銅めっき応力測定法を利用した疲労ゲージに関する基礎的研究*

(振幅および平均応力が変動する場合におけるすべり帯発生特性)

長瀬 康 男^{*1}, 泉 沢 正 郎^{*1}

A Fundamental Study on the Fatigue Gage Utilizing the Copper Electroplating Method (Characteristics of Slip Band Initiation in the Copper Plating under Variable Stress Amplitude and Variable Mean Stress)

Yasuo NAGASE and Masaro IZUMISAWA

Fundamental experiments are carried out to examine the parameter that dominates slip band initiation in copper electroplating under the condition where the mean stress as well as the stress amplitude varies. It is found that, in the case of constant amplitude stressing, the relation between the proper stress σ_p for slip band initiation and the number of cycles N is well represented by $\sigma_p^2 \cdot N = C$. This means that slip bands appear when the total hysteresis energy applied to the copper plating attains a critical value. When the mean stress varies stepwise or sinusoidally, the range pair of the stress mainly dominates the occurrence of slip bands, and Miner's rule holds for the accumulation of fatigue damage. Accordingly, the parameter $(\sum \sigma_i^2)^{1/\alpha}$, where σ_i is the range pair and α is the exponent of the $\sigma_p - N$ relation, is equivalent to the proper stress under constant amplitude stressing. Based on these results, the applicability of the copper plating to the fatigue gage that accumulates and indicates a load experience is discussed.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Fatigue, Copper Electroplating Method, Variable Stress, Fatigue Gage, Range Pair

1. 緒 言

銅めっき応力測定法⁽¹⁾は、一定振幅応力を受ける機械要素などの表面応力を高精度で測定できる手法である。この方法で利用する特性は、繰返しひずみによってめっき層に生じる成長粒子または成長粒子内に発生する疲労すべり帯⁽²⁾が、めっき層に作用する最大せん断応力の振幅と繰返し数に支配される現象である。粒子成長を誘起するエネルギーは、再結晶では熱エネルギーであるが、成長粒子では機械的エネルギーであり、これが電着結晶粒内の格子欠陥の増加を引き起こし、結晶粒成長の原動力となるものと考えられている⁽³⁾。

銅めっき法を変動振幅応力に適用することの可否についてはまだ十分な検討がなされていない⁽¹⁾⁽⁴⁾が、銅めっき層のすべり帯はめっき層に生じる非弾性ひずみの蓄積の結果として生じるものであるから、変動応力下で使用すれば、測定期間内の電着銅の応力-ひずみサイクルにおけるヒステリシスエネルギーの総和を見積もることが可能であると考えられる。したがって、銅めっきを被測定物に施せば、この表面に生じる負荷

の累積の程度を推定できるいわゆる疲労ゲージとして利用することが可能になるものと考えられる。なお、変動応力下で発生するすべり帯については、マイナー則が成立すること、過大または過小応力を与えるとその後の応力の繰返しによるすべり帯の発生が促進されることなどがすでに明らかにされている⁽⁴⁾。

一般に、変動振幅荷重は、周波数がほぼ一定で振幅のみ変化する狭帯域ランダム荷重と、周波数、振幅ともに変化する広帯域ランダム荷重に分けることができる。従来の研究⁽¹⁾⁽⁴⁾は、前者に対応する平均応力が一定で振幅のみが変化する比較的単純な場合について行われたものであり、このためすべり帯発生を支配する因子として、単に応力振幅が用いられていた。これに対し、後者に対応する平均応力も変化する場合には、応力振幅のみでは不十分であり、ヒステリシスループ面積を表しうる力学的因子⁽⁵⁾⁽⁶⁾が必要になる。しかしながら、このような条件下におけるすべり帯発生特性に関する調査は行われておらず、銅めっきを疲労ゲージとして利用するためには、すべり帯発生 of 支配因子について検討を加える必要があるものと考えられる。

以上の観点から、本研究では、振幅および平均応力ともに変動する場合の銅めっきはくすべり帯発生現

* 平成元年 3 月 10 日 東海支部第 38 期総会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 4 月 26 日。

^{*1} 正員 静岡大学工学部 (〒432 浜松市城北 3-5-1)。

象の基礎的性質を明らかにすることを目的とした。すなわち、まず一定振幅応力下におけるすべり帯の発生が、総ヒステリシスエネルギー一定の条件で起こることを明らかにした。次に、振幅が二段多重に変動する場合について、等価応力振幅を用いて、一定応力と変動応力を同様に扱うことの可否を検討した。さらに、平均応力がく形波および正弦波状に変化する場合についてすべり帯発生の限界応力を求めるとともに、すべり帯発生を支配する力学的因子として、応力のレンジペアおよびレンジを取り上げ、これらの妥当性について検討を加えた。

2. 実験方法

2.1 試験機および試験片 試験機には、引張・圧縮形の電気・油圧式疲労試験機を使用した。試験片の素材には機械構造用炭素鋼 S45C または合金工具鋼 SKS-3 の丸棒を使用し、それぞれ図 1 (a) および図 1 (b) に示す形状・寸法のテーパ付き試験片に加工した。ただし、SKS-3 には、830°C から油焼入れの後、200°C で焼戻しを施した。

2.2 銅めっきはく製作および限界応力の測定 銅めっきはくは、バフ研磨により鏡面仕上げを行ったステンレス鋼板(150×135 mm)を素地とし、これに硫酸銅浴を用いた 1 層の酸性銅めっきを施した後、板からはがして製作した。ただし、めっき浴の組成、めっき方法などは従来の研究⁽²⁾と同様とした。このめっきはくを 3×20 mm の長方形に細分した後、図 1 の試験片のテーパ部の対称位置に軸に沿って 2 枚接着して、室温において試験を実施し、すべり帯発生の限界応力 σ_p を求めた。ただし、めっきはくは初期電着面がすべり帯の観察面となるように裏向き⁽²⁾に接着し、接着剤

として瞬間接着剤を用いた。 σ_p はすべり帯発生の限界位置 s における試験片直径を d とするとき、次式で求めた。

$$\sigma_p = 4W/\pi d^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 W は荷重振幅

なお、すべり帯の観察には 100 倍の光学顕微鏡を使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 一定応力下における銅めっきはくの σ_p - N 曲線

図 1 (a) の試験片を用いて 20 Hz の繰返し速度下で銅めっきはくの σ_p - N 曲線を求めた。ただし、応力振幅は一定とし、平均応力を零とした。この結果を図 2 に示す。図 2 から、 σ_p - N 曲線は両対数グラフ上でほぼ直線となることがわかる。したがって、 σ_p [MPa] と N との関係は次式で表すことができる。

$$\sigma_p^\alpha \cdot N = C \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $\alpha = 7.0$, $C = 1.1 \times 10^{22}$ [MPa⁷]

これは、応力 1 サイクルによる疲労被害が σ_p^α に比例し、繰返し数に対して線形に累積すること、およびこの疲労被害が限界値 C に達するとすべり帯が発生することを示している。すなわち、1 サイクルにおける材料の内部損失が応力振幅のべき乗に比例すると仮定できることから⁽⁷⁾、すべり帯発生に総ヒステリシスエネルギー一定の条件が成り立つと考えることができる。また、このことは、高サイクル疲労における平滑材の S - N 曲線またはき裂の発生応力と繰返し数との関係が次式で表される⁽⁸⁾ことと類似である。

$$\sigma^\beta \cdot N = C' \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $\beta = 7 \sim 17$

疲労破壊は微視的レベルでの塑性変形が蓄積される結果生じる現象であるが、この疲労現象と銅めっきはくのすべり帯発生現象を類似の関係で表すことができる

図 1 テーパ付き試験片の形状・寸法

図 2 一定応力下における銅めっきはくのすべり帯発生に対する σ_p - N 曲線

といえる。

式(2)における σ_p は試験片表面の応力を表しており、めっきはくのはく応力とは異なる。しかし、接着層はきわめて薄く、まためっきはくのはく厚さは約10 μ mであるから、めっきはくにはく生じるひずみと試験片表面のひずみは等しいと考えることができる。そこで、式(2)を次式のように引張・圧縮ひずみで整理する。

$$\left(\frac{\sigma_p}{E_0}\right)^\alpha \cdot N = \frac{C}{E_0^\beta} \quad \dots\dots\dots(2)'$$

ここで、 E_0 は試験片の縦弾性係数である。同様に、式(3)についても次式のように書き直す。

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)^\beta \cdot N = \frac{C'}{E^\beta} \quad \dots\dots\dots(3)'$$

ここで、 E は材料の縦弾性係数である。銅めっきはくと被接着物において、 α と β がほぼ等しく、 $C/E_0^\beta < C'/E^\beta$ であれば、両者は繰返しひずみに対する疲労被害の蓄積の度合いが等しく、繰返し数について銅めっきのほうが早期に限界に達するといえるので、変動応力下で機械要素などに生じる疲労被害の累積程度を銅めっきはくを用いて見積もることが可能になるものと考えられる。一方、 α と β が等しくならない場合のほうが一般的であるが、このような場合には、銅めっきはくを上述のような疲労ゲージとして利用することはできなくなる。しかしながら、後述するように銅めっきはくは変動応力下では応力のレンジペアに基づいて疲労被害を累積する特性を有するので、応力履歴および疲労被害の総量を計量する疲労ゲージとして利用できる可能性があるものと考えられる。

図3は、清家ら⁽⁹⁾によって求められた種々の温度下における成長粒子発生限界せん断ひずみ γ_p と繰返し数 N との関係(γ_p - N 曲線)を両対数で示したものである。図3から明らかなように、この場合にも式(2)と類似の関係がほぼ成り立ち、銅めっきの成長粒

図3 種々の温度における銅めっきの γ_p - N 曲線

子またはすべり帯発生現象をこの式で表すことが妥当であること、 α はほぼ4~5程度の値であることなどがわかる。

なお、別に製作しためっきはくについて、0.5~40 Hzの範囲の種々の繰返し速度下で求めた α の値はほぼ4~5の範囲であった。

3.2 二段多重重複荷重下におけるすべり帯発生

平均応力の変化がほとんどなく、振幅のみが変化する狭帯域ランダム荷重下におけるすべり帯発生特性を検討するために、平均応力が零で応力振幅が二段多重に変動する場合を取り上げて、限界応力を求めた。図1(b)に示す試験片を用い、図4に示す20 Hz(周期0.05 s)の σ_1 および σ_2 からなる2段階に変動する荷重が繰返し負荷される二段多重重複荷重を加えた。ここで、 σ_1 、 σ_2 ともに図2に示すすべり帯発生の下限界応力($N=10^7$ に対する限界応力)以上とし、図4に示す2段階の変動を1サイクルとした。繰返し負荷を N 回与えた後、すべり帯発生の限界位置を求め一次荷重および二次荷重の大きさから、その位置に作用した一次応力 σ_1 および二次応力 σ_2 を式(1)によって求めた。実験結果を図5に示す。ここで、 $\sigma_1=150\sim 220$ MPaの範囲において $\sigma_2/\sigma_1=1.05\sim 1.30$ の範囲に種々変化した。図5において、縦軸は

$$(\sum \sigma_i^\alpha)^{1/\alpha} = (\sigma_1^\alpha + \sigma_2^\alpha)^{1/\alpha} \quad \dots\dots\dots(4)$$

である。ただし、 $\alpha=7.0$ とした。これは、1サイクル中に含まれる変動応力の振幅を一定振幅に換算したものの

図4 二段多重重複荷重

図5 二段多重重複荷重下におけるすべり帯発生の限界応力

であり、菊川らの提案した相当塑性ひずみレンジペア⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾または等価応力振幅⁽¹²⁾と同じものである。すなわち、式(2)により疲労被害が繰返し数に対して線形に累積すると仮定できるから、変動応力振幅における等価応力を σ_{eq} とすれば次のように書くことができる。

$$\sigma_{eq} = \left(\frac{1}{\sum n_i} \sum \sigma_i^\alpha \right)^{1/\alpha} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 n_i は応力 σ_i の繰返し数である。この式では、荷重履歴は考慮されていない。図4の二段多重重複荷重における1サイクルを考えれば、 $\sum n_i = 2$ であるから

$$\sigma_{eq} = \left\{ \frac{1}{2} (\sigma_1^\alpha + \sigma_2^\alpha) \right\}^{1/\alpha} \dots\dots\dots (6)$$

となる。

本節では図4に示す波形を1サイクルとしているから、繰返し数を N とすれば

$$\sigma_{eq}^\alpha \cdot (2N) = C \dots\dots\dots (7)$$

したがって、式(6)を上式に代入して

$$\left\{ (\sigma_1^\alpha + \sigma_2^\alpha)^{1/\alpha} \right\}^\alpha \cdot N = C$$

中かっこの内が、図4に示す1サイクルに対する等価応力となる。図5には20 Hzの正弦波による σ_p - N 曲線(図2に示したものを)を併せて示すが、本実験の結果はこの直線とほぼ一致することがわかる。また、図5中の実験点の横に示した数値は累積繰返し数比であり、ほぼ1となっている。これらのことは、繰返し数に対して疲労被害が線形に累積することを裏付けるものである。以上の結果から、振幅が変化する場合に、繰返し数に対して線形則が成り立つことが確かめられるとともに、等価応力として $(\sum \sigma_i^\alpha)^{1/\alpha}$ を用いることが妥当であることがわかった。

次に、 σ_2/σ_1 の広い範囲において、上述した等価応力がすべり帯発生を支配するパラメータとして有効か否かを検討するため、図4に示す1変動サイクルの繰返

し数 N を $N=8.8 \times 10^5$ の一定とし、 σ_1 と σ_2 の比を種々変化させ前述と同様な二段多重重複荷重試験を行った。すべり帯発生の限界位置に作用した σ_1 と σ_2 の関係を示せば図6のようになる。図には、 $(\sigma_1^\alpha + \sigma_2^\alpha)^{1/\alpha} = 200$ MPa (ただし、 $\alpha=7.0$)とした場合の σ_1 と σ_2 の関係を実線で示した。なお、200 MPaは図2において一定応力振幅下の $N=8.8 \times 10^5$ に対する σ_p である。

一方、この場合の結果を累積繰返し数比で表せば次のようになる。 N サイクル繰返した場合には

$$\frac{N}{N_1} + \frac{N}{N_2} = D \dots\dots\dots (8)$$

ここで D は疲労被害を表し、すべり帯の発生に線形則が成立する場合には $D=1$ となる。上式に式(2)を用いれば

$$\frac{N}{N_1} + \frac{N}{N_2} = \frac{N}{C} (\sigma_1^\alpha + \sigma_2^\alpha) = D \dots\dots\dots (9)$$

となる。上式に $N=8.8 \times 10^5$ 、 $\alpha=7.0$ および $C=1.1 \times 10^{22}$ を代入し、さらに $D=1$ とおいた場合が図6の実線に相当する。また、線形則の成否の程度を明らかにするため、 $D=0.7$ および 1.3 の場合を図6中に破線で併せて示したが、図から実験点は実線にほぼ一致するといえる。この結果から、変動応力下において繰返し数を一定とすれば、すべり帯の発生を支配するのは等価応力であること、また σ_1 が σ_2 の70%以下になると、等価応力に占める σ_1 の寄与がきわめて小さくなること、すなわちすべり帯発生に及ぼす σ_1 の影響がきわめて小さいことがわかる。

3・3 平均応力がく形波状に変化する場合 一定振幅荷重下では、平均応力はすべり帯発生に影響しないことが報告されている⁽¹⁾が、平均応力が変動する場合にすべり帯発生に平均応力がいかなる影響を及ぼすかについては明らかにされていない。また、広帯域ランダム荷重は周波数および振幅ともに変化するが、これは平均応力が変化する変動荷重に単純化できる。そこで、このような荷重下におけるすべり帯発生特性を検討するために、まず平均応力がく形波状に変化す

図6 二段多重重複荷重における等価応力

図7 平均応力がく形波状に変化する応力

る場合について調査を行った。

図1(b)に示す試験片を用い、図7のように応力振幅 σ_1 、周波数20 Hz(周期0.05 s)の正弦波の平均応力 σ_2 が2 Hz(周期0.5 s)のく形波状に変化する負荷が与えられる場合について限界応力を求めた。ここで、 $\sigma_1/\sigma_2=1/3$ とし、 σ_1 はすべり帯発生の下限界応力以下となるようにした。また、図7に示す応力の変動を1サイクルとした。図8に結果を示す。応力の計数は図7に示すように、レンジペア法に基づいて行った。このとき、1サイクルに対する等価応力は

$$(\sum \sigma_i^a)^{1/a} = \{(\Delta\sigma_1/2)^a \times 10 + (\Delta\sigma_2/2)^a\}^{1/a} \\ = \{\sigma_1^a \times 10 + (\sigma_1 + \sigma_2)^a\}^{1/a} \dots\dots\dots (10)$$

で表すことができる。ただし、 $\Delta\sigma_1$ および $\Delta\sigma_2$ は応力のレンジペアである。また、本節および3.4節で用いためっきはくは表1に示す性質を有するものであり、 $\alpha=3.6$ を用いた。図8には2 Hzおよび20 Hzの一定振幅による σ_p - N 曲線を併せて示したが、実験点は2 Hzのそれにほぼ一致することがわかる。これは式(10)で表す等価応力の大部分を占める平均応力 σ_2 が2 Hzの速度で変化するためであると考えられる。しかし、平均応力はく形波状に変化するのに対し、図8中に併記した σ_p - N 曲線は正弦波に対するものである点に若干の問題が残るといえる。この点については次節において検討する。

図8の結果から、応力振幅がすべり帯発生の下限界応力以下であっても平均応力が変動する場合には、すべり帯が発生すること、この場合の応力の計数方法としてレンジペア法が適していることなどがわかった。

表1 銅めっきはくの α および C

	2 Hz	20 Hz
α	3.6	3.3
C	6.1×10^{13}	2.2×10^{13}

図8 平均応力がく形波状に変化する場合の限界応力

3.4 平均応力が正弦波状に変化する場合 図9

(a)に示すような、平均応力が正弦波状に変化する場合(振幅 σ_2)について、3.3節と同様な調査を行った。繰返し速度は3.3節と同様とし、 $\sigma_1/\sigma_2=1/10$ とした。図10に結果を示す。ここで、応力はレンジペア法により計数し、次式によって等価応力を求めた。

$$(\sum \sigma_i^a)^{1/a} = \{(\Delta\sigma_1/2)^a \times 8 + (\Delta\sigma_2/2)^a\}^{1/a} \\ = \{\sigma_1^a \times 8 + (\sigma_1 + \sigma_2)^a\}^{1/a} \dots\dots\dots (11)$$

繰返し数には、図9(a)に示す応力の変動を1サイクルとしたときの繰返し数を取った。図10には、2 Hzおよび20 Hzにおける σ_p - N 曲線を併せて示したが、実験点は2 Hzの曲線にきわめてよく一致していることがわかる。これは平均応力が2 Hzの速度で変動しているためと考えられる。

変動振幅応力は一般に周波数および振幅の異なる応力の重ね合わせと考えることができるが、変動応力に対する銅めっきはくの校正曲線として、いかなる周波数下の σ_p - N 曲線を用いたらよいか、また3.3節で述べたように応力波形の相違はどのように考慮したらよ

(a) レンジペア法

(b) レンジ法

図9 平均応力が正弦波状に変化する応力と計数法

図10 平均応力が正弦波状に変化する場合

いかなどの問題が生じる。そこでこれらの点について若干の検討を加えた。別に製作した銅めっきに、く形波または正弦波状の応力を 2 Hz の繰返し速度で与えた場合の σ_p - N 曲線を図 11 に示す。図 11 から明らかのように、く形波の場合のほうが限界応力が若干高く現れる。く形波は応力の増加および減少部分と一定値に保持される部分からなるが、応力の変化する部分におけるひずみ速度は正弦波の場合に比較して大きいため、ひずみ速度の影響⁽¹³⁾が現れて限界応力が高くなったものと考えられる。以上の結果から、図 7 および図 9 の場合における銅めっき層の微視的レベルにおける応力-ひずみヒステリシスループを模式的に描くと図 12 のようになるものと考えられる。すなわち、平均応力がく形波状に変化する場合のほうが平均応力の変動によるヒステリシスループ面積が若干小さくなるものと考えられる。図 11 の結果と、2 Hz の σ_p - N 曲線と比較した図 8 において測定値が若干高めに現れる傾向とは定性的に一致する。しかしながら、限界応力に及ぼす応力波形の影響は、銅めっき層の組織変化の機構にも関連する重要な特性であるため、さらに検討を加え明確に把握しておく必要があるものと考えられる。

次に、図 9 (b) に示すようなレンジ法によって、計数した場合について検討する。この場合には、1 サイクル中に r_1 の大きさのレンジが 10, r_2 の大きさのレンジが 8 含まれる。したがって、振幅が $r_1/2$ の応力が 5, $r_2/2$ の応力が 4 となる。たとえば、 $\sigma_1=20$ MPa, $\sigma_2=200$ MPa のとき、レンジ法による等価応力はレンジペア法のその約 2/5 となる。したがって、図 10 の結果を考慮すれば明らかにレンジ法は変動応力の効果を過小評価することがわかる。これは、レンジ法が小さい波のみを計数し、平均応力の変化を考慮していないからである⁽¹⁴⁾。

以上の結果から、銅めっきはくを変動応力下で用いれば、応力のレンジペアに基づくヒステリシスループ

を計数するひずみゲージとなりうるものと考えられる。したがって、ランダム荷重を受ける機械要素などに銅めっきはくを接着し、一定の期間の後、すべり帯発生の有無を観測し、一定応力下で求めた σ_p - N 曲線と比較すれば、この期間中の応力の平均値を式 (5) の等価応力レンジペアによって見積もることが可能になるものと考えられる。

4. 結 言

平均応力および振幅ともに変動する場合の銅めっきはくのすべり帯発生現象の基礎的特性を明らかにすることを目的とし、振幅が二段多重に変動する場合、平均応力がく形波または正弦波状に変動する場合などについて限界応力を求めて、すべり帯発生を支配する因子について検討を加えた。得られた結果を要約すれば以下ようになる。

(1) 一定振幅応力下における銅めっきはくのすべり帯発生限界応力 σ_p と繰返し数 N との間に、 $\sigma_p \cdot N = C$ の関係が成り立つ。すなわち、すべり帯発生現象に総ヒステリシスエネルギー一定の条件が成り立つ。

(2) 振幅および平均応力ともに変化する変動応力下において、すべり帯発生を支配する力学的因子はレンジペア法によって計数される応力の振幅である。また、この場合の疲労被害の累積は線形則に従う。

(3) 変動応力下における銅めっきはくのすべり帯発生限界応力曲線は、応力のレンジペア σ_i を用い、 $(\sum \sigma_i^a)^{1/a}$ なる等価応力を用いて整理すれば、一定応力下のそれと一致する。

(4) 銅めっきはくをランダム荷重下で用い、一定

図 11 σ_p - N 曲線に及ぼす応力波形の影響

(a) 平均応力がく形波状に変化する場合

(b) 平均応力が正弦波状に変化する場合

図 12 銅めっきの微視的レベルにおける
応力-ひずみヒステリシスループの模式図

の期間の後すべり帯発生の有無を観測し、一定応力に対する σ_p - N 曲線を校正曲線として用いれば、この期間中の応力の平均を等価応力で見積もることが可能になるものと考えられる。

終わりに、本研究の内容について貴重なご助言を賜った名古屋大学工学部 北岡征一郎助教授に厚くお礼申し上げます。また、試験片の製作にご助力いただいた静岡大学の吉田始ならびに磯谷章の両技官に感謝する。

なお、本研究の一部は昭和 62 年度科学研究費補助金（奨励研究 A）によるものであることを付記して謝意を表する。

文 献

- (1) Ohkubo, H., *Memoirs Fac. Eng., Nagoya Univ.*, 20-

- 1(1968), 1.
 (2) 清家・ほか 3 名, 機論, 98-427, A(1982), 291.
 (3) 加藤, 機論, 49-446, A(1973), 1344.
 (4) 泉沢・長瀬, 機論, 52-476, A(1986), 1021.
 (5) Schive, J., *Fatigue of Aircraft Structures*, (1966), 115, Pergamon Press.
 (6) 中村・ほか 2 名, 機械の研究, 27-3(1975), 493.
 (7) Klesnil, M. and Lukas, P. (荒木・堀部訳), *Fatigue of Metallic Materials*(金属疲労の力学と組織学), (1984), 17, 養賢堂.
 (8) Fuchs, H. O. and Stephens, R. I., *Metal Fatigue in Engineering*, (1980), 78, Wiley Interscience Publication.
 (9) 清家・ほか 2 名, 機論, 39-325(1973), 2677.
 (10) 菊川・ほか 3 名, 機論, 35-278(1969), 2020.
 (11) 城野・ほか 2 名, 材料, 32-361(1983), 1137.
 (12) 菊川, 機誌, 75-646(1972), 1485.
 (13) 泉沢・ほか 2 名, 機論, 52-482, A(1986), 2410.
 (14) 文献(8)の 196 ページ.

討 論

〔質問〕 飯 野 豊〔豊田工業大学〕

(1) 銅めっきはくの α に関して式(2)では 7, 図 3 では 4~5, 表 1 では 3.6 または 3.3 となっている。 α がこのように異なるのはいかなる理由によるものか。また, α が異なっても疲労ゲージとしての精度に及ぼす影響はないか。

(2) 図 6 の結果から σ_1 が σ_2 の 70% 以下になるとすべり帯発生に及ぼす σ_1 の影響が極めて小さいと結論しているがその判断の根拠はなにか。

(3) 疲労ゲージとして使用する場合, 検出できる等価応力の精度はどの程度か。

〔回答〕 (1) 銅めっきはくの α は 1 サイクル当たりの疲労被害が応力振幅のべき乗に比例すると仮定した場合の定数であり, めっきはくの組織変化の機構を反映した量であると考えられる。めっきの品質により校正曲線が変化する⁽¹⁾ことから, α および C はめっきの品質の影響を受けるものと考えられる。また, 試験条件, すなわち繰返し速度, 応力波形, 試験温度などの影響も受けるものと考えられる。しかしながら, めっきはくに生じる成長粒子発生, 成長およびすべり帯発生の各現象の解明はまだ必ずしも十分ではないことから, これらの定数の支配因子が何であるかについては現在のところ明らかではない。この点は, 銅めっきはくを疲労ゲージとして利用する場合の基礎的特性であるため, 今後検討を加えたいと考えている。参考までに別のデータでは, α は繰返し速度が高いほど,

また成長粒子に比較してすべり帯発生のほうが, 大きい傾向が得られているが, 本研究で得られた値の範囲内であった。

α の値が疲労ゲージの特性に与える影響として次のことが考えられるが, その測定精度に及ぼす影響はないものと考えている。等価応力 σ_{eq} が式(5)で定義されることからわかるように, σ_{eq} は $\alpha=1$ の場合は算術平均を表すが, これより大きくなればなるほど大振幅応力の影響が大きくなる。

(2) (1)で述べたことに関連し, $\alpha=7$ であるため, 等価応力に占める大振幅応力 σ_2 の寄与が小振幅応力 σ_1 のそれに比較して大きく, σ_1 が小さくなると, 式(6)の括弧内第 1 項が第 2 項に比較してほぼ無視できるようになる。例えば, $\sigma_1/\sigma_2=0.7$ の場合, 前者は後者の約 8% となり, 等価応力における前者の寄与はかなり小さくなる。

(3) 応力振幅が変動する場合にも線形則が成り立つならば, 式(5)で定義される等価応力を, 銅めっき法とほぼ同程度の精度, すなわち数%の精度で求めることができると考えられる。後に報告する研究で示すように, 線形則が成り立たない場合には, 銅めっきはく疲労ゲージを用いて求められる等価応力と式(5)の等価応力は一致しなくなる。しかし, 比較的広い条件下で, かなりの精度で式(5)の等価応力を求めることができると考えている。