

(様式 2)

## 学位論文の概要及び要旨

氏 名 小野 勇一 印

題 目 電着金属薄膜を用いた応力測定法と二軸応力下におけるき裂進展挙動に関する研究

### 学位論文の概要及び要旨

実験応力解析法の一つである銅めっき応力測定法は、銅めっきを施した機械要素、あるいは銅めっき箔（電着銅薄膜）を接着した機械要素が繰返し負荷を受けると、薄膜内に粒子の成長（成長粒子）が生ずる現象を利用する。すなわち、成長粒子の発生はせん断ひずみ（応力）振幅 $\gamma$ に支配されるため、これと繰返し数 $N$ との関係（ $\gamma$ - $N$ 曲線）を予め求めておけば、銅薄膜を測定対象となる機械要素に適用して、薄膜に成長粒子が発生する $N$ を求めることにより、機械要素に作用した $\gamma$ を求めることができる。この測定法は、現在広く利用されている電気抵抗線ひずみゲージによるリード線が不要なため、回転体や密閉空間内にある機械要素に容易に適用できるなどの特徴を有しているが、以下のような問題点もある。すなわち、① $\gamma$ - $N$ 曲線では、ある $\gamma$ に対して、成長粒子が発生する $N$ が固有の値となるため、機械要素に作用するせん断応力（ひずみ）振幅を計測するためには、成長粒子発生の有無を確認するために試験を頻繁に中断する必要がある。したがって、測定法の簡便さの観点から $\gamma$ - $N$ 曲線を利用する方法は必ずしも実用的とはいえない。②電着銅薄膜に微小な円孔を作製すれば、二軸応力状態にある機械要素の主応力振幅を分離・計測できることが明らかにされている。しかしながらこの方法は、円孔縁に発生したすべり線を統計的に扱うため、測定精度の向上には多数の円孔を対象として試験を実施する必要がある。これにより計測時間が増加し、広い測定領域が必要となる。③機械要素に生ずる応力は静的な平均応力に動的な応力振幅が重畳する 경우가多く、引張り平均応力は疲労強度の低下をもたらすことが知られている。しかしながら成長粒子の発生は、動的な応力振幅のみに依存し、静的な平均応力の影響を受けないため、この方法では平均応力の検出が不可能である。

そこで本論文では、まず上述の問題点を克服し、金属薄膜を用いた応力測定法の一層の充実を図ることを目的とした。すなわち、①に関しては、第 2 章において、銅薄膜に発生する成長粒子の密度 $r^*$ は繰返し数 $N$ とともに増加し、広範囲な $N$ に対して求めることができることから、従来の較正曲線に代わり、 $r^*$ を利用した方法について検討した。すなわち、二軸応力状態にある機械要素に対して、 $r^*$ を支配する主要な応力成分が、材料に作用するせん断応力振幅であることを明らかにし、これらの間の関係式を導いた。②に関しては、第 3 章において、平板中の円孔縁における応力分布と機械要素に接着した円孔を有する銅薄膜の円孔縁での応力分布の類似性に着目し、従来とは異なる二軸応力測定法について検討した。すなわち、円孔縁から発生した成長粒子の分布形状は、せん断応力振幅が同一の場合、二軸応力比 $C$ （=第 2 主応力/第 1 主応力）の増加とともに大きくなることが確認できたため、この分布形状に基づいて $C$ を求めるための構成式を導いた。またこの方法では、測定対象となる円孔数が 7~9 個で十分であるので、従来よりも格段に少ない円孔数で測定値が得られる。第 4 章では、上述の方法に採用する円孔直径の微小化を図るとともに、被測定物の弾性係数の影響について検討した。すなわち、円孔直径を小さくすることで、測定領域を十数平方 mm まで減少させることができた。また、被測定物と銅薄膜におけるひずみの連続性を仮定することにより得られる銅薄膜上でのせん断応力振幅と二軸応力比が成長粒子の分布形状を支配することを実証し、これに基づいて構成式を汎用化した。③に関しては、第 5 章において、平均応力の検出を可能にするために、円孔を

有する薄膜から繰返し負荷により発生した疲労き裂の進展速度  $da/dN$  を利用した平均応力測定法について検討した。すなわち、ニッケル薄膜を用いれば、 $da/dN$  は  $C$  の如何にかかわらずほぼ一義的に表すことができ、 $da/dN$  から平均応力を求めるための構成式を導いた。また、第 6 章では、上述の方法における精度の向上と周波数の影響について検討を加えた。すなわち、ニッケル合金薄膜を採用すれば、精度よく、短時間で平均応力を得ることができることが明らかとなった。また、周波数が異なれば、 $da/dN$  も異なることが確認できたため、構成式を周波数の影響を考慮したものに発展させた。さらに、第 7 章では、この方法における被測定物の弾性係数の影響について検討を加えた。すなわち、薄膜に作用する応力振幅と平均応力が  $da/dN$  を支配することを実証し、これに基づいて上述の構成式の修正を行った。

また、機械要素に発生したき裂の安定成長領域における進展寿命は、上述の金属薄膜を用いた応力測定法により、機械要素に作用する主応力振幅を計測し、これに基づいて得られる応力拡大係数  $K$  を用いて評価される。この際、線形弾性破壊力学によれば、き裂に平行な第 2 主応力は  $K$  に影響しない非特異項であるため、き裂進展速度  $da/dN$  が  $K$  により一義的に決定されるならば、この第 2 主応力はき裂の進展に影響を及ぼさないことになる。しかしながら、第 2 主応力がき裂の進展に関与している報告も多く、この点に検討を加えることは機械の余寿命評価の観点からも重要な課題となる。

そこで本論文では、第 8 章において、アルミニウム合金中にアルミナ粒子を体積含有率で 10% と 20% 分散させた粒子強化複合材料を対象として、 $da/dN$  に及ぼす第 2 主応力の影響を調査した。すなわち、平面曲げ-繰返しねじり組合せ試験を実施し、切欠きから発生したモード I 表面き裂の二軸応力下での進展挙動を調査するとともに、破壊力学パラメータを用いて  $da/dN$  を整理し、これらの有効性について検討を加えた。すなわち、それぞれの材料について、応力拡大係数幅  $\Delta K$  を用いて  $da/dN$  を整理すれば、 $C$  の影響を受けるが、有効応力拡大係数幅  $\Delta K_{eff}$  を用いて整理すれば、 $C$  の影響が軽減されることが明らかとなった。また、き裂先端開口変位  $CTOD$  を用いて  $da/dN$  を整理しても、異なる材料間の  $da/dN$  を統一的に整理できないことも確認できた。