

氏名	伊原千秋
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	論工博第3762号
学位授与の日付	平成15年11月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	金属の疲労破壊に関する理論的研究

論文調査委員 (主査) 教授 北村隆行 教授 島 進 教授 北條正樹

### 論文内容の要旨

本論文は、金属材料の疲労におけるき裂の発生と伝ばについて、多数の転位がもたらす損傷累積による確率過程として構築した数理モデルを提案し、その力学解析によって疲労破壊過程を理論的に明らかにした結果をまとめたものであって、4章からなっている。

第1章は緒論であり、金属材料の疲労に関する近年の動向を整理するとともに、転位に基づくミクロの力学からマクロな疲労破壊現象を理論的に解明することを意図している本研究の目的を述べ、疲労破壊の主要過程であるき裂の発生とその伝ばに関する数理モデルの従来の疲労研究に対する位置付けと意義を示している。

第2章では、“指数減衰を伴う累積過程に対する初到達問題”に関する解析を基に、疲労き裂発生寿命の大部分を占める初期硬化が飽和した段階における確率論的損傷累積に関する数理モデルを提案し、き裂発生寿命に関する基本的関係式を導出している。また、増殖転位に関する考察に基づいて、繰返し応力のもとでその転位群が疲労損傷として金属材料内部に不規則に蓄積し、それによって局所的に累積したひずみエネルギーが特定値を越えたとき、そこに微小き裂が発生するという物理的描像を数理モデルに付与している。このモデルの特徴は、ミクロ領域における転位群（セル壁に沿って累積した転位群）に関する微視力学的考察からき裂発生（セル寸法程度のき裂）に関する巨視力学法則を理論的に導いていることである。また、結晶粒径 $d_g$ の異なる三種類（ $d_g=7.8\mu\text{m}$ ,  $20.5\mu\text{m}$ ,  $55\mu\text{m}$ ）の低炭素鋼S20Cに対する物性値を用いて、提案モデルに基づく解析を行っている。その解析より得られた疲労き裂発生寿命を、他研究者によって得られている同材料を用いた疲労実験におけるき裂発生寿命と比較し、モデルの有効性を検証している。

第3章では、金属材料の疲労破壊における主要なき裂伝ば機構であるMode Iを対象として確率論的損傷累積に関する数理モデルを提案し、き裂伝ば速度に関する基本法則を導出している。この数理モデルでは、マクロき裂先端近傍を微小領域に分け、その各領域に確率的に損傷が累積し、その蓄積値が許容限度に達したときに領域に破壊（マクロき裂の伝ば）が生じると仮定している。また、転位双極子がき裂先端近傍の領域内すべり帯上に並び、それらによってき裂先端の開口とき裂伝ばが生じる疲労き裂伝ばの物理的機構について考察し、提案した数理モデルの物理的意義を明らかにしている。また、モデルに従って、経験則として知られているき裂伝ば速度と有効応力拡大係数変動幅のべき乗に比例する破壊力学則を理論的に導出している。とくに、微視力学による転位によるひずみエネルギーと巨視力学によるき裂のエネルギー解放率の考察に見られるように、エネルギーを媒体とした金属疲労におけるミクロ現象とマクロ現象の連結が本研究の特徴である。さらに、3%シリコン鉄に対する物性値を用いて疲労き裂伝ばの解析を行い、他研究者によって示されている実験結果と良い一致を示すことより、モデルの有効性を検証している。また、疲労き裂伝ばの下限界近傍の特性についてもモデルに基づく解析を行い、実験観察結果（他研究者による実験結果の引用）と一致することを示している。

第4章は結論であり、本論文で得られた成果について総括するとともに、今後の課題と発展性について述べている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、金属材料の疲労におけるき裂の発生と伝ばについて、多数の転位がもたらす損傷累積による確率過程として構築した数理モデルを提案し、その力学解析によって疲労破壊過程を理論的に明らかにした結果をまとめたものである。得られた主な成果は次のとおりである。

- 1) “指数減衰を伴う累積過程に対する初到達問題”に関する解析を基に、疲労条件下の金属材料の局所における確率論的損傷累積に関する数理モデルを提案し、き裂発生寿命に関する基本的関係式を導出した。
- 2) エネルギー論的観点から疲労き裂発生過程を考察し、局所におけるき裂発生をもたらす転位群の運動に関する力学的検討より、1)の数理モデルの物理的内容を明確に示した。
- 3) 低炭素鋼に対する物性値を用いて1)・2)のモデルに基づく疲労き裂発生寿命解析を行い、疲労実験結果との比較よりモデルの有効性を示した。また、マイクロ損傷とマクロき裂発生の力学的相関性を示した。
- 4) き裂先端近傍における確率論的損傷累積に基づいて、金属材料の疲労き裂伝ばに関する数理モデルを提案し、破壊力学関係式を導出した。
- 5) き裂先端近傍における転位増殖機構に基づく検討より、4)の数理モデルの物理的内容を明らかにするとともに、疲労き裂伝ばの微視過程を示して破壊力学関係式の物理的意味を明確にした。
- 6) シリコン鉄に対する物性値を用いて4)のモデルに基づく疲労き裂伝ば解析を行い、既存の疲労き裂伝ば実験における結果を微視力学より統一的に説明しうることを示した。

以上、要するに本論文は、金属の疲労破壊過程を確率論的微視力学の視点から理論的に明らかにしたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年10月21日、論文内容とそれに関連した試問を行った結果、合格と認めた。