

F-01 機械的疲労（高サイクル疲労）

破断繰返し数が10の5乗回以上で、弾性範囲内の疲労を高サイクル疲労という。

1. 破壊機構

疲労破壊は、応力繰返しによる局所的塑性変形が原因で生じる。特に、塑性変形能力の高い金属材料では、疲労破壊を避けることはできない。図1に示すように応力繰返しに伴い材料表面で局所的塑性変形（すべり）の非可逆成分が累積し、疲労き裂が発生する。疲労き裂の先端では、局所的な塑性域が形成され、応力繰返しの一回毎に疲労き裂は開閉口し、塑性変形のみで開口量に見合うだけ進展する。

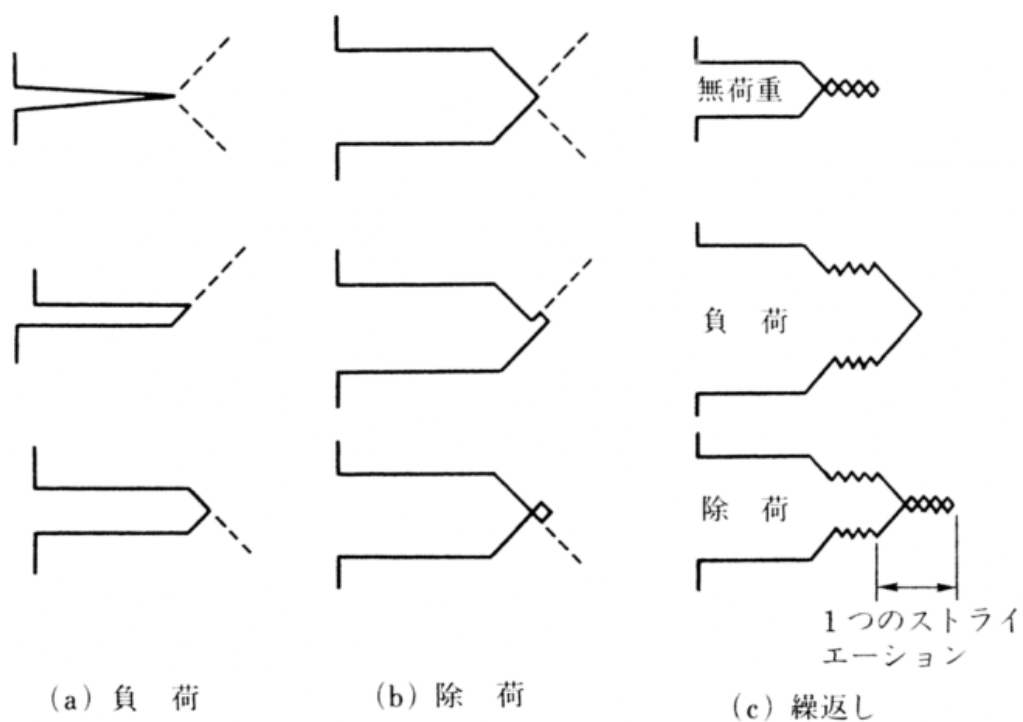


図1 疲労き裂進展の機構

結果として、疲労破面にはストライエーション(Striation)と呼ばれる縞模様が形成される。図2に代表的ストライエーションの電子顕微鏡観察結果を示す。疲労き裂が進展する際に、1回の応力繰返しごとに破面に形成される縞模様の中で、縞の間隔は疲労き裂が進展する速度と一致する。事故調査では、縞の間隔や個数から繰返し応力の大きさや回数の推定に使用されている。

また、き裂面は応力繰返しに伴い繰返し接触し、フレットニング（擦れ）酸化物を生成して着色される。応力振幅が一定（き裂進展速度が一定）の場合には、着色程度も一様であるが、応力振幅または平均応力が変動（き裂進展速度が変動）する場合には、変動前後で着色に濃淡ができ、マクロ的な模様（ビーチマーク）として識別できる。図3に典型的なビーチマークを示す。実機では起動・停止サイクルごとの模様として識別されることが多く、ビーチマークの形状と間隔からき裂進展を定量的に解析できる。

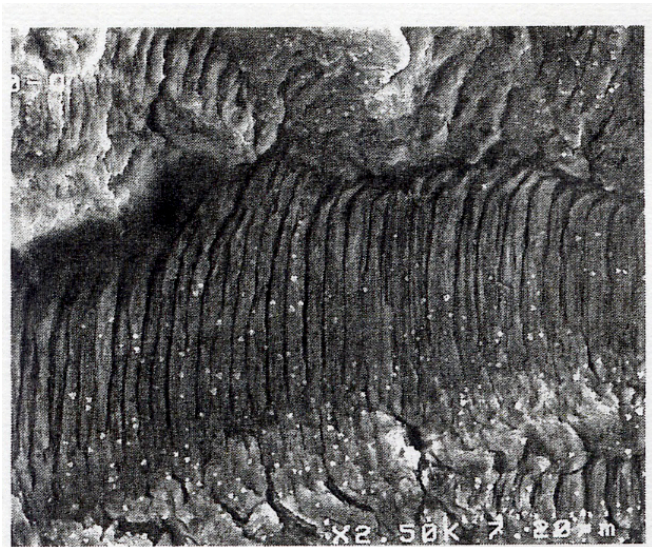


図2 典型的なストライエーション

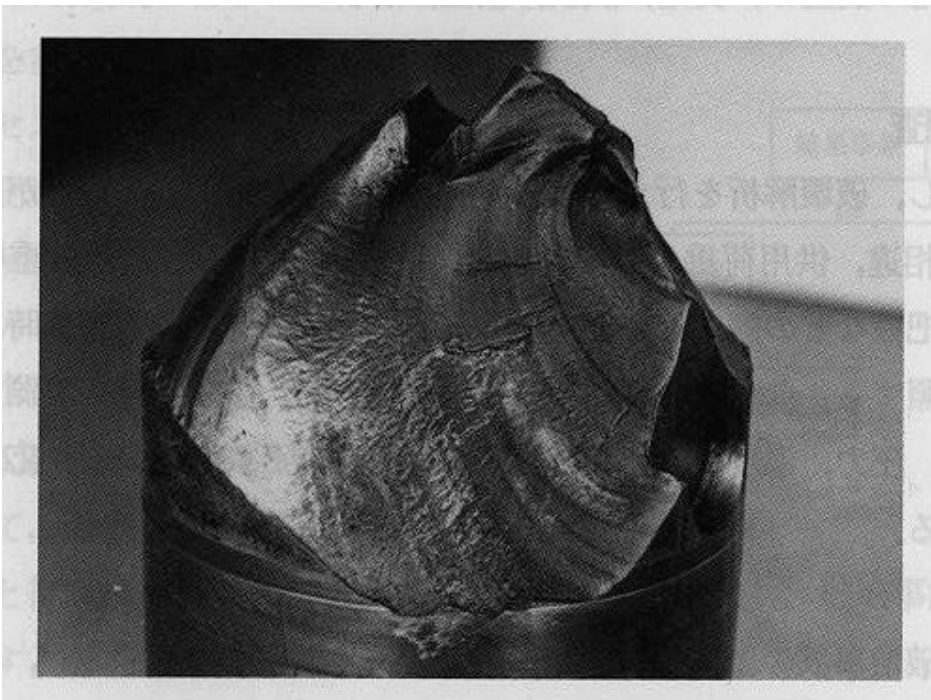


図3 典型的なビーチマーク
(ロール軸の疲労折損破面に形成された)

2. 疲労特性の表現方法

疲労破壊を生じる応力（応力振幅あるいは最大応力）と繰返し数には相関があり、応力の減少に伴い破壊するまでの繰返し数は増大する。両者の関係は両対数または片対数（繰返し数：対数）で図示され、これを **S-N 線図**（応力-繰返し数曲線）という。また、特定の繰返し数に対応する応力を疲労強度または時間強度、特定の応力に対応する繰返し数を疲労寿命という。縦軸の応力振幅が主たる支配因子であるが、平均応力も **S-N 曲線** に影響を及ぼす。

図4に **S-N 線図** の例を示す。**S-N 線図** は右下がりであるが、鉄鋼などでは繰返し数が $10^6 \sim 10^7$ 回において曲線の傾きが急変し、横軸に水平となる傾向を示す。これ以下の応力は無限回の繰返し数に耐えることになるから、疲労限度または耐久限度という。鉄鋼に代表

されるように、体心立方格子や稠密六方格子の金属合金は明瞭な疲労限度を示すが、アルミニウム合金に代表される面心立方格子の金属合金は 10^8 回の繰返し数でもなおS-N線図に水平部が現れない。このような場合、特定の繰返し数（通常は 10^7 回または 10^8 回）に対する時間強度を、疲労限度ということがある。

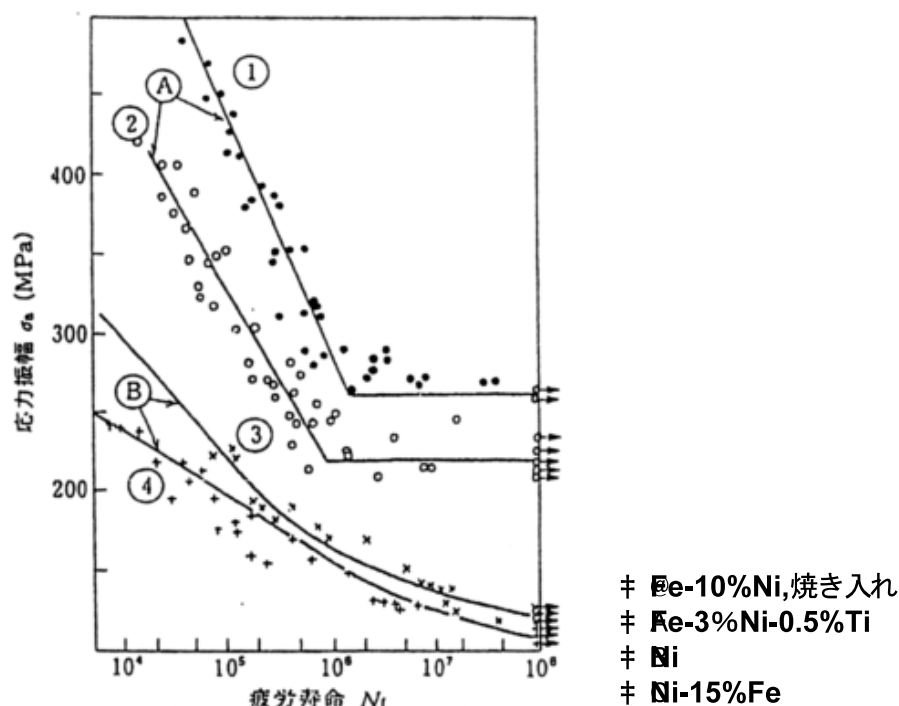


図4 各種材料のS-N線図

3. 疲労き裂進展

疲労き裂進展速度 da/dN は、応力繰返し数1回ごとのき裂寸法増分である。 da/dN と応力拡大係数範囲の関係を図5に示す。ここで ΔK は応力範囲（応力振幅の2倍）に対応する応力拡大係数である。また図中に示す ΔK_{th} は疲労き裂進展の下限界応力拡大係数範囲、 K_{Ic} は疲労き裂進展の上限界としての破壊靱性、 R は応力比（最小応力／最大応力）である。 da/dN と ΔK の関係は両対数表示で直線となり、次式が成立する。

$$da/dN = C \Delta K^m$$

ここで、 m と C は材料定数であるが、 R にも依存する。

これを Paris 則と呼んでいる。Paris 則は主に損傷許容設計で作られた構造物や機器のき裂進展評価の際に使用されている。

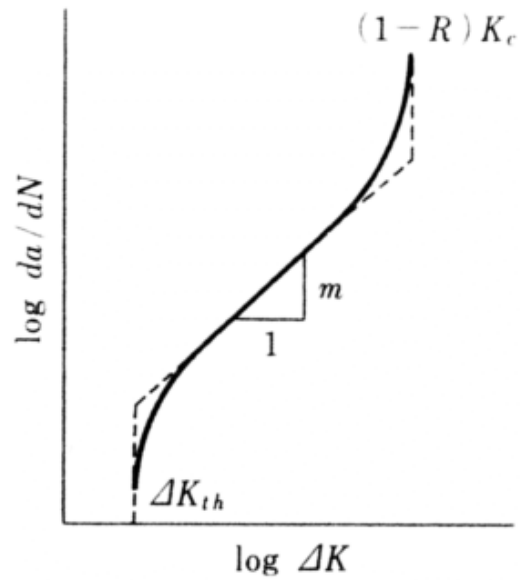


図5 疲労き裂進展特性

5. 設計

疲労を考慮した設計思想として、“安全寿命設計（運用中に疲労き裂が発生しないような設計）”、“損傷許容設計（フェールセーフ設計（構造の一部が破壊しても、全体の致命的な破壊につながらないような多重安全設計）＋クラックセーフ設計（限界欠陥寸法に至るまで、き裂進展を許容する設計））”、“損傷制御設計（損傷許容設計をしながら、積極的に破壊の制御を行う設計）”がある。安全寿命設計では、先に述べた疲労限度を基準として設計することが多い。構造物や機器のメンテナンスの際には、対象となる構造物や機器がどのような思想で設計されたものかを把握することが肝要である。