。 α は f_0 の増加に伴って若干大きくなる傾向があるが、その程度は小さく、ほぼ一定とみなすことができる。

一定振幅応力下で成長粒子密度を尺度として応力を測定する場合、図6または式(7)をゲージ特性として用い、測定された f_0 および N から σ を求めることになる。

3・4 変動振幅下の成長粒子密度に対する累積疲労被害則 変動振幅応力下で銅めっき法を用いる場合、成長粒子密度から求められる応力は測定期間中の平均値である。この平均値がいかなる性質を有するかについて検討しておく。すなわち、この点が明らかになれば、変動振幅応力の個々の振幅などは求められないが、作用した応力およびその繰返し数の総量を知ることができる。

銅めっきはくにおけるすべり帯発生に対する疲労被害は、繰返し数に線形に比例することが報告されている⁽¹⁰⁾。しかし、成長粒子発生後の成長粒子密度の増加に対する累積疲労被害則は、いまだ明らかにされていない。式(1)および(2)は、成長粒子密度を表す実験式であるが、係数 A, B および C の関数形が明らかにされていないため、

$$f_0 = f_0(\sigma, N) \quad \cdots \cdots (8)$$

なる関係、すなわち成長粒子の等密度曲線の形状は明らかでない。また、上式の関係が明らかになったとしても、変動振幅応力下における累積被害則は別の課題である。

以上のことから本研究では、等密度曲線が式(7)で

図7 二段二重重複荷重

表されることならびに累積被害則を以下のように仮定した。すなわち、少なくとも式(7)は、式(1)および(2)と矛盾しないことを考慮した。式(7)は左辺の量 $\sigma^a N$ が $D(f_0)$ に達すると密度が f_0 になると解釈される。すなわち f_0 なる密度をもたらし疲労被害は応力の α 乗に比例し、繰返し数 N に線形に比例するとともに、総ヒステリシス・エネルギー一定則が成立すると解釈できる。したがって、荷重履歴の影響がないと仮定して、式(7)を変動振幅下へ拡張すると次式が得られる。

$$\sum \sigma_i^a N_i = D(f_0) \quad \cdots \cdots (9)$$

ただし α は一定値11.3と仮定した。この累積疲労損傷が、応力 σ_{eq} が $\sum N_i$ 回作用した時のそれと同一とすれば等価応力 σ_{eq} として次式が導かれる。

$$\sigma_{eq} = (D(f_0) / \sum N_i)^{1/\alpha} \quad \cdots \cdots (10)$$

$$= (\sum \sigma_i^a N_i / \sum N_i)^{1/\alpha} \quad \cdots \cdots (11)$$

すなわち、式(11)で定義された等価応力を、一定振幅応力下で求められた $D(f_0)$ と $\sum N_i$ を用いて、式(10)から評価することができる。

一方、北岡ら⁽¹¹⁾は、成長粒子径 a は、ある範囲内で、ほぼ次式のように表されることを報告している。

$$a = a_0 + kN \quad \cdots \cdots (12)$$

ここで a_0 は初期粒子径、 k は応力に依存する定数(成長速度)である。上式に基づけば、成長粒子密度(面積率)は N の二乗に比例することになり、ここで仮定した累積被害則と相反する。詳細は今のところ明らかではない。したがって、たとえ累積疲労被害則は違っても、式(9)以後の議論は成立する。

3・5 振幅が二段二重に変動する場合の成長粒子密度と等価応力の関係 成長粒子密度に及ぼす荷重履歴の影響を明らかにするために、まず荷重の変動がもっとも単純な場合について実験を行った。すなわち、応力が、図7に示すように、High-lowまたはLow-highの二段にステップ状に変化する場合を考える。二

図8 二段二重重複荷重下における成長粒子密度

段二重重複荷重の場合の等価応力は次式となる。

$$\sigma_{eq} = \{(\sigma_H^a N_H + \sigma_L^a N_L) / (N_H + N_L)\}^{1/a} \quad \cdots \cdots (13)$$

そこでまず、 $\sigma_H=250$ MPa および $\sigma_L=220$ MPa、繰返し数比 N_H/N_L を 1 および 1/4 とした実験を行った。この場合、式(13)で定義される σ_{eq} は、240 および 230 MPa となる。図 8 に、この場合の f_g と $\sum N_i = N_H + N_L$ との関係を示す。High-low と Low-high は荷重の負荷順序が逆となるだけで、そのほかの条件は全く同一である。図中には一定振幅 $\sigma = \sigma_{eq}$ の場合の f_g と N の関係式(1)を実線で示した。応力が High-low に変化する場合の f_g は一定振幅のそれとほぼ等しいが、Low-high の場合には低くなっている。この傾向は等価応力の大きさとは無関係である。

荷重履歴の影響因子として、High-low と Low-high の相違のほかに、応力比および繰返し数比が考えられる。また、これらの比の値のみならずその絶対値も影響を及ぼすと考えられる。これら因子の影響を詳細に検討するためには、北岡らが提案した成長粒子の成長速度⁽¹¹⁾ または成長粒子密度の増加速度⁽¹²⁾ に注目し、応力変動後の速度変化を一定振幅応力下のそれと比較する必要がある。本研究では、応力比および繰返し数比を系統的に変化させて f_g を求め、この点について検討した。

等価応力 $\sigma_{eq}=230$ MPa、総繰返し数 $\sum N_i=6 \times 10^6$ および High 側の応力 $\sigma_H=250$ MPa が一定となるよう応力比 σ_L/σ_H を変化させて同様の検討を行った。図 9 に f_g と σ_L/σ_H との関係を示す。図中には $\sigma = \sigma_{eq}$ 、 $N = \sum N_i$ なる一定振幅応力下の f_g を破線で示した。この場合には、 σ_L/σ_H を変化させるとこれに伴って繰返し数比 N_H/N_L も変化するため、応力比の影響のみを論じることはできない。しかし、High-low の場合には図中に破線で示した $\sigma = \sigma_{eq}$ 、 $N = \sum N_i$ なる一定振幅下の結果とがほぼ一致している。また、応力比の影響もかなり小さいといえる。詳細に見ると、応力比が

図 9 二段二重重複荷重下における成長粒子密度に及ぼす応力比の影響

小さい領域では、一定振幅の f_g に比較して低下しているが、これは σ_L が一定振幅応力下でも成長粒子の発生を生じさせない大きさ (過小応力) になるためと考えられる⁽³⁾。一方、Low-high の場合には、図 8 と同様、一定振幅下の f_g に比較してかなり小さく、応力比 (繰返し数比) の影響はさらに小さい。したがって、 f_g は繰返し数比や応力比よりも High-low または Low-high なる荷重の順序の影響を顕著に受けるといえる。

次に、High 側の応力および Low 側の応力をそれぞれ $\sigma_H=250$ MPa、 $\sigma_L=220$ MPa と一定とし、Low 側の繰返し数 $N_L=5 \times 10^6$ に対して、High 側の繰返し数 N_H を種々変化させた場合の f_g (○および●印) を求めた。また、 $N_H=2 \times 10^6$ を一定とし、 N_L を種々変化させた場合の f_g (□および■印) も調べた。実験はいずれの場合にも High-low および Low-high について行った。この結果を、図 10 に f_g/f_{gc} と N_H/N_L との関係として示す。ここで、 f_{gc} は $\sigma = \sigma_{eq}$ 、 $N = N_H + N_L$ なる一定振幅応力下での成長粒子密度である。図中括弧で囲んだ実験点は、一次応力下で成長粒子の発生が起らない実験条件下でのデータであることを示す。High-low の場合、繰返し数比の影響はほとんど認められず、また f_g/f_{gc} はほぼ 1 となる。一方、Low-high では High-low に比較して f_g/f_{gc} がかなり小さいが N_H/N_L の増加に伴って f_g/f_{gc} が増加している。

成長粒子密度は成長粒子の発生頻度と成長速度の両者によって決まる。従来の研究により、応力が高いほうが、成長粒子の発生頻度は高く微細な結晶組織となり⁽¹⁰⁾、成長速度も速いこと⁽¹¹⁾、いったん発生した成長粒子は低い応力のもとでも成長すること⁽¹¹⁾ などが明らかにされている。

したがって、High-low では High 応力のもとでいったん発生した多数の成長粒子はその後の Low 応力のもとでも容易に成長し、荷重履歴の影響がほとんど

図 10 二段二重重複荷重下における成長粒子密度に及ぼす繰返し数比の影響

現れない。一方, Low-high では Low 応力のもとで比較的少数の成長粒子が発生し, これが High 応力のもとで成長する。しかし, 既発生した成長粒子の個数は少ないためこれらの成長による f_g の増加は小さい。また再結晶現象には, 潜伏期間が必要であって, 新たな成長粒子発生は, 応力変動後直ちに起こらず, f_g の増加が小さくなるものと考えられる。また, 図 10 に見られたように, High-low であっても 1 次応力下で成長粒子の発生が起こらない場合に f_g が小さくなるのは, 成長粒子発生までの過程と成長過程における累積疲労損傷則の相違が主な原因と考えられる。たとえば, 成長粒子発生までの過程に対しても式(9)と類似の累積疲労損傷則が成り立つ⁽¹⁾が, この場合の α の値は式(9)のそれと異なる。このような範囲にまで式(11)を適用することに無理があると考えられる。

3.6 振幅が二段多重に変動する場合 応力の変動条件は図 8 と同一とし, N_1 および N_2 を 5 等分した二段十重重複荷重の場合について同様の検討を行った。この結果を図 11 に示す。図中には一定振幅応力のもとでの f_g - N 関係も示してある。図のように, High 側から開始した場合および Low 側から開始した場合での結果がほぼ一致するとともに一定振幅下の結果とも一致することがわかる。図 8 と比較するといっそう明瞭であるが, 変動回数が増えると荷重履歴の影響が消失するといえる。二段十重重複荷重のように変動回数が多い場合には, 成長粒子発生までに数回の応力変動を受けるから, 成長粒子発生頻度は High 側から開始した場合と Low 側から開始した場合とで差違が小さく, いったん発生した成長粒子は, 再び変動応力下で成長することなどのため, f_g に相違がほとんど認められなかったものと考えられる。

3.7 振幅が多段多重に変動する場合 前節までの結果より, 応力が High-low に変動する場合のほう

が Low-high に比較して f_g が高くなるが, 変動回数が増えたと荷重履歴の影響は小さくなることなどがわかった。一方, 応力が漸増または漸減する条件下でも応力の変動回数が多い場合には, 荷重履歴の影響が現れるか否かを明らかにしておくこと, 式(11)で定義した等価応力が荷重履歴の影響がない場合の f_g を支配する量として妥当であるか否かを検討することなども必要である。

そこで応力振幅がステップ状に漸増または漸減する四段四重重複荷重下で f_g に及ぼす荷重履歴の影響および等価応力の妥当性を検討した。表 2(a)および(b)にそれぞれ応力の変動条件および f_g の測定結果を示す。応力 σ_i は 220~250 MPa の範囲で 10 MPa ステップとし, 繰返し数 N_i を適宜定めて $\sigma_{eq}=230$ および 240 MPa となるようにした。表には $\sigma=\sigma_{eq}$, $N=\sum N_i$ なる条件の一定振幅応力下での f_g も併記した。表から, 四段四重重複荷重の f_g は一定振幅の場合の結果と必ずしも良く一致しているとは言えないが, 同じ等価応力 σ_{eq} および総繰返し数 $\sum N_i$ に対する二段二重の結果(図 8)と比較すると, 多段に変動する場合のほうが f_g に及ぼす負荷順序の相違の影響が小さくなることがわかる。これらの現象は, 応力変動範囲, 応力ステップなどに依存すると考えられるが, 3.5 節の二段二重重複荷重において現れた現象との相違を以下のように説明することができる。

250 MPa から 220 MPa へ High-low なる二段二重に変動する場合と, 250 MPa から 220 MPa へ 10 MPa ステップで四段四重に漸減する場合を比較する。等価応力が等しい場合で比較すると, 後者における成長粒子発生頻度は前者におけるそれより低くなると考えられる。これは応力が漸減するため成長粒子発生時にお

図 11 二段十重重複荷重下における成長粒子密度

表 2 四段四重重複荷重下における成長粒子密度

(a) 変動様式

i	σ_i MPa	N_i	
		$\sigma_{eq}=240\text{MPa}$ $\sum N_i=6 \times 10^6$	$\sigma_{eq}=230\text{MPa}$ $\sum N_i=6 \times 10^6$
1	250	2.0×10^6	4.0×10^5
2	240	1.8 "	1.0×10^6
3	230	1.2 "	1.6 "
4	220	1.0 "	3.0 "

(b) 成長粒子密度

σ_{eq} MPa	f_g %		
	High-low	Low-high	Const. amp.
240	49	43	57
230	23	17	28

ける応力は 250 MPa 以下になると推定され、また応力が低い場合ほど成長粒子発生頻度が低下する⁽¹⁰⁾ためである。したがって、この後に成長粒子の成長が生じて、この場合の f_g は前者におけるそれに比較して低くなるものと考えられる。

反対の四段四重漸増の場合には 3・5 節の二段二重 Low-high の場合と同様の理由から、 f_g は一定振幅下のそれに比較して小さくなる。

前節および本節の結果から、応力が一般的に多段多重に変動する場合には成長粒子密度に及ぼす荷重履歴の影響は小さくなるものと推定される。しかし、成長粒子発生密度に及ぼす荷重履歴の影響を明確にするためには、成長粒子発生頻度および成長速度の観点からさらに検討を加えること、応力が過小応力を含めて広範囲に変動する場合の式(7)および(11)の妥当性を明らかにすることなどが必要であるといえる。これらの点については今後の課題としたい。

以上のように、本研究では比較的荷重履歴の影響が顕著である条件下で検討したが、このような場合において、式(11)で定義される等価応力の測定精度を明らかにしておく。表 2 から、一定振幅応力下での f_g に対する変動振幅応力下でのそれとの偏差を求めた。これに対応する等価応力の誤差を式(5)より計算すると、最大でも 2% (5 MPa) となった。また図 11 についても同様な検討を行ったところ、いずれも 1% 以下であった。したがって、一定振幅応力下の場合よりも精度は低下するものの、本手法により比較的良好な精度で等価応力を求めることができるといえる。

4. 結 言

銅めっきはくの疲労過程において生じる成長粒子の密度を尺度とした変動振幅応力測定法の可能性を検討することを目的とし、一定振幅応力下および変動振幅応力下で、成長粒子密度の増加特性、累積疲労被害則

などについて検討した。得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1) 一定振幅応力下における成長粒子発生密度は、ほぼ正規分布に従い、その変動係数は極めて小さい。

(2) 成長粒子密度を尺度とする応力測定法を一定振幅応力下へ適用した場合、その測定精度は $f_g \geq 5\%$ であれば 2 MPa (1%) 以下である。

(3) 変動振幅応力下の成長粒子密度は荷重履歴の影響を受ける。すなわち、High-low の場合には荷重履歴の影響がほとんど認められないが、Low-high の場合にはこの影響が著しく、前者と比較して成長粒子密度が低くなる。

(4) 応力の変動回数が多くなると成長粒子密度に及ぼす荷重履歴の影響は小さくなり、 $\sigma_{eq} = (\sum \sigma_i^q N_i / \sum N_i)^{1/q}$ で定義される等価応力に相当する一定振幅下での挙動と比較的よく一致する。

(5) 本手法で求めた等価応力は、本研究の範囲内では誤差 2% (5 MPa) 以下であり、比較的高い精度を有することがわかった。

文 献

- (1) 長瀬・泉沢, 機論, 55-517, A(1989), 2014.
- (2) 長瀬・吉崎, 機論, 56-522, A(1990), 231.
- (3) 長瀬・吉崎, 機論, 56-525, A(1990), 1058.
- (4) Ohkubo, H., *Memoir Fac. Eng., Nagoya Univ.*, 20-1(1968), 1.
- (5) 加藤, 機論, 52-484, A(1986), 2692.
- (6) 加藤, 機論, 49-446, A(1983), 1344.
- (7) 加藤, 材料, 30-332(1980), 478.
- (8) Byrne, J.G., *Recovery Recrystallization and Grain Growth*: 小原訳, 回復および再結晶, (1968), 70, 丸善.
- (9) 例えば, 日本機械学会訳, 計測の不確かさ, (1987), 12, 日本機械学会.
- (10) 泉沢・長瀬, 機論, 52-476, A(1986), 1021.
- (11) 北岡・大嶋, 機論, 53-487, A(1987), 2503.
- (12) 北岡・ほか 2 名, 機論, 57-534, A(1991), 442.