

学 位 論 文 要 旨

題 目 金属材料における微小疲労き裂発生および進展挙動の定量的評価手法の検討
Study of Quantitative Evaluation Method for Small Fatigue Crack Initiation and Propagation
Behavior on Metals

氏 名 荒川 仁 太

金属疲労とは材料固有の引張強度以下の応力にて、繰返し荷重を作用させることで部材が破損する現象である。なお、一般的には構造物自体が弾性変形を想定して設計されている場合が多いので、引張強度以下といっても弾性変形内で繰返し応力を作用させることが大半であり、この条件では繰返しサイクル数を多く要するので高サイクル疲労($N=1\times 10^4\sim 1\times 10^7$ cycles)と呼ばれる。これに対して、塑性変形を伴う疲労現象は突発的かつ短時間に過大荷重が繰返し作用する場合である。これは例えば、地震、津波、台風などであり、自然災害を想定したケースが多い。この条件下における疲労現象は短時間で破壊に至るため、高サイクル疲労に対して低サイクル疲労($N=1\times 10^1\sim 1\times 10^4$ cycles)と呼ばれる。

また、こうした金属疲労の現象について研究がされ始めたのは 1800 年代のことである。ドイツの鉱山技師アルベルトは鉱山の巻上機に使用している鉄製の鎖が使用している間にしばしば突然破損することを経験した。その原因を究明するため、アルベルトは 1829 年に鎖の実体試験機を考案し、試験を行った結果、静的な破断応力よりも低い応力でも繰返し作用することで突然破断することを証明した。これが、疲労研究の始まりとされている。その後、鉄道建設に伴って機関車の車軸の疲労破壊がたびたび生じたため、ドイツ人のヴェーラーは疲労に関する研究を系統的に行い、今日の金属疲労研究の礎を築いた。

金属疲労の研究では、機械構造物の破損事故を教訓として新たな疲労現象の知見を得てきた。その中で、疲労寿命は疲労き裂発生寿命と疲労き裂進展寿命に大別されることが提唱され、疲労寿命の予測を行う研究が盛んに行われた。ここで、疲労き裂が発生したときの定義は非常に難しいが、おおよそ数十 μm オーダーの疲労き裂が確認された時点疲労き裂発生寿命と定義する場合が多い。なお、疲労き裂発生とは、力学的な入込み突き出しの現象で材料表面にすべり帯が形成され、それがやがてき裂となる現象である。この疲労き裂発生の寿命を推定することは非常に難しく、実験的に検討される場合が殆どである。それは、金属材料中の結晶方位や結晶組織の影響を強く受けると共に、入込み突き出しがどのタイミングで発現し、どの程度の成長でそれがき裂になるかが不明だからである。これに対して、疲労き裂進展寿命は破壊力学的パラメータ K (応力拡大係数)を用いることで、比較的簡便に算出することができる[9]。しかしながら、0.1 mm 以下のき裂長さを有する微小疲労き裂の発生寿命および進展寿命、加えてその挙動は定量的かつ破壊力学的パラメータの観点から明確にすることは困難である。それは、微小疲労き裂発生は結晶組織の影響を顕著に受ける一方で、微小疲労き裂進展は単一の優先すべり系に従って任意に屈曲するため、非常に複雑な進展経路を辿ることが一つの要因であると考えられる。そこで、本研究では微小疲労き裂発生および進展挙動の定量的評価手法に着目し、微小疲労き裂発生および進展挙動を適切に評価可能な手法について検討を行った。

従来の研究では、微小疲労き裂の進展特性に着目したものやき裂開閉口に着眼点を置いたものが多く、微小疲労き裂特有の優先すべり系の活動に起因する屈曲・偏向を評価した結果は僅少である。また、多くの場合、上述した微小疲労き裂の屈曲・偏向と結晶組織の影響、例えば粒界などの影響により、微小疲労き裂の進展速度は著しく変化し、Paris 則に基づくべき乗則に従わないことが知られている。このことは、正確な疲労き裂進展寿命を予測することに対して大きな問題を与えている。さらに、微小疲労き裂はき裂が小さいがゆえに結晶組織、環境因子、き裂開閉口、き裂先端の塑性域寸法など様々な影響を受ける。これより、複数の因子が同時に作用する微小疲労き裂では、その進展挙動ならびに進展寿命を評価することは困難を極める。そのため、M. sakaguchi らの研究の様に結晶中の力学的条件のみの因子に絞って微小疲労き裂進展挙動の評価を行うことが多い。しかしながら、これらの研究においては、連続的に微小疲労き裂が屈曲する様子を定量的に評価するには至っていない。それは、き裂の屈曲には A. Sugeta らの報告によると転位の運動が大きく影響しておりき裂先端遠方の結晶粒界に転位群が堆積するためであるとされており、転位の運動挙動を把握しなければ解明に繋がらないためである。こうした背景を受け、A. Sugeta らは離散転位法によって、き裂先端の転位の移動を計算シミュレーションによって明らかにしているが、き裂の屈曲挙動予測を明らかにするまでには至っていない。それは、微小疲労き裂の屈曲挙動は転位の移動に加え、結晶方位の影響ならびにき裂先端近傍の塑性域寸法、異方性の影響を受けるため様々な因子が複雑に影響しあっているからである。このことに加え、微小疲労き裂発生過程においては、平滑材において全寿命の大半を費やす。そのため、微小疲労き裂発生機構の解明が必要であるが、同機構に関して定量的に評価した研究報告例は僅少である。したがって、前述したように微小疲労き裂発生および進展機構の定量的評価ができれば、平滑材において全寿命の大半を数値力学的に評価することができ、工業的にも有用性が極めて高いと考えられる。

上述した通り、微小疲労き裂の屈曲挙動を予測することは複数の因子が影響しあっているため、非常に困難を極める。そこで本研究では、き裂進展則のステージ I にあたる微小疲労き裂の屈曲挙動に着目し、その挙動を数値的に予測した。また、試験片全体に作用するとされる T -stress および結晶の異方性を考慮して数値的評価を実施することで、微小疲労き裂屈曲挙動を定量的に評価することを第一の目的とした。また、き裂発生機構の評価を 2 相組織の多結晶体にて実施した。これより、微小疲労き裂発生を力学的に評価できる手法を構築することを第二の目的とした。

本論文は 6 章構成であり、第 1 章は緒論として、本研究に至る背景および過去の研究報告、研究目的について述べた。第 2 章は、試験片が等方性材料であると仮定して、微小疲労き裂の屈曲挙動予測を”すべり因子”パラメータを用いて実施した。これより、等方性材料を仮定した場合に同評価法と実験結果が一致するか否かを評価した。また、それに対する考察を述べる。第 3 章は、試験片全体に作用するとされる T -stress の影響を考慮して、き裂先端の応力場によって各すべり系のすべり易さを評価した。これより、 T -stress が微小疲労き裂に及ぼす影響を明らかにした。また、それに対する考察を加えた。第 4 章は、試験片が異方性材料であると仮定して、微小疲労き裂の屈曲挙動予測を”すべり因子”パラメータを用いて実施した。これより、異方性材料を仮定した場合に同評価法と実験結果が一致するか否かを評価した。また、それに対する考察を述べる。第 5 章は微小疲労き裂進展機構の解明に関する結論で、本研究により得られた成果をまとめた。第 6 章は、2 相組織の多結晶体を使って微小疲労き裂発生機構を数値的に評価した結果を示す。